



## MEDIÇÃO DE VAZÃO USANDO RADIAÇÃO GAMA E A TÉCNICA DE “CROSS CORRELATION”

Eddie Jesús Avilán Puertas

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Verginia Reis Crispim

Luis Eduardo Barreira Brandão

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2014

MEDIÇÃO DE VAZÃO USANDO RADIAÇÃO GAMA E A TÉCNICA DE “CROSS  
CORRELATION”

Eddie Jesús Avilán Puertas

DISSERTAÇÃO 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 MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Verginia Reis Crispim, D.Sc.

---

Dr. Luis Eduardo Barreira Brandão, D.Sc.

---

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

---

Dr. Cesar Marques Salgado, D.Sc.

---

Dr. Walsan Wagner Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
FEVEREIRO DE 2014

Puertas, Eddie Jesús Avilán

Medição de Vazão Usando Radiação Gama e a Técnica de “Cross Correlation”/Eddie Jesús Avilán Puertas. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XIII, 59 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Verginia Reis Crispim

Luis Eduardo Barreira Brandão

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Nuclear, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 58 – 59.

1. Cross Correlation. 2. Vazão. 3. Tempo de Retardo.  
I. Crispim, Verginia Reis *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*Dedico este trabalho a Grisel  
Virginia, María de Lourdes,  
Pebbles Dayana, María Virginia,  
Johar Eduardo e Aris Peter.*

## AGRADECIMENTOS

A minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Virginia Reis Crispim, pela atenção, compreensão, apoio, e confiança na realização deste trabalho.

Ao pesquisador Luis Eduardo Brandão, pelo apoio infinito, e pela sua generosidade em compartilhar os seus inestimáveis conhecimentos e por suas sugestões oportunas.

À minha esposa Grisel Virginia, porque sem seu apoio, confiança, compreensão e parceria, nada disto seria possível.

À minha mãe, Maria de Lourdes, quem sempre me deu atenção, amor e carinho.

Ao Instituto de Engenharia Nuclear/CNEN e seus funcionários, principalmente à César, Eder, Valério e Marcelo, à equipe de operação do Reator Argonauta, em especial: Carlos A. C. Renke, Flavio, e a Rosilda Maria Gomes de Lima pela preparação dos radiotraçadores.

Aos professores do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ pela oportunidade e confiança para o desenvolvimento deste trabalho. À Josevalda L. Noronha, Liliane Oliveira da Rocha, Reginaldo Baptista de Oliveira, Tânia R. M. Moraes, Washington Luiz dos Santos, e a toda equipe administrativa do PEN/COPPE/UFRJ. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

A meu pana, Wagner do Prado, porque no início, sem a ajuda dele seria impossível ter permanecido no Rio e a minha mão direita, o meu filho Peter, porque sem sua inestimável ajuda nada disto poderia ter sido realizado.

A todos os membros da banca examinadora deste trabalho, por terem aceitado o convite para avaliar esta dissertação. A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

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

## MEDIÇÃO DE VAZÃO USANDO RADIAÇÃO GAMA E A TÉCNICA DE “CROSS CORRELATION”

Eddie Jesús Avilán Puertas

Fevereiro/2014

Orientadores: Verginia Reis Crispim

Luis Eduardo Barreira Brandão

Programa: Engenharia Nuclear

Desenvolveu-se um sistema correlator capaz de medir vazão instantânea pela determinação do tempo de deslocamento de um radiotraçador num duto de água por meio do cálculo da função de “Cross Correlation”. O radioisótopo usado é o  $^{82}\text{Br}$  que detecta-se por dois detectores cintiladores de NaI(Tl) de  $1\frac{1}{4}'' \times \frac{3}{4}''$  posicionados axialmente na tubulação.

O correlator calcula a função de “Cross Correlation” pelos Métodos Ponto a Ponto ou Evolutivo nos modos de operação: Direto, Relay ou Polar. O sistema primeiro é testado com dois tipos diferentes de sinais simulados (quadrado e gaussiano) para comprovar seu funcionamento. Finalmente são realizados testes experimentais que determinam que o sistema pode medir vazão de água na faixa de 200 até 600 l/h. Como os cálculos envolvidos nesta metodologia são muito mais simples do que os usados pelas técnicas da transformada de Fourier ou de transiente de tempo, diminui o tempo computacional o que o faz um sistema adequado para ser usado em lugares de espaço reduzido.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## FLOWRATE MEASUREMENT USING GAMMA RAY AND CROSS CORRELATION TECHNIQUE

Eddie Jesús Avilán Puertas

February/2014

Advisors: Verginia Reis Crispim

Luis Eduardo Barreira Brandão

Department: Nuclear Engineering

It was developed a correlator system capable of measuring instantaneous flowrate for determining the travel time of a radiotracer in a water duct by calculating the “Cross Correlation” function. The radioisotope used is the  $^{82}\text{Br}$  detected by two NaI(Tl)  $1\frac{1}{4}'' \times \frac{3}{4}''$  scintillator detectors axially positioned in the pipe.

The correlator calculates the “Cross Correlation” function by the Point by Point or Evolutionary Methods on the operating modes: Direct, Relay or Polar. The system is first tested with two simulated signals (square and Gaussian ) to evaluate its operation. Finally, are made experimental tests that allow verify that the system can measure the water flowrate in the range from 200 to 600 l/h. As the calculations involved in this methodology are much simpler than those used by the techniques of Fourier transform or transient time, decreases the computational time which makes it suitable for use in places with limited space.

# SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Generalidades . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	5
1.3 Revisão bibliográfica . . . . .	5
<b>2 Fundamentos Teóricos</b>	<b>8</b>
2.1 Função de cross correlation . . . . .	8
2.2 Métodos de cálculo da função “Cross Correlation” . . . . .	12
2.3 Modos de operação . . . . .	14
2.4 Medida de Vazão usando o Método de “Cross Correlation” . . . . .	16
2.4.1 Modelo Fluxo Pistão . . . . .	16
2.4.2 Modelo Difusão . . . . .	19
2.5 Sistema de Cálculo da Função de “Cross Correlation” . . . . .	20
2.6 Estatística para a Avaliação da Distribuição da Função de “Cross Correlation”	20
2.7 Distribuição do Tempo de Residência (RTD) . . . . .	23
2.7.1 Função Distribuição do Tempo de Residência . . . . .	23
2.8 Cálculo da Função de Distribuição $E(t)$ . . . . .	25
<b>3 Materiais e Métodos</b>	<b>27</b>
3.1 Linha de Transporte de Água . . . . .	27
3.2 Sistema de Detecção da Radiação . . . . .	28
3.3 Sistema de Aquisição de Dados . . . . .	29
3.3.1 Temporização das Leituras . . . . .	29
3.4 Calibração dos Detectores . . . . .	30
3.5 Medida de Vazão . . . . .	31
3.6 Preparação do Traçador . . . . .	32
3.7 Programas de Avaliação das Funções de “Cross Correlation” e RTD . . . . .	33



3.7.1	Programa CROSSCORR . . . . .	33
3.7.2	Pacote TRAÇADORES . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>36</b>
4.1	Cálculo da Função de Cross Correlation para Pulsos Simulados . . . . .	36
4.1.1	Pulso Quadrado . . . . .	36
4.1.2	Otimização do número de evoluções . . . . .	37
4.1.3	Cálculo da Função de “Cross Correlation” no caso Simples e Média	38
4.2	Pulso Gaussiano . . . . .	42
4.3	Simulação Fluxo Pistão . . . . .	46
4.4	Simulação de Fluxo de Difusão . . . . .	47
4.5	Testes Experimentais . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>Sugestões</b>	<b>57</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>58</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Medidores de vazão disponíveis no mercado . . . . .	2
2.1	a) Posição do sensor. b) Pulsos no detector nos instantes $t_1$ e $t_2$ . . . . .	8
2.2	a) Posição dos sensores. b) Pulsos em cada detector no instante $t_0$ . . . . .	8
2.3	a) Posição dos sensores. b) Pulsos em cada detector no instante $t_1$ e $t_2$ . . . . .	9
2.4	Gráfico típico da função de “Cross Correlation” . . . . .	11
2.5	Gráfico da função obtido pelo método Ponto a Ponto . . . . .	13
2.6	Gráfico da função de “Cross Correlation” calculada pelo Método Evolutivo. . . . .	14
2.7	Representação esquemática do Modo Direto . . . . .	15
2.8	Representação esquemática do Modo Relay . . . . .	15
2.9	Representação esquemática do Modo Polar . . . . .	16
2.10	a) Geometria para medir a vazão por “Cross Correlation”. b) Sinal no detector 1 e no detector 2, respectivamente. . . . .	16
2.11	Sinais de entrada e saída de um sistema linear deslocados por um impulso “ $\tau$ ” . . . . .	18
2.12	Sistema de Impulso de Difusão . . . . .	20
2.13	Diagrama em bloco de um “Cross Correlator” . . . . .	21
2.14	Gráfico das Assimetrias . . . . .	22
2.15	Gráfico das Curtoses . . . . .	22
3.1	a) Rotâmetro usado nos testes experimentais. b) Linha de Transporte . . . . .	27
3.2	Diagrama em bloco dos módulos eletrônicos para o registro do sinal de cada detector . . . . .	28
3.3	Ponto de Injeção do Rdiotraçador na Linha de Água. . . . .	28
3.4	a) Dimensões colimador. b) Vista colimador. c) Furo central colimador . . . . .	30
3.5	Unidade de Medida de Vazão . . . . .	31
3.6	Detectores posicionados para medir vazão . . . . .	32
3.7	Espectro de energia do $^{82}Br$ . . . . .	33
3.8	a) Diagrama das simulações efetuadas para calcular o coeficiente de “Cross Correlation”, $\rho$ , com cada método e modo de operação. . . . .	34

4.1	Pulso principal com duas amplitudes, uma de intensidade 70 e largura de 1s, e outra com intensidade de 120 e largura de 3s, com uma linha base de 20. . . . .	36
4.2	a) Gráfico do coeficiente normalizado de “Cross Correlation”, “ $\rho$ ”, calculado pelo método Evolutivo para evoluções desde 100 até 20000. . . . .	37
4.3	Pulsos quadrados correspondentes a uma vazão de $111 \times 10^{-3} l.s^{-1}$ em cada um dos detectores quando afastados 20 cm. . . . .	38
4.4	Caso Media: coeficiente de “Cross Correlation”, $\rho$ , calculado pelo método Ponto a Ponto, no modo Direto, junto com uma gaussiana centrada no valor médio. . . . .	39
4.5	Caso Simples: coeficiente de “Cross Correlation”, $\rho$ , calculado pelo método Ponto a Ponto, nos modos Direto, Relay e Polar. Todas têm um máximo em 2s. . . . .	41
4.6	Caso Simples: coeficiente de “Cross Correlation”, $\rho$ , calculado pelo método Evolutivo, nos modos Direto, Relay e Polar. Todas têm um máximo em 2s. . . . .	41
4.7	Sinais gaussianos $x(t)$ e $y(t)$ com um tempo de deslocamento de 4s entre eles . . . . .	42
4.8	Caso Media: calculado pelo método Ponto a Ponto o coeficiente de “Cross Correlation”, $\rho$ , no modo direto. Junto com esta curva apresenta-se uma gaussiana centrada no valor médio aos 2,16s. . . . .	44
4.9	Caso Simples: calculado pelo método Ponto a Ponto coeficiente de “Cross Correlation”, $\rho$ , nos modos Direto, Relay e Polar. Todas têm um máximo em 4s . . . . .	45
4.10	Caso Simples: calculado pelo método Evolutivo coeficiente de “Cross Correlation”, $\rho$ , nos modos Direto, Relay e Polar. Todas têm um máximo em 4s . . . . .	45
4.11	Coeficiente de correlação, $\rho$ , calculado pelo Ponto a Ponto no modo Direto, para três vazões diferentes. . . . .	47
4.12	a) Gráfico do coeficiente de “Cross Correlation”, $\rho$ , calculado pelo Ponto a Ponto no modo Direto, para três vazões diferentes. . . . .	48
4.13	Gráfico dos sinais nos Detectores 1 e 2, de um dos testes experimentais de vazão de $56 \times 10^{-3} l.s^{-1}$ . . . . .	49
4.14	Gráfico do coeficiente de “Cross Correlation”, $\rho$ , calculado pelo método Ponto a Ponto e Evolutivo para uma vazão experimental de $56 \times 10^{-3} l.s^{-1}$ no modo direto. . . . .	50
4.15	Foto que apresenta a entrada do fluido dentro do tubo de medida durante o escoamento com vazão de $56 \times 10^{-3} l.s^{-1}$ , em diferentes tempos “t” usando corante azul. . . . .	54

4.16 Foto que apresenta a entrada do fluido dentro do tubo de medida durante o escoamento com vazão de  $278 \times 10^{-3} \text{ l.s}^{-1}$ , em diferentes tempos “t” usando corante vermelho. . . . . 55

## LISTA DE TABELAS

3.1	Dados de Calibração do Rotâmetro . . . . .	27
3.2	Tabela dos pontos de operação . . . . .	30
4.1	Tabela de dados estatísticos da simulação do caso Simples e Média . . . .	39
4.2	Tabela de dados estatísticos da simulação do caso Simples e Média . . . .	43
4.3	Tabela de dados estatísticos da simulação usando pulsos quadrados . . . .	46
4.4	Tabela de dados estatísticos da simulação usando pulsos quadrados . . . .	48
4.5	Tempos de deslocamento $\tau$ , calculados pelo método Ponto a Ponto e Evolutivo no modo Direto . . . . .	51
4.6	Tempos de deslocamento $\tau$ , calculados pelo Método Ponto a Ponto e Evolutivo no modo Direto . . . . .	51
4.7	Tempos de deslocamento $\tau$ , calculados pelo Método Ponto a Ponto e Evolutivo no modo Direto . . . . .	52
4.8	Tempos de deslocamento $\tau$ , calculados pelo Método ponto a ponto e Evolutivo no modo Direto . . . . .	52
4.9	Tempos de deslocamento $\tau$ , calculados pelo Método ponto a ponto e Evolutivo no modo Direto . . . . .	52
4.10	Médias e desvíos padrões dos tempos de deslocamento $\tau$ , para cada valor de vazão medida . . . . .	53
4.11	Volumes calculados a partir dos tempos de retardo $\tau$ obtidos pelo método ponto a ponto, para cada média de vazão medida . . . . .	53
4.12	Volumes calculados a partir dos tempos de retardo $\tau$ obtidos pelo método evolutivo, para cada média de vazão medida . . . . .	53
4.13	Volumes medios calculados para as três primeiras vazões . . . . .	54

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Generalidades

Há 4.000 anos, os romanos já mediam o fluxo de água desde seus aquedutos até as instalações residenciais, e construía sistemas com área geométrica conhecida facilitando o processo de medir vazão usando um objeto que boiava entre dois pontos de distância conhecida. Os chineses fizeram as primeiras medidas de vazão de água salgada para controlar a quantidade de potes de salmoura a partir dos quais produziam o sal usado como tempero [1].

A medição de vazão tem evoluído, ao longo dos anos, em resposta às demandas de medidas de novos produtos ou de antigos, sob novas condições de fluxo, e para cumprir os requisitos de precisão cada vez mais exigentes.

Atualmente, na indústria, as metodologias para se medir vazão são muito importantes, porque a maioria dos processos produtivos está diretamente relacionada a essa medida. O ganho da produtividade bem como a qualidade dos produtos são respostas diretas da vazão, o que a torna uma das variáveis mais importantes a ser controlada, numa planta industrial.

A medição da vazão torna possível o controle de escoamentos que, por sua vez, está associado aos preços finais de produtos e serviços, por exemplo, o controle de combustíveis e de insumos em procedimentos realizados nas indústrias química e petrolífera. Desta forma, medir vazão com precisão torna-se necessário, para se determinar a quantidade de produto transportado, comercializado, tornando de vital importância seu conhecimento. Na indústria de petróleo, é imprescindível o uso de tubulações e dutos, em toda a cadeia produtiva, para transportar grandes volumes de óleo, sendo a eficiência e a manutenção desses oleodutos procedimentos de vital importância.

O Brasil tem um sistema com 586 dutos, para a movimentação do petróleo e seus derivados, distribuídos ao longo de 19,7 mil km de extensão, segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP) [2]. Em 2011, o petróleo e o gás natural produzidos no país foram transportados por esse sistema de dutos, proporcionando uma arrecadação de R\$ 13 bilhões, em “royalties”, R\$ 12,6 milhões em participação especial dos quais 1,03

bilhões foram destinados aos investimentos aplicados em instituições de pesquisa e de desenvolvimento, credenciadas pela ANP. Essa é uma das áreas mais importantes em que os medidores de vazão têm que ser aferidos com precisão.

Já que a variedade de métodos e a diversidade de instrumentos disponíveis para medir vazão, são bastante elevadas, a seleção do medidor de vazão adequado se torna uma tarefa difícil e complexa, geralmente, exigindo várias tentativas para se chegar à melhor escolha. Na Figura 1.1, são mostrados os medidores de quantidade e de vazão instantânea disponíveis no mercado [3].

Ao se optar pelo método ou instrumentos de medição, os parâmetros básicos a serem considerados, segundo UPP e LANASA [1], 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 e remoção, e calibração.

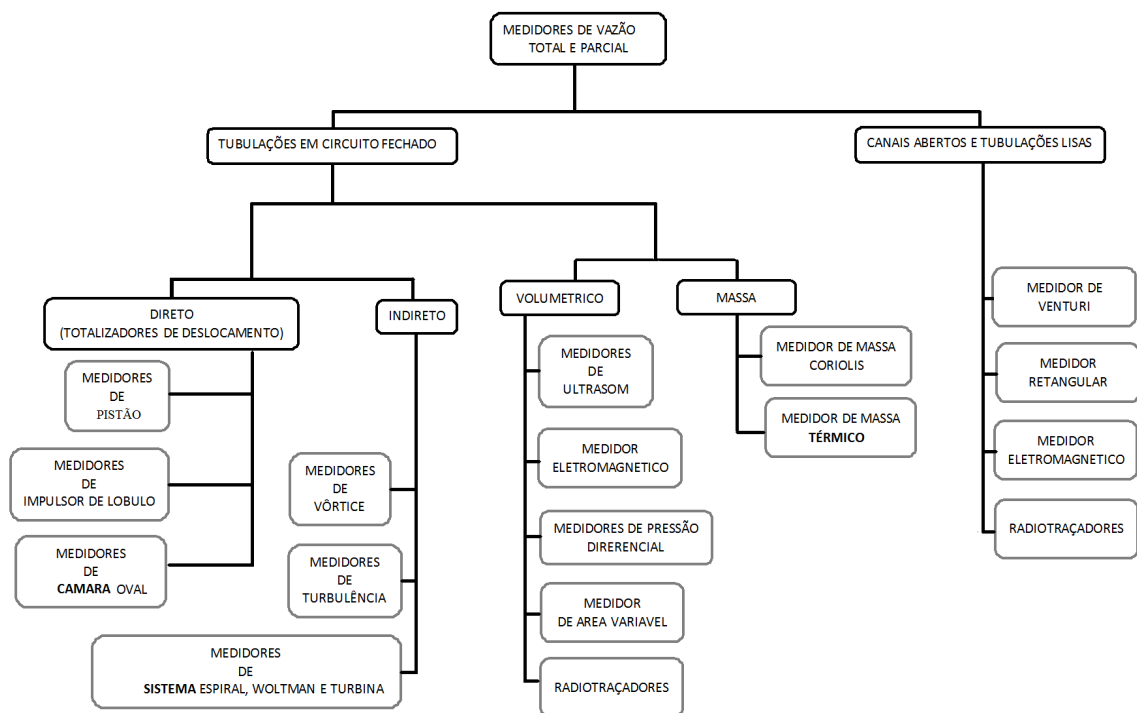


Figura 1.1: Medidores de vazão disponíveis no mercado

Em nenhuma das metodologias disponíveis, o medidor mais simples cumprirá com todas as características desejadas, mas em cada uma delas o instrumento pode ser avaliado pelos parâmetros de mérito daquele processo específico.

Existem métodos diferentes para se medir a vazão, tendo cada um suas características específicas, que deverão ser direcionadas, de forma a cumprir os requisitos individuais da instalação. Os medidores de vazão podem ser divididos, segundo RIBEIRO [4], em dois grandes grupos funcionais:

- Medidores de quantidade em volume
- Medidores de vazão instantânea

Em geral, as medições de vazão, em sistemas multifásicos, como, por exemplo, um composto de gás natural-petróleo-água, são feitas separadamente, utilizando-se vários medidores monofásicos, como os apresentados na Figura 1.1, Na realidade, são vários medidores contidos num único invólucro, tendo cada medidor seu princípio de funcionamento diferente, detectando e medindo cada uma das fases, como, por exemplo, medidores de turbina junto com os de placa de orifício. O equipamento de medição, em geral, é complexo e caro.

Uma das principais dificuldades ao se lidar com sistemas multifásicos refere-se ao pouco conhecimento das propriedades do fluxo. Por exemplo, num sistema gás-petróleo-água, usualmente, o gás e o líquido se deslocam com diferentes velocidades.

No Brasil para se medir vazão, os seguintes medidores estão aprovados pela ANP, segundo RIBEIRO [4]:

- Em sistemas contendo a mistura Óleo-Petróleo
  - i. Totalização direta da vazão com deslocamento positivo.
  - ii. Mássico tipo Coriolis.
  - iii. Ultra-sônico por tempo de trânsito, multifeixe.
- Em sistemas contendo Gás Natural
  - i. Medidor com placa de orifício.
  - ii. Turbina com eixo longitudinal.
  - iii. Ultra-sônico por tempo de trânsito, multifeixe.

Na indústria, tradicionalmente, a maioria dos métodos empregam instrumentos de medida em contato direto com o fluido e, em muitos casos, como o meio é geralmente muito corrosivo ou abrasivo, seus sensores precisam de manutenção e aferimento periódico. Para complicar esse problema, a esses instrumentos são acoplados equipamentos auxiliares, que requerem instalação e calibração, o que encarece e retarda todo o



processo. No entanto, os ensaios nucleares podem ser adequados à realização da medida de vazão em sistemas multifásicos, especialmente os que empregam radiotraçadores.

O emprego de radiotraçadores em inspeção não-destrutiva de processos constitui uma ferramenta com eficiência já comprovada, na indústria [5]. Das técnicas disponíveis para se medir vazão com radiotraçadores, as mais empregadas são:

- a. Distribuição de Tempos de Residência (RTD)
- b. Contagem Total
- c. Cross Correlation

O emprego de radiotraçadores pelas empresas, na medição da vazão de petróleo, mantém-se em segredo industrial. No Laboratório de Traçadores do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), metodologias foram desenvolvidas para se medir vazão em água, Contagem Total em Sistemas Abertos, [6]; gás, Produção de Radiotraçador Gasoso CH382BR, [7]; e petróleo, Medidas de Atividade Total de Amostras de Óleo Marcado com Au-198, [8]. No momento, se pesquisa o emprego da técnica conhecida como “Cross Correlation”, que consiste em determinar o tempo durante o qual uma perturbação leva para passar entre dois pontos afastados, ao longo do escoamento, onde se posicionam medidores.

Os medidores de vazão empregados 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 um Programa Computacional (software), que determina a função de “Cross Correlation”. A grande vantagem de se empregar a metodologia de cálculo desta função “Cross Correlation” é por se tratar de um método absoluto que não precisa de calibração. Além disso, esse método proporciona: a) um tempo de resposta muito rápido, o que permite medir vazões instantâneas; b) a utilização de radiotraçadores ou de fontes externas de baixa atividade; baixos custos de instalação e manutenção.

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.

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.

Desta forma o presente trabalho trata de avaliar os diferentes métodos de “Cross Correlation” para medir vazão instantânea em água.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia para medir vazão instantânea numa tubulação de escoamento da água, baseada no cálculo da função “Cross Correlation”.

Para tal, será necessária a realização das seguintes etapas:

- i. Estudo dos métodos de cálculo da função de “Cross Correlation”.
- ii. Estabelecimento dos parâmetros geométricos de medida.
- iii. Desenvolvimento de um correlator apropriado para o cálculo a função de “Cross Correlation”.
- iv. Testes de validação do correlator com dados teóricos.
- v. Testes de validação do correlator com dados experimentais.

## 1.3 Revisão bibliográfica

No campo da Estatística, a função “Cross Correlation” tem sido usada, há muito tempo, para estimar relações causa-efeito entre dois conjuntos de dados.

O emprego da metodologia que utiliza a função “Cross Correlation” é mais indicado em sistemas onde se requer determinar tempos de retardo para medir velocidades de escoamento tanto de fluidos quanto de materiais sólidos.

Os métodos para se determinar a vazão, baseados na medição do tempo de trânsito de alguma perturbação entre dois pontos, tem sido aplicados, desde os anos 1950, segundo BECK e PLASKOWSKI [9].

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.

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, segundo BECK e PLASKOWSKI [9].

Em 1969, a teoria básica do método que emprega a função “Cross Correlation” para medir vazão, usando o ruído natural no escoamento, foi apresentada por Beck em sua tese de doutorado, [9].

No ano de 1970, Abeysekera e Beck desenvolveram um sistema para medir a velocidade média de escoamento de água, entre dois pontos de uma tubulação, a partir da mudança de temperaturas entre eles. O tempo de retardo é determinado a partir da medida da função “Cross Correlation” calculada entre os dois pontos. 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 varie de 1Hz a 5Hz.

Em 1973, Coulthard usou transdutores de ultrassom para medir por “cross correlation” a vazão de um sistema bifásico líquido-gás.

Em 1975, Ong fez uma aplicação estendida dos transdutores de ultrassom para medir a vazão de líquidos e lamas em tubulações. Estes sistemas baseados em ultrassom apresentam um problema deve-se ajustar a frequência transmitida do ultrassom para calcular a função de “cross correlation” adequadamente.

Em 1982, Lassahn e Baker desenvolveram um método para estimar a incerteza na localização do pico do “cross correlation” quando é usado para determinar 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” foi feito por transformada de Fourier.

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 esta data. No texto os autores apresentam três modos de cálculo da função de “cross correlation”: *Modo*

*Normal, Modo Relay e Modo Polar.*

No ano 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 antigo micoprocessador Z-80.

Em 1997, Yang e Beck propuseram um correlacionador inteligente (intelligent cross correlator) para medir a velocidade de escoamento do fluido em uma tubulação. O correlacionador funciona no modo Polar devido sua simplicidade, mas ao custo da perda de informação comparado como modo Directo de operação. O sistema faz a escolha automática do tipo de detector, frequência de amostragem e pré-retardo.

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

Em 2005, Shafiza e Ghani apresentaram um trabalho chamado: técnicas de otimização no cálculo do tempo de retardo a partir da função de “cross correlation”. Nesse trabalho foi apresentada uma nova técnica chamada transformada de Hilbert da “Fast Fourier Transform” (FFT), para melhorar a precisão na estimativa do tempo de retardo por “Cross Correlation”.

Em 2013, Gajewski apresenta uma estimativa da precisão da medição de vazão em sistemas sólido-gás no qual são usadas partículas carregadas e detectadas por sensores de indução eletromagnética.

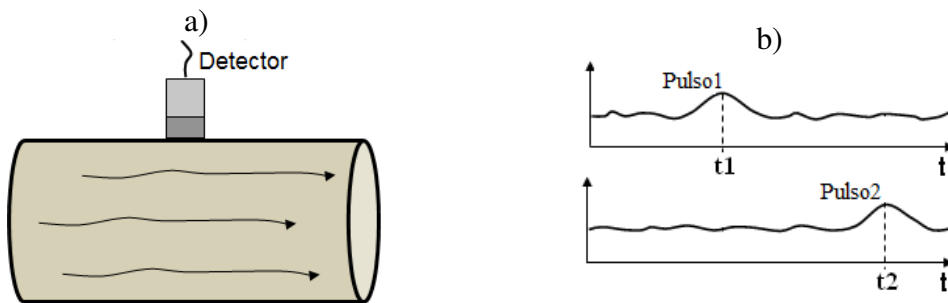
# CAPÍTULO 2

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

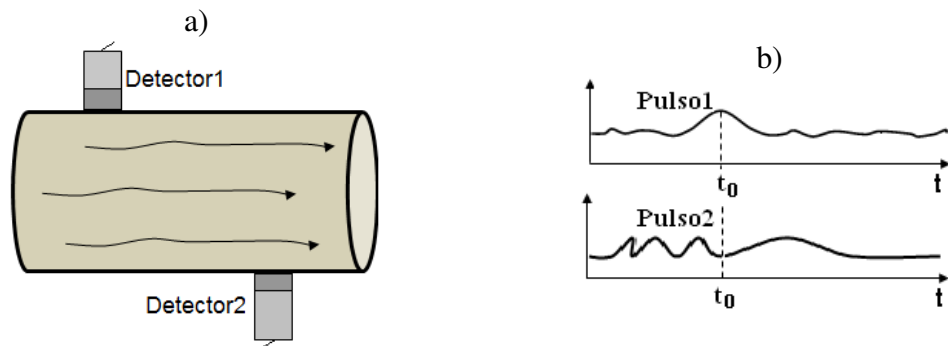
### 2.1 Função de cross correlation

Antes de definir a função de Correlação, deve-se compreender o significado do termo correlação, que pode variar em função de seu uso ou aplicação, mas na dinâmica dos fluidos três são importantes:

- i **Autocorrelação:** Representa a relação entre dois sinais medidos num mesmo ponto do espaço em dois intervalos de tempo diferentes.



- ii **Correlação espacial:** Refere-se à relação entre dois sinais medidos em dois pontos diferentes do espaço no mesmo intervalo de tempo.



- iii **Correlação espaço temporal:** Refere-se à relação entre dois sinais medidos em dois pontos diferentes do espaço e em dois intervalos de tempo diferentes. Esta

correlação é conhecida normalmente como “*Cross Correlation*”.

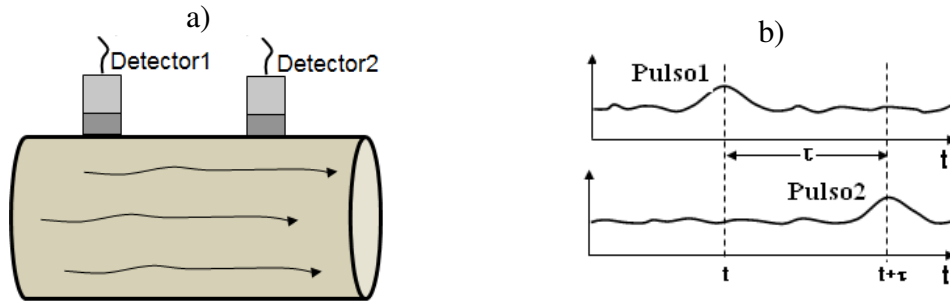


Figura 2.3: a) Posição dos sensores. b) Pulsos em cada detector no instante  $t_1$  e  $t_2$

A função de “*Cross Correlation*” entre dois conjuntos de dados aleatórios descreve a dependência geral de um conjunto em relação ao outro.  $x(t)$  é o conjunto de dados no instante “ $t$ ”, e  $y(t)$  é o conjunto de dados no instante  $(t + \tau)$ , então a função de “*cross correlation*” pode ser calculada a partir da integral da convolução dos dois conjuntos de dados num intervalo de tempo de observação “ $T$ ” dada pela expressão de BECK e PLASKOWSKI [9]:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau) dt \quad (2.1)$$

onde  $\tau$  é o tempo de retardo entre os dois sinais.

A função,  $R_{xy}(\tau)$ , tem as seguintes características:

- pertence ao domínio dos números reais  $\Re$
- pode ser positiva ou negativa
- não necessariamente tem um máximo no instante de tempo  $\tau = 0$

Se  $x(t)$  e  $y(t)$  são independentes e suas médias aritméticas,  $\mu_x = 0$  e  $\mu_y = 0$ , então a média da função de “*Cross Correlation*” também será nula [9]:

$$\mu(R_{xy}(\tau)) = 0 \quad (2.2)$$

Por outro lado, quando as médias de  $x(t)$  e  $y(t)$  não são nulas, ou seja dependentes, a média da função de correlação  $R_{xy}(\tau)$ , é:

$$\mu(R_{xy}(\tau)) = \mu_x \cdot \mu_y \quad (2.3)$$

Se invés de considerar os valores  $x(t)$  e  $y(t)$ , são consideradas as diferenças de cada em relação à suas medias,  $x(t) - \mu_x$  e  $y(t) - \mu_y$ , então podem ser definidas as covariâncias  $C_x, C_y, C_{xy}$ :

$$C_x(\tau) = R_{xx}(\tau) - \mu_x^2 \quad (2.4)$$

$$C_y(\tau) = R_{yy}(\tau) - \mu_y^2 \quad (2.5)$$

$$C_{xy}(\tau) = R_{xy}(\tau) - \mu_x \mu_y \quad (2.6)$$

Como “ $R_{xy}(\tau)$ ” é uma distribuição de probabilidades o mais comum é que esteja normalizada por isso a partir das covariâncias pode-se definir para qualquer intervalo de tempo “ $\tau$ ”, o coeficiente de “cross covariance” normalizado como, [9]:

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{C_{xy}(\tau)}{\sqrt{C_x(0)C_y(0)}} \quad (2.7)$$

como 2.7, é uma função normalizada sempre se cumpre que:

$$-1 \leq \rho_{xy}(\tau) \leq 1 \quad (2.8)$$

No caso em que as médias  $\mu_x$  e  $\mu_y$  sejam nulas, então  $\rho_{xy}(\tau)$  se transforma em [9]:

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)}} \quad (2.9)$$

Onde:

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

Na figura 2.4 é apresentado um gráfico típico da função de “Cross Correlation”.

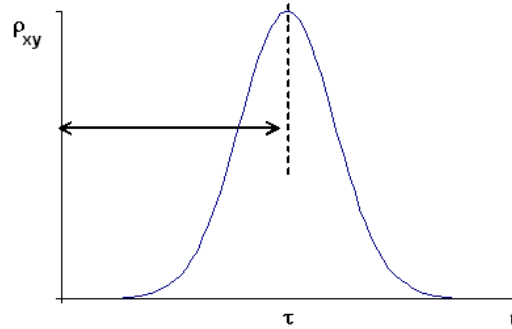


Figura 2.4: Gráfico típico da função de “Cross Correlation”

Uma das maiores vantagens de usar o método de “Cross Correlation” é que qualquer sinal de ruído ou interferência no sistema é recusado. Este processo de rejeição do sinal de ruído pode ser considerado com mais detalhe. Se o sinal medido,  $y(t)$ , é igual à soma do sinal desejado,  $y'(t)$  (livre de ruído) mais um sinal de interferência, não desejado,  $z(t)$ , é dizer:

$$y(t) = y'(t) + z(t) \quad (2.10)$$

Substituindo na equação de “Cross Correlation”, fornece:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t - \tau)[y'(t) + z(t)] dt \quad (2.11)$$

Essa última integral pode ser dividida em duas, obtendo-se:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t - \tau)y'(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T x(t - \tau)z(t) dt \quad (2.12)$$



A segunda integral representa a função de “Cross Correlation” entre o sinal de entrada  $x(t)$  e o sinal de ruído  $z(t)$ . Como os dois sinais são independentes essa integral é nula.

## 2.2 Métodos de cálculo da função “Cross Correlation”

Teoricamente a função de “Cross Correlation” pode ser calculada pelas seguintes equações:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t - \tau)y(t) dt \quad (2.13)$$

ou

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau) dt \quad (2.14)$$

Enquanto que na prática como a equação 2.13 ou 2.13 são calculadas pelo correlator que é um sistema digital por isso esta equação tem que ser modificada por uma forma mais simples e discreta como é apresentada a continuação [9]:

$$R_{xy}(j\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n y_{n+j} \quad j=0,1,2,\dots,J \quad (2.15)$$

Onde:

$N$ : é o número total de dados

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

$$x_n = x(n\Delta t)$$

$$y_n = y(n\Delta t)$$

$\Delta t$ : é o intervalo de tempo entre contagens

A solução da equação 2.15, pode ser obtida por dois métodos:

- **Método Ponto a Ponto**

Este método é chamado ponto a ponto porque cada um dos pontos do gráfico é calculado de um em um [9]. Com esta metodologia é preciso determinar a posição do pico só e não o valor da grandeza. Por essa razão a equação 2.15 é separada como um conjunto de equações individuais:

$$\begin{aligned}
 R_{xy}(0) &= x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 + \dots + x_Ny_N \\
 R_{xy}(\Delta t) &= x_1y_2 + x_2y_3 + x_3y_4 + \dots + x_Ny_{N+1} \\
 R_{xy}(2\Delta t) &= x_1y_3 + x_2y_4 + x_3y_5 + \dots + x_Ny_{N+2} \\
 &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\
 R_{xy}(j\Delta t) &= x_1y_{j+1} + x_2y_{j+2} + x_3y_{j+3} + \dots + x_Ny_{N+j}
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

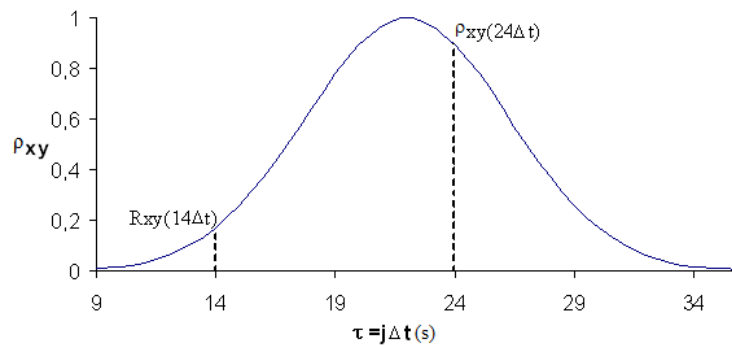


Figura 2.5: Gráfico da função obtido pelo método Ponto a Ponto

- **Método Evolutivo**

Para realizar o cálculo por este método a equação 2.16, é reordenada da maneira seguinte [9]:

$$R_{xy}(j\Delta t) = x_1 \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_j \end{bmatrix} + x_2 \begin{bmatrix} y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ \vdots \\ y_{j+1} \end{bmatrix} + \dots + x_N \begin{bmatrix} y_N \\ y_{N+2} \\ y_{N+3} \\ \vdots \\ y_{N+J} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

*Primeira Evolução*
*Segunda Evolução*

Por este método o termo seguinte é obtido somando o termo anterior. A amplitude do coeficiente de “Cross Correlation”, “ $\rho$ ”, como é apresentado na Figura 2.6 é maior com cada evolução e ao final o resultado é o mesmo que com o método Ponto a Ponto. Um aspecto importante de usar este método é que pode-se avaliar de qual é o tempo de retardo com poucas evoluções, mas a interteza da medição é maior porque o número de dados envolvidos para o cálculo é menor.

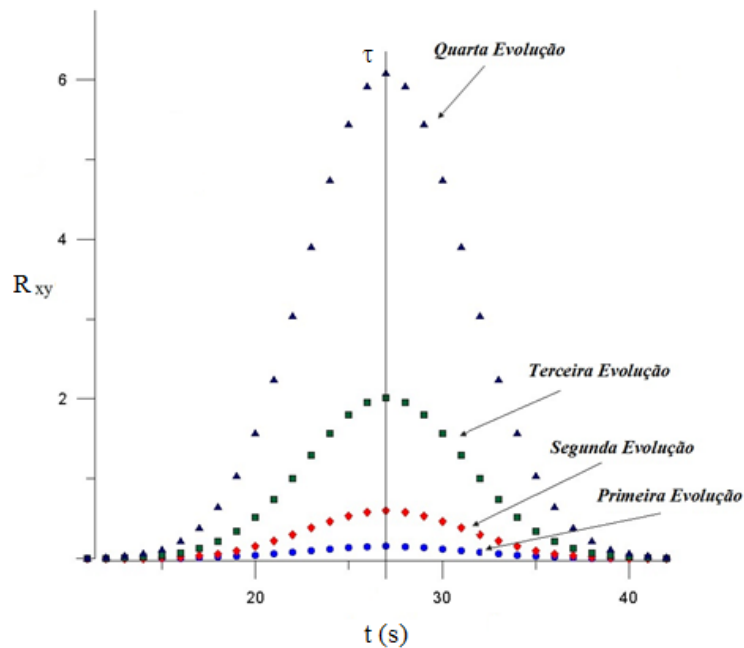


Figura 2.6: Gráfico da função de “Cross Correlation” calculada pelo Método Evolutivo.

### 2.3 Modos de operação

Os métodos, Ponto a Ponto e Evolutivo, podem trabalhar em três modos de operação: *Direto*, *Relay* ou *Polar*, para quantificar a amplitude do sinal. O funcionamento do correlator em qualquer um desses três modos pode ter uma grande influência tanto no tempo de cálculo quanto no custo do dispositivo, além da incerteza na determinação do tempo de retardo.

a) **Modo Direto:** Os sinais de cada detector são usados pelo “cross correlator” em forma analoga para calcular a função de “cross correlation” de acordo a equação:

$$R_{xy}(j\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n y_{n+j} \quad (2.18)$$

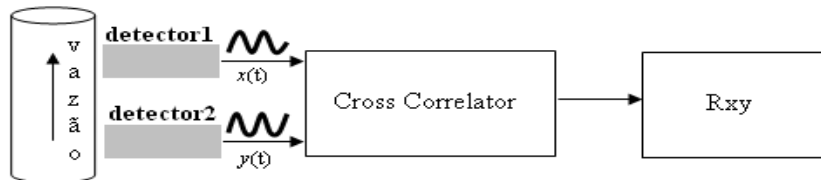


Figura 2.7: Representação esquemática do Modo Direto

b) **Modo Relay:** Neste caso um sinal entra no correlator em forma analoga e o outro entra em binário. O sinal é transformado em binário com relação à sua média usando a função signo, “sgn”. Se a diferença do sinal menos sua média é maior que zero seu valor é “1” e se é menor é “-1”. O correlator calcula a função de “Cross Correlation” por meio da equação:

$$R_{xy}(j\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{sgn}(x_n) y_{n+j} \quad (2.19)$$

Onde:

$$\text{sgn}(x_n) = 1 \quad \text{se } x_n - \bar{x} > 0$$

$$\text{sgn}(x_n) = -1 \quad \text{se } x_n - \bar{x} < 0$$

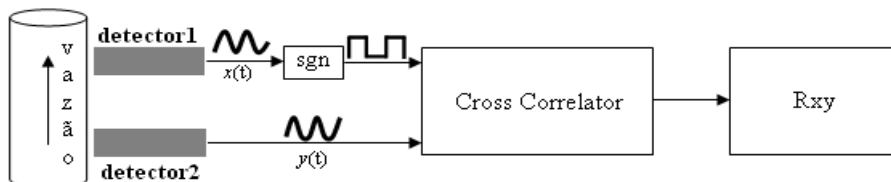


Figura 2.8: Rrepresentação esquemática do Modo Relay

c) **Modo Polar** Neste caso cada sinal entra no “cross correlator” em binário e calcula a função de “Cross Correlation” de acordo com a equação:

$$R_{xy}(j\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{sgn } x_n \text{sgn } y_{n+j} \quad (2.20)$$

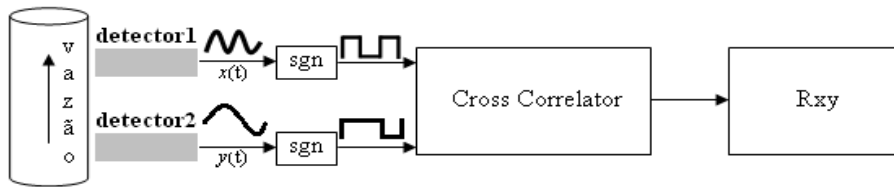


Figura 2.9: Representação esquematica do Modo Polar

## 2.4 Medida de Vazão usando o Método de “Cross Correlation”

Para entender como medir vazão por “Cross Correlation” é bom revisar dois modelos básicos de fluxo: pistão e difusão [5, 10, 11].

### 2.4.1 Modelo Fluxo Pistão

Consiste no movimento de um padrão sem distorção entre dois detectores 1 e 2, localizados axialmente ao longo de uma tubulação e afastados um comprimento “L” por onde está escoando um fluido como mostrado na Figura 2.10. O padrão a ser observado pode ser qualquer propriedade física medível como, temperatura, pressão, condutividade elétrica, atividade radioativa, etc. Os detectores dependem do parâmetro físico a ser medido, mas o mais importante é que o princípio do método se mantém.

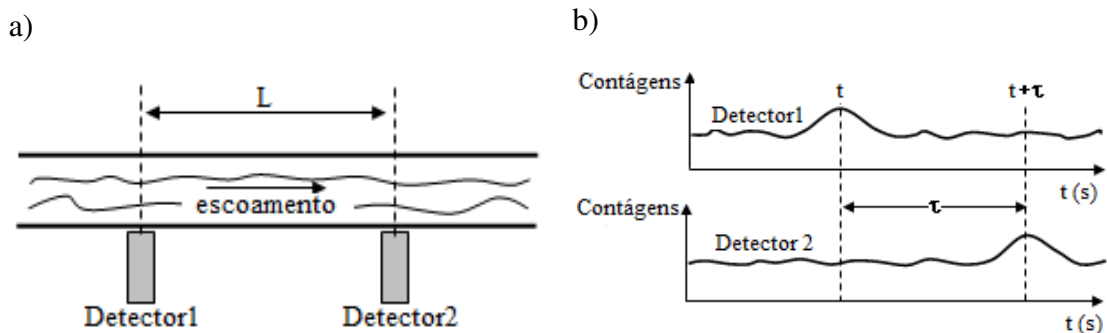


Figura 2.10: a) Geometria para medir a vazão por “Cross Correlation”. b) Sinal no detector 1 e no detector 2, respectivamente.

O método da função de “cross correlation” para medir vazão está baseado na

determinação do tempo de retardo do sinal entre os dois detectores<sup>1</sup>.  $x(0, t)$ , é o sinal no detector 1, e  $y(L, t)$ , é o sinal medido no detector 2. Se o tempo que demora o fluido em passar pelo detector 1 e o detector 2 é,  $\tau$ , então,  $x(0, t)$  e  $y(L, t)$  podem-se relacionar pela equação:

$$y(L, t) = x(0, t - \tau) \quad (2.21)$$

A função de “Cross Correlation”  $R_{xy}(L, \tau)$  entre  $x(0, t)$  e  $y(L, t)$  está dada pela relação, [9]:

$$R_{xy}(L, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(0, t - \tau) y(L, t) dt \quad (2.22)$$

A função  $R_{xy}(L, t)$  terá um valor máximo quando o tempo de retardo “ $\tau$ ”, for igual ao tempo de trânsito “ $\tau'$ ” que é o tempo de deslocamento do sinal do primeiro detector em relação ao segundo. Assim a velocidade do fluido pode ser calculada por:

$$v = \frac{L}{\tau'} \quad (2.23)$$

onde:

$L$ : separação entre os detectores,

$\tau'$ : 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 simplesmente a partir da relação:

$$Q = vA \quad (2.24)$$

Onde:

$v$ : velocidade,

---

<sup>1</sup>As amplitudes dos sinais nos detectores estão directamente relacionados com os valores instantâneos dos parâmetros a medir nos detectores 1 e 2 respectivamente.

A: seção transversal do tubo.

Em escoamentos reais, os padrões de fluxo podem mudar entre os dois detectores. Como a técnica de “Cross Correlation” está baseada na semelhança entre os sinais nos detectores, na prática os detectores não podem estar muito afastados entre si porque a semelhança entre os sinais vai mudando gradualmente com a distância “ $L$ ” entre eles.

Por exemplo, se a velocidade não é uniforme, então para calcular a vazão tem-se que mudar a equação 2.24 pelo seguinte modelo segundo BECK [12]:

$$Q = \frac{kLA}{\tau'} \quad (2.25)$$

onde:

$k$ : fator de calibração,

$L$ : separação dos detectores,

$A$ : seção transversal da tubulação, e

$\tau'$  tempo de retardo medido.

Outra forma de ilustrar o fluxo pistão é supor que  $x(t)$  e  $y(t)$  são os sinais de entrada e saída de um sistema linear  $h(t)$ , Figura 2.26 que só introduz um impulso de retardo “ $\tau'$ ” entre eles

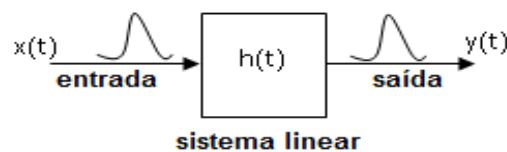


Figura 2.11: Sinais de entrada e saída de um sistema linear deslocados por um impulso “ $\tau'$ ”

$$h(t) = \delta(t - \tau') \quad (2.26)$$

Como a função de autocorrelação “ $R_{xx}$ ” e a de “Cross Correlation” “ $R_{xy}$ ” estão relacionadas pela equação 2.27:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau - \tau') h(t) dt \quad (2.27)$$

Dáí finalmente obtén-se:

$$R_{xy}(\tau) = R_{xx}(\tau - \tau') \quad (2.28)$$

A função de “Cross Correlation” é igual à função de autocorrelação quando  $\tau = \tau'$ . Por isso o tempo de retardo  $\tau'$ , pode ser determinado a partir do valor máximo da função de “Cross correlation”.

## 2.4.2 Modelo Difusão

Nos escoamentos reais, os padrões de fluxo mudam entre um sensor e outro. A semelhança entre os sinais diminui com o aumento da distância entre os detectores [13]. A diferença nos sinais medidos nos detectores é o resultado de processos como a turbulência dentro da tubulação que, neste modelo pode ser representada agregando um sinal de ruído  $n(t)$  na posição do segundo detector. Geralmente no modelo de dispersão os processos de mistura nos sistemas são estudados considerando-se a dispersão de um traçador no meio. A equação que descreve este tipo de sistemas é a de balanço de massa para o traçador, equação 2.29, [13, 14].

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u\nabla c = \nabla(D_s \nabla c) + R + S \quad (2.29)$$

Onde:

$c$ : concentração do traçador,

$u$ : velocidade do fluido,

$D_s$ : coeficiente de difusão,

$R$ : taxa de consumo (rapidez na qual o traçador é consumido dentro do sistema),

$S$ : taxa de geração (rapidez a que é inserido o traçador ao sistema no caso de injeção continua).

A solução da equação de balanço de massa a uma entrada tipo impulso é a função resposta de impulso  $h_D(t)$  mostrada na Figura 2.12 e que está dada pela equação 2.30.

$$h_D(t) = \frac{L}{2\sqrt{\pi D_s t^3}} e^{\left[-\frac{(t-\tau')^2}{4t(D_s/u^2)}\right]} \quad (2.30)$$



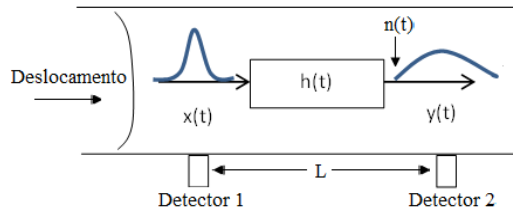


Figura 2.12: Sistema de Impulso de Difusão

Por outro lado, para o coeficiente de difusão “ $D_s$ ” tem-se o seguinte:

- Um valor grande de “ $D_s$ ” indica difusão rápida do traçador
- Um valor pequeno de “ $D_s$ ” indica difusão lenta
- “ $D_s = 0$ ” indica que não tem difusão, trata-se de um fluxo pistão.

Inserindo a equação 2.30 na equação 2.27 é possível calcular a função de “Cross Correlation” e a partir dela determina-se o tempo de retardo “ $\tau$ ” que permite determinar a velocidade média de deslocamento “ $v$ ” com a qual finalmente é calculada a vazão “ $Q$ ”.

## 2.5 Sistema de Cálculo da Função de “Cross Correlation”

Os sistemas compostos pelo hardware e software dedicados ao cálculo da função de “Cross Correlation”, a partir equação 2.1, são conhecidos como “cross correlators” ou simplesmente como “correlators”. O algoritmo básico para medir vazão pela função de “Cross Correlation” é mostrado no diagrama em bloco Figura 2.13.

## 2.6 Estatística para a Avaliação da Distribuição da Função de “Cross Correlation”

O procedimento estatístico para avaliar o grau de distanciamento de uma distribuição randômica,  $F(x)$ , é conhecido como teste de grau de “normalidade” e tem como padrão a distribuição Normal ou Gaussiana. Se a população segue o padrão da distribuição Normal a sua função de distribuição de densidade é dada por:

$$G(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.31)$$

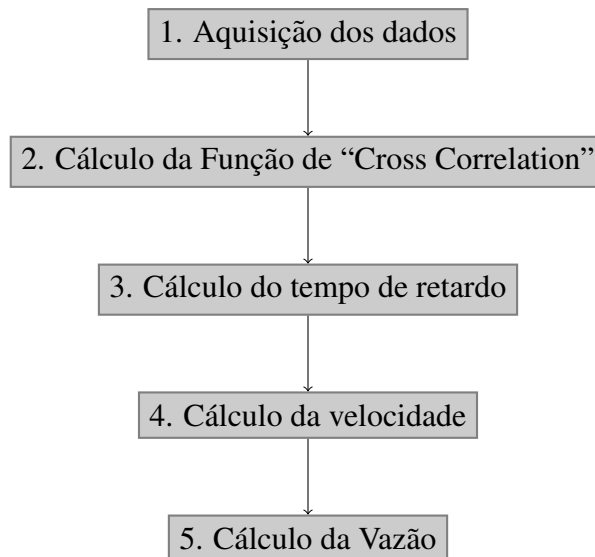


Figura 2.13: Diagrama em bloco de um “Cross Correlator”

onde:

$\mu$  : é a média (momento estatístico de ordem 1, M1, em torno da origem),

$\sigma$  : é a dispersão (momento estatístico de ordem 2, M2, em torno da média).

Para avaliar o grau de distanciamento de uma distribuição normal calcula-se os momentos de ordem três, M3, e quatro, M4, em torno da média, que fornecem respectivamente o coeficiente de assimetria e a curtose (curvatura) da distribuição. Se F(x) for uma distribuição randômica , tem-se:

$$M1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.32)$$

$$M2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - M1)^2 \quad (2.33)$$

$$M3 = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_i - M1}{\sigma_x} \right)^3 \quad (2.34)$$

$$M4 = \frac{N(N+1)}{(N-1)(N-2)(N-3)} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_i - \mu_x}{\sigma_x} \right)^4 - \frac{3(N-1)^2}{(N-2)(N-3)} \quad (2.35)$$

Onde:

N é o número total de dados.

$$\sigma_x = \sqrt{M2}.$$

Quando a distribuição é Normal  $M3 = 0$  e  $M4 = 3$  e para uma distribuição qualquer seu padrão pode ser avaliado pelo distanciamento desses momentos do padrão da

distribuição Normal conforme mostrado na figura 2.14.

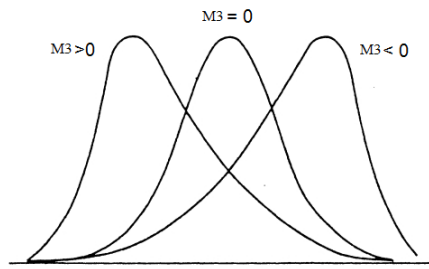


Figura 2.14: Grafico das Assimetrias

Para o coeficiente de assimetria tem-se:

- Quando  $M3 = 0$  a distribuição de frequência é simétrica em torno da média, distribuição Normal,
- Quando  $M3 < 0$  a distribuição é assimétrica com inclinação (cauda) para a esquerda,
- Quando  $M3 > 0$  a distribuição é assimétrica com inclinação (cauda) para a direita.

Segundo a Figura 2.15 para o coeficiente de curvatura (curtose) tem-se:

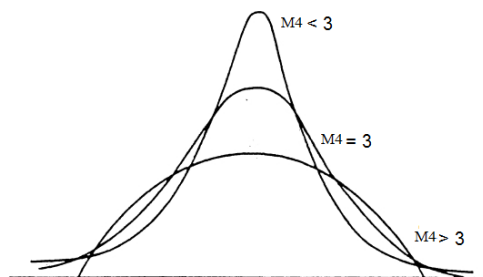


Figura 2.15: Grafico das Curtoses

- Quando  $M4 = 3$ , a distribuição de frequência é a distribuição Normal,
- Quando  $M4 < 3$  a distribuição é “achatada”,
- Quando  $M4 > 3$  a distribuição é mais estreita em torno da média.

Se a distribuição da função “Cross Correlation” for do tipo unimodal (um único pico de máximo) seguir o padrão Nomal,  $M3 = 0$  e  $M4 = 3$ , o pico de máximo tende a coincidir com o com o centro da distribuição, neste caso o valor para o tempo de retardo e sua incerteza associada é igual a  $M1$  e  $M2$  respectivamente.

Para distribuições bimodais (dois ou mais picos) ou quando  $M3 \neq 0$  e  $M4 \neq 3$ , e o tempo de retardo entre os sinais dos detectores é medido considerando-se o valor de tempo corespondente ao valor do máximo da função de “Cross Correlation”.

## **2.7 Distribuição do Tempo de Residência (RTD)**

Outra metodologia usada para estudos de escoamentos de fluidos em unidades industriais é a de Distribuição do Tempo de Residência (RTD). Padrões de escoamento complexos podem ser monitorados quando a técnica de traçadores é associada a um formalismo estatístico que considera o comportamento do material marcado ao se deslocar pela unidade e definindo um conjunto de funções de densidade de probabilidade para o tempo de permanência do fluido no interior da unidade [14].

Os processos complexos que ocorrem no interior das unidades alteram muito o sinal de entrada do traçador, geralmente são considerados dois modelos básicoque descrevem com limitações o comportamento do fluido:

- Misturador perfeito,
- Fluxo pistão

A técnica da RTD considera que cada elemento do traçador ao percorrer a unidade possui a sua “historia”, que é o tempo de permanência no interior da unidade e definido em termos estatísticos como uma função de probabilidade (função idade).

### **2.7.1 Função Distribuição do Tempo de Residência**

As definições das funções RTD foram feitas por DANCKWERTS [15], e fornecem informações sobre o comportamento estatístico das frações do traçador ao interagir com o sistema naquele volume.

O “Tempo de Residência” é definido como o intervalo de tempo entre a entrada e a saída de um elemento de volume e a “Idade” é o tempo transcorrido desde a entrada à unidade desse elemento de volume num dado instante de tempo “ $t$ ”. Da definição tem-se

que, Idade, é o tempo de residência. É a média das idades de todas as partículas ao interagir com o sistema.

Por exemplo, a concentração do traçador  $c(t)$ , no instante de tempo  $t$ , num meio é diretamente proporcional à taxa de contagem registrada no detector, então para um sistema calibrado e estável pode-se calcular a taxa de contagem  $C(t)$ , a partir de  $c(t)$ . É necessário conhecer a concentração do traçador no meio para fazer uma calibração de todo o conjunto.

Para um sistema com um volume “ $V$ ” e através do qual desloca-se um fluido com vazão “ $Q$ ” onde foi injetado um sinal de material marcado com as mesmas características hidrodinâmicas, define-se:

- **Função de Distribuição da Idade Interna  $I(t)$ :** representa a distribuição da idade de elementos dentro da unidade, é a fração de traçador no interior do sistema com idade entre “ $t$ ” e “ $t + dt$ ”.

$$\int_0^{\infty} I(t) dt = 1 \quad (2.36)$$

- **Função Distribuição do Tempo de Residência  $E(t)$ :** Também conhecida como distribuição de frequências da idade do fluido e representa a fração de material que passou pela unidade no intervalo de tempo “ $t$ ” e “ $t + dt$ ”.

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad (2.37)$$

- **Função Acumulativa do Tempo de Residência  $F(t)$ :** Representa a fração total de material que passou pela unidade no intervalo de tempo “ $t$ ” e “ $t + dt$ ”, assim no instante  $t = 0$  da injeção, nenhum material marcado percorreu a unidade e no final do processo todo o material marcado pode ter sido transportado para fora da unidade ou então, parte dele permaneceu no interior da unidade. Pela definição tem-se:

$$F(0) = 0 \quad (2.38)$$

$$F(\infty) = 1 \quad (2.39)$$

- **Tempo Médio de Residência:** Em um sistema com volume total “ $V$ ”, para uma porção de material marcado movendo-se pelo seu interior com vazão “ $Q$ ”, define-se o tempo médio de residência como o tempo médio gasto pelo traçador para percorrer a unidade e por meio da equação 2.40 obtém-se  $\tau$

$$\tau = \int_{t_i}^{t_f} t E(t) dt = \int_{t_i}^{t_f} t I(t) dt \quad (2.40)$$

onde:

$t_i$ : início do processo,

$t_f$ : final do processo

Assim medindo-se o tempo de residência  $\tau$ , e conhecendo-se a geometria de medição é possível obter a vazão do sistema:

$$Q = \frac{V}{\tau} \quad (2.41)$$

## 2.8 Cálculo da Função de Distribuição $E(t)$

A técnica estímulo/resposta é usada para medir experimentalmente as curvas de distribuição de idades  $E(t)$ .

A técnica consiste em injetar uma quantidade de traçador na entrada do sistema e logo são obtidas as curvas de  $E(t)$ , a partir da variação da atividade do material marcado dentro do sistema, [14].

Qualquer tipo de sinal pode ser usado, mas o usual é um pulso rápido e este consiste em injetar no sistema num período de tempo muito curto uma quantidade de traçador. Para cada instante de tempo " $t_i$ " é registrado uma concentração  $C_i(t)$ . A curva  $E(t)$  define-se:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_{t_i}^{t_f} C(t) dt} \quad (2.42)$$

Logo da definição do momento associado a uma função de distribuição,  $M(k)$ , é calculado o tempo médio de residência a partir do primeiro momento,  $M_1(S)$  e a incerteza da medida  $s^2$ , a partir do segundo momento,  $M_2(S)$ , [14]:

$$M_1(S=0) = \frac{\int_0^{\infty} t h(t) dt}{\int_0^{\infty} h(t) dt} = \tau \quad (2.43)$$

$$M_2(S=0) = \frac{\int_0^{\infty} (t - \tau)^2 h(t) dt}{\int_0^{\infty} h(t) dt} = s^2 \quad (2.44)$$

Neste caso considerando-se que o comprimento entre os detectores é “L” e que a seção reta do tubo é “A” então a vazão é dada por:

$$Q = \frac{A.L}{\tau} \quad (2.45)$$

$$Q = \frac{A.L}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{A.L}{(M_1det_2 - M_1det_1)} \quad (2.46)$$

E para este caso a incerteza padrão combinada da vazão é dada por:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \sqrt{\left[ \frac{(\Delta A)^2}{A^2} + \frac{(\Delta L)^2}{L^2} + \left( \frac{\Delta \tau_1}{\tau_1} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \tau_2}{\tau_2} \right)^2 \right]} \quad (2.47)$$

Na metodologia de RTD sempre apresentam-se os seguintes problemas:

- Devido ao processo de deslocamento do traçador no meio há sempre um efeito de cauda associado e se faz mais evidente quando existem zonas de estagnação, [14].
- A radiação de fundo das curvas experimentais têm que ser subtraída e dependendo da qualidade desse processo o tempo de residência vai ser afetado.
- O procedimento de injeção do traçador tem que ser o mais perfeito possível porque a incerteza da medida depende dos segundos momentos estatísticos.

# CAPÍTULO 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Linha de Transporte de Água

O desenvolvimento desta pesquisa utiliza um sistema controlado de transporte de água. Este sistema consiste de um reservatório de água de 1000 l, montado sobre uma plataforma de 3 m de altura. O reservatório está acoplado a uma tubulação de Cloreto de Polivinila (PVC) de 3/4". A linha tem um comprimento horizontal de 12 m e o sistema de detecção está instalado na parte vertical da linha. Abaixo do reservatório na vertical da linha está instalado um medidor de vazão tipo rotâmetro Marca Krohne, modelo 440, conforme mostrado na Figura 3.1, cujas especificações estão indicadas na Tabela 3.1



Figura 3.1: a) Rotâmetro usado nos testes experimentais. b) Linha de Transporte

Escala(l/h)	Padrão(Nl/h)	Real(Nl/h)	Desvio %
130	130	135	+0,38
200	200	204	+0,31
400	400	403	+0,23
800	800	795	-0,38
1200	1200	1197	-0,23
1300	1300	1304	+0,31

Tabela 3.1: Dados de Calibração do Rotâmetro



## 3.2 Sistema de Detecção da Radiação

O radiotraçador é injetado na linha, Figura 3.3, é medido por dois detectores de NaI(Tl) de 1"x1" que estão interligados a um conjunto eletrônico Nuclear Instrument Module (NIM) através de cabos coaxiais segundo o diagrama em bloco da Figura 3.2:

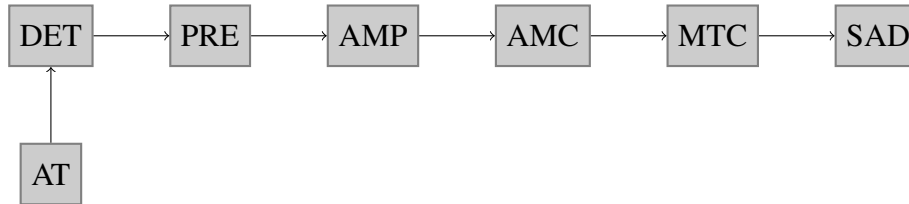


Figura 3.2: Diagrama em bloco dos módulos eletrônicos para o registro do sinal de cada detector

onde:

- DET: Detetor cintilador de NaI(Tl) 1"x1" marca HARSHAW modelo Integral Line
- AT: Fonte de alta tensão Marca Micronal modelo 1023
- PRE: 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
- SAD: Sistema de aquisição de dados: microcomputador e placa conversora ADC
- OSC: Osciloscópio digital Marca RIGOL modelo DS1202CA



Figura 3.3: Ponto de Injeção do Radiotraçador na Linha de Água.

Cada conjunto é calibrado para registrar o sinal de cada detector em uma posição definida. Como se precisa avaliar o deslocamento dinâmico do traçador é necessário que o sistema de aquisição de dados permita tomar os dados em um intervalo de tempo de  $10^{-2}$  a  $10^{-5}$  segundos.

### **3.3 Sistema de Aquisição de Dados**

O sistema consiste de um cartão de aquisição com um conversor analógico digital (ADC) que está acoplado ao barramento do microcomputador permitindo registrar as medições a intervalos de tempo específicos, dos sinais que vêm dos detectores cintiladores. Dependendo da vazão a estudar o intervalo de tempo de aquisição, “ $\Delta T$ ”, é ajustado entre as faixas de tempo mínimo e máximo.

Todos os dados são registrados em formato ASCII e seguindo a formatação exigida para que possam ser processados por qualquer um dos programas já desenvolvidos pelo Laboratório de Traçadores do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) e ao mesmo tempo para que sejam compatíveis com qualquer editor de texto [14].

#### **3.3.1 Temporização das Leituras**

De acordo com o intervalo de tempo fixado, o número de dados por segundo é alterado. A quantidade de dados a ser armazenados depende da capacidade de memória RAM do microcomputador.

A seleção do intervalo de tempo para registrar os dados depende da vazão e da distância de separação entre os detectores. Se a velocidade de escoamento do fluido é muito lenta, o intervalo de tempo entre duas contagens sucessivas,  $\Delta T$ , tem que ser fixado de modo de garantir que todo o deslocamento do traçador entre os dois detectores seja monitorado. Quando a velocidade do marcador no meio é muito rápida, entre duas contagens sucessivas,  $\Delta T$ , tem que ser suficientemente pequeno para poder visualizar o sinal entre os detectores. Caso contrário corre-se o risco de não registrar o passo do radiotraçador.

No sistema experimental usado, a distância entre os detectores pode-se ajustar desde 6,2 cm até 15 cm. A separação mínima dos sensores está limitada pelo diâmetro externo dos colimadores que envolvem cada um deles.

### 3.4 Calibração dos Detectores

Este procedimento é necessário para conhecer as características reais de cada detector e assim poder comparar seu funcionamento com o modelo teórico.

Foram levantadas as curvas de tensão de operação, a resolução e a eficiência dos dois detectores e cada um deles foi colimado Figura 3.4.

Na calibração os detectores são blindados com colimadores de chumbo cilíndricos de 6,45 cm de altura, 6,25 cm de diâmetro e com 1,55 cm de espessura. Os colimadores estão posicionados na face frontal do cristal e uma fonte de radiação de  $^{137}\text{Cs}$  foi usada nas medidas no seguinte procedimento de calibração:

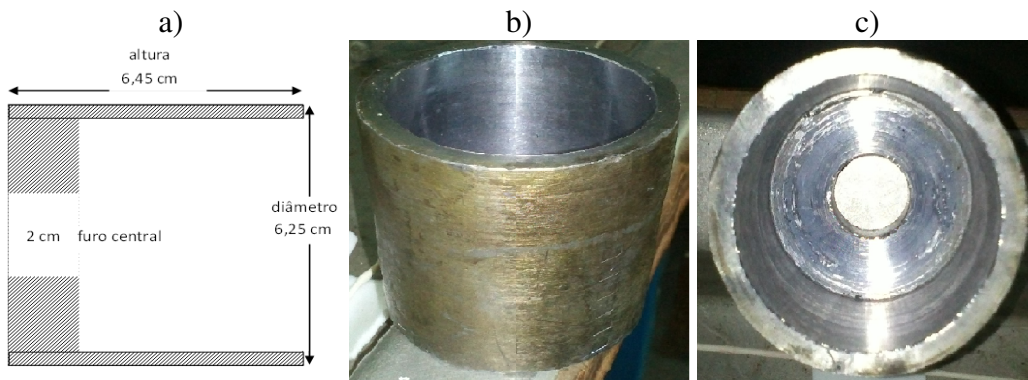


Figura 3.4: a) Dimensões colimador. b) Vista colimador. c) Furo central colimador

**a Ajuste da tensão de operação:** Posiciona-se a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  na frente de cada detector. A tensão eleva-se a partir de 350 V dado pelo fabricante em passos de 10 V. Cada incremento é contado durante dois minutos. Quando o osciloscópio começar a indicar que o sinal está saturando, se para de elevar a alta tensão e os resultados de cada detector são graficados. A partir desses gráficos observa-se qual é a região onde está o patamar, tabela 3.2. A tensão de operação é selecionada na metade da ocorrência do patamar segundo recomendação de MAFRA [16].

Tabela 3.2: Tabela dos pontos de operação

Detector	Patamar (V)	Ponto de operação (V)	Resolução para o $^{137}\text{Cs}$
1	(700 - 820)	770	9,7
2	(820 - 980)	880	7,8

**b 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.

### 3.5 Medida de Vazão

Esta consiste de um cilindro acrílico transparente de 8,0 cm de diâmetro externo e 60,0 cm de comprimento como é apresentado na Figura 3.5. Perpendicularmente ao eixo do cilindro se colocam dois detectores de NaI(Tl) 1 1/4"x3/4".

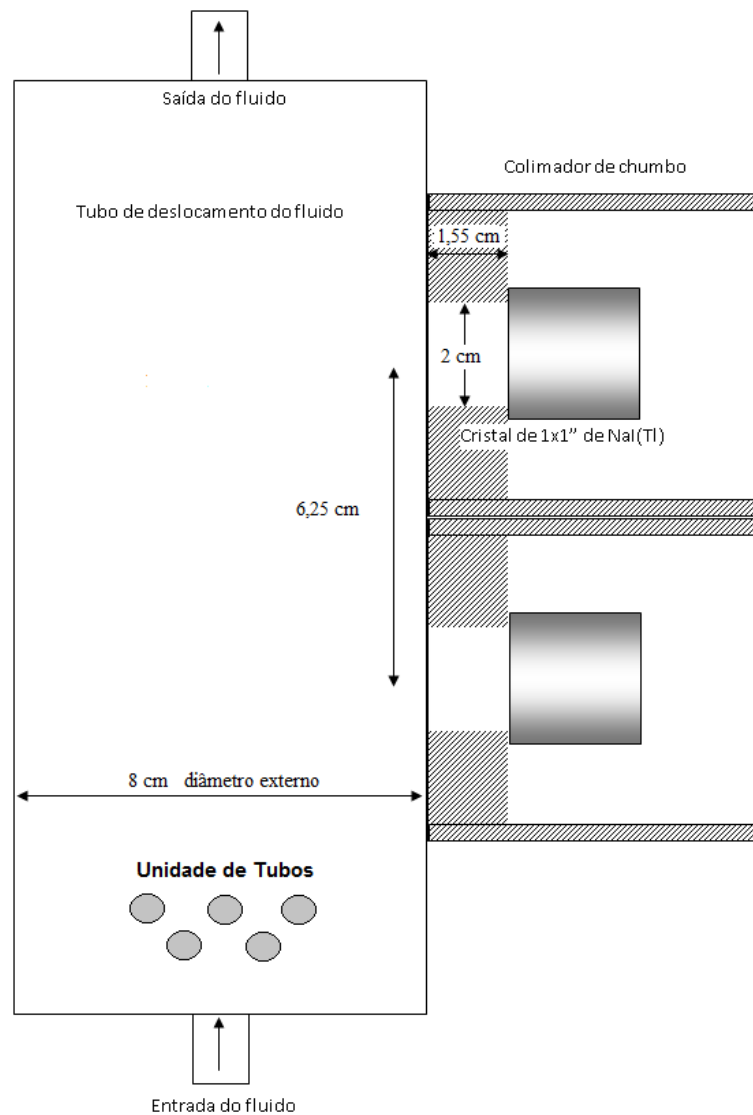


Figura 3.5: Unidade de Medida de Vazão

Neste cilindro foi instalado um conjunto denominado banco de tubos para promover uma turbulência no escoamento do fluido objetivando uma mistura rápida e dessa forma minimizar os efeitos de canalização que potencialmente possam existir.

Na figura 3.6 é apresentada uma foto com a posição dos colimadores.

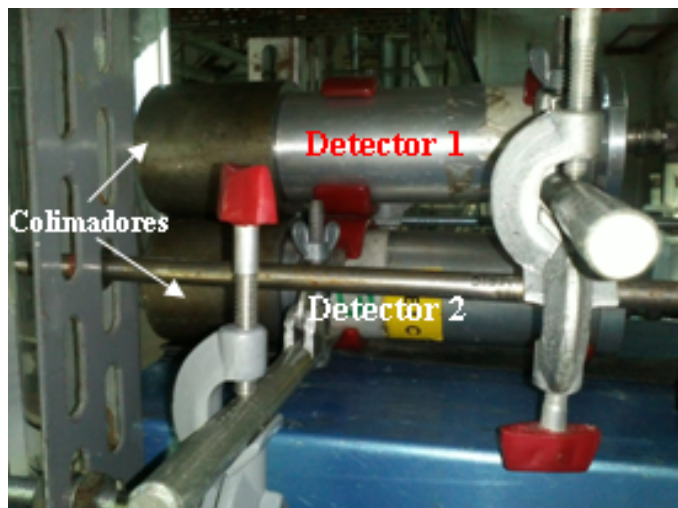


Figura 3.6: Detectores posicionados para medir vazão

### 3.6 Preparação do Traçador

O radiotraçador usado nos experimentos [8], é aplicado quando o fluido a ser marcado é água. O radioisótopo  $^{82}\text{Br}$  é obtido por ativação neutrônica no Rator Argonauta do IEN, sob as seguintes condições:

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

O traçador é um sal e facilmente dissolvido em água, obtendo-se um volume final de 25 ml.

Na figura 3.7 é apresenta-do o espectro de energia do Br.

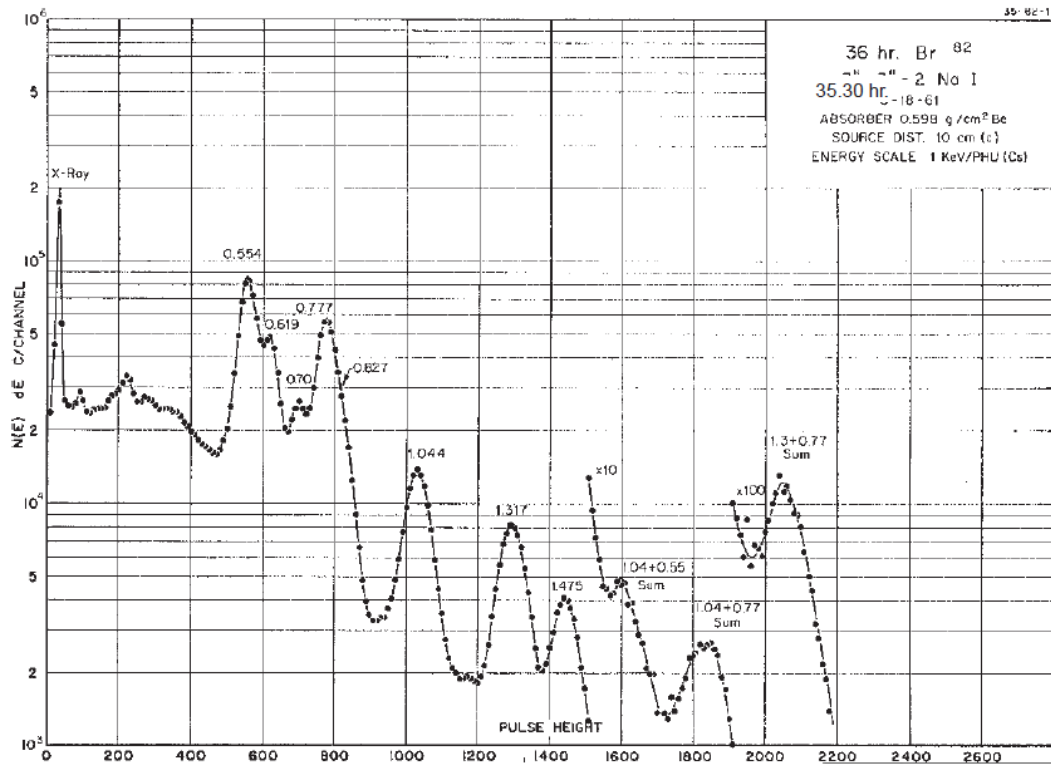


Figura 3.7: Espectro de energia do <sup>82</sup>Br

## 3.7 Programas de Avaliação das Funções de “Cross Correlation” e RTD

### 3.7.1 Programa CROSSCORR

Para a avaliação da vazão pelo método de “Cross Correlation” foi desenvolvido como parte de este trabalho um programa processa os dados coletados pelo sistema de aquisição de dados (SAD). O programa tem as seguintes características:

1. Tem como entrada os dados gerados pelo SAD.
2. Permite selecionar a Janela, que é o número de dados usados no cálculo do coeficiente de “Cross Correlation”.

3. Permite selecionar com qual método (*Ponto a Ponto* ou *Evolutivo*) para calcular a função de “Cross Correlation”.
4. Permite funcionar nos modos de operação: *Direto*, *Relay* ou *Polar*.
5. Determina o tempo de retardo “ $\tau$ ”.
6. Calcula a vazão “ $Q$ ”.
7. Os dados de saída estão em formato ASCII para que possam ser lidos por qualquer editor de texto.
8. Os dados também têm a mesma formatação nos demais programas usados no Laboratório de Traçadores do IEN permitindo uma conexão entre eles.

Para avaliar a resposta do programa CROSSCORR no cálculo do tempo de retardo  $\tau$ , seguiram-se dois esquemas de simulações. No primeiro, seguem-se dois casos chamados de *Simples e Média* para avaliar se é preciso preparar os dados antes de ser usados no programa CROSSCORR. O esquema das simulações são seguidos de acordo ao diagrama apresentado na figura 3.8. Para cada caso geraram-se dois tipos de sinais, um gaussiano e um outro quadrado.

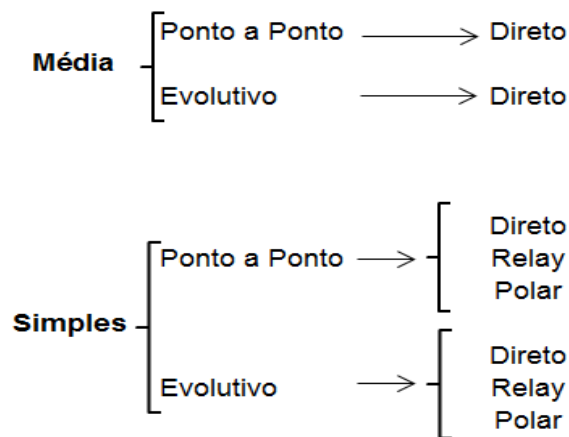


Figura 3.8: a) Diagrama das simulações efetuadas para calcular o coeficiente de “Cross Correlation”,  $\rho$ , com cada método e modo de operação.

Quando se segue o caminho de simulação *Simples*, nesse caso os dados são introduzidos no programa sem modificação nenhuma. Quando se segue o caminho *Média*, os dados são modificados antes de entrar no programa de acordo com às equações 3.1 e 3.2:

$$x'(t) = \frac{x(t) - \overline{x(t)}}{s_x} \quad (3.1)$$

$$y'(t) = \frac{y(t) - \overline{y(t)}}{s_y} \quad (3.2)$$

onde:

$x(t)$  e  $y(t)$ : dados gerados que simulam os sinais (gaussianos e ou quadrados) nos detectores 1 e 2 respectivamente.

$\overline{x(t)}$  e  $\overline{y(t)}$ : médias de  $x(t)$  e  $y(t)$  respectivamente.

$s_x$  e  $s_y$ : desvios padrões de  $x(t)$  e  $y(t)$  respectivamente.

Quando se simula seguindo o caso média só podem ser realizadas simulações no modo Direto, porque o coeficiente de “Cross correlation” é nulo.

No segundo esquema de simulações foi avaliada a resposta do programa CROSS-CORR, para os dois tipos de modelos básicos de fluxo: Fluxo Pistão e Difusão. Neste esquema também se geraram dois tipos de sinais, gaussiano e quadrado, além de três vazões diferentes de  $56 \times 10^{-3} \text{L.s}^{-1}$ ,  $111 \times 10^{-3} \text{L.s}^{-1}$ , e  $278 \times 10^{-3} \text{L.s}^{-1}$ .

### 3.7.2 Pacote TRAÇADORES

Este pacote foi desenvolvido por BRANDÃO [14], como parte de seu trabalho doutoral e é composto por um conjunto de programas independentes que são requisitados a medida que os dados vão sendo analisados. Tem como entrada os dados gerados pelo SAD contendo o número total de dados, as contagens registradas nos detectores, o tempo total de aquisição e o intervalo entre as contagens sucessivas. Na saída é gravado um novo arquivo em formato ASCII e a etapa seguinte é efetuada.

Com os dados experimentais são calculados, por meio da técnica de deconvolução, as funções de distribuição de idade “RTD”. Este programa tem as seguintes características:

1. Faz correções na taxa de contagens dos detectores por meio da eliminação do ruído eletrônico.
2. Faz correção taxa de contagem devido à meia vida do radioisótopo.
3. Faz subtração da radiação de fundo.
4. Normaliza os dados tratados e calcula as curvas I(t), E(t), F(t) e o tempo médio de residência  $\tau$ .



# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Cálculo da Função de Cross Correlation para Pulsos Simulados

#### 4.1.1 Pulso Quadrado

Foram realizadas simulações onde os detectores estão distanciados em 20 cm, e injetando um pulso quadrado, conforme mostrado na Figura 4.1, em uma vazão de  $111 \times 10^{-3} \text{ l.s}^{-1}$ .

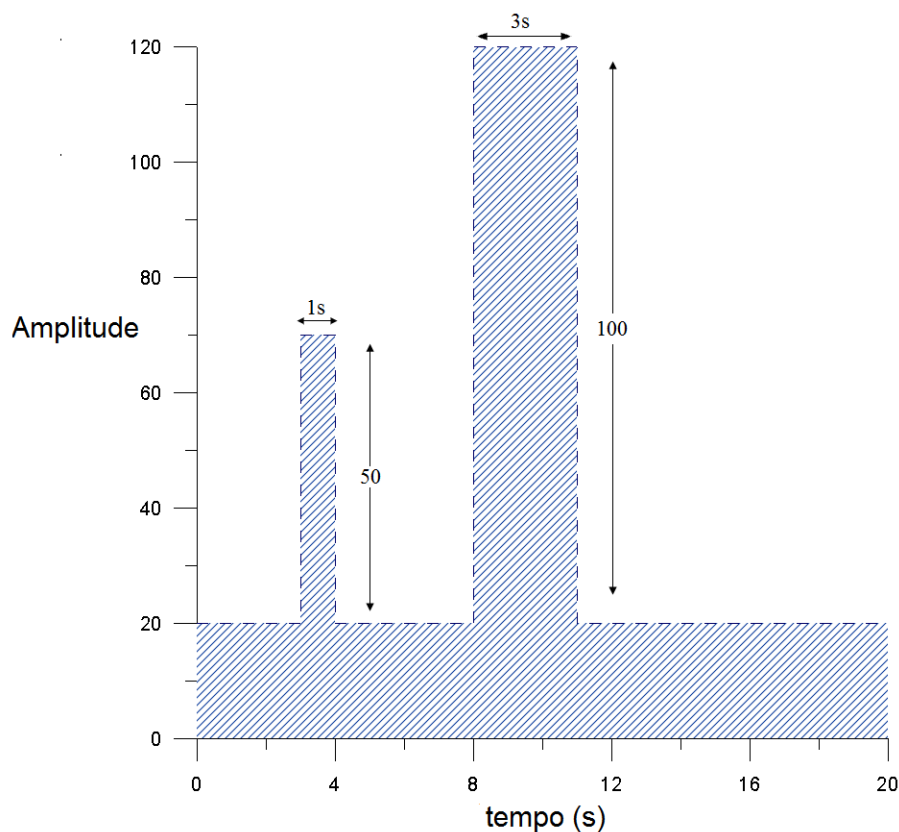


Figura 4.1: Pulso principal com duas amplitudes, uma de intensidade 70 e largura de 1s, e outra com intensidade de 120 e largura de 3s, com uma linha base de 20.

### 4.1.2 Otimização do número de evoluções

Foi calculado o coeficiente de “Cross Correlation” normalizado,  $\rho$ , seguindo o método evolutivo para vários conjuntos de evoluções. Na figura 4.2 é apresentado como vai mudando o coeficiente  $\rho$ , com o aumento do número de evoluções.

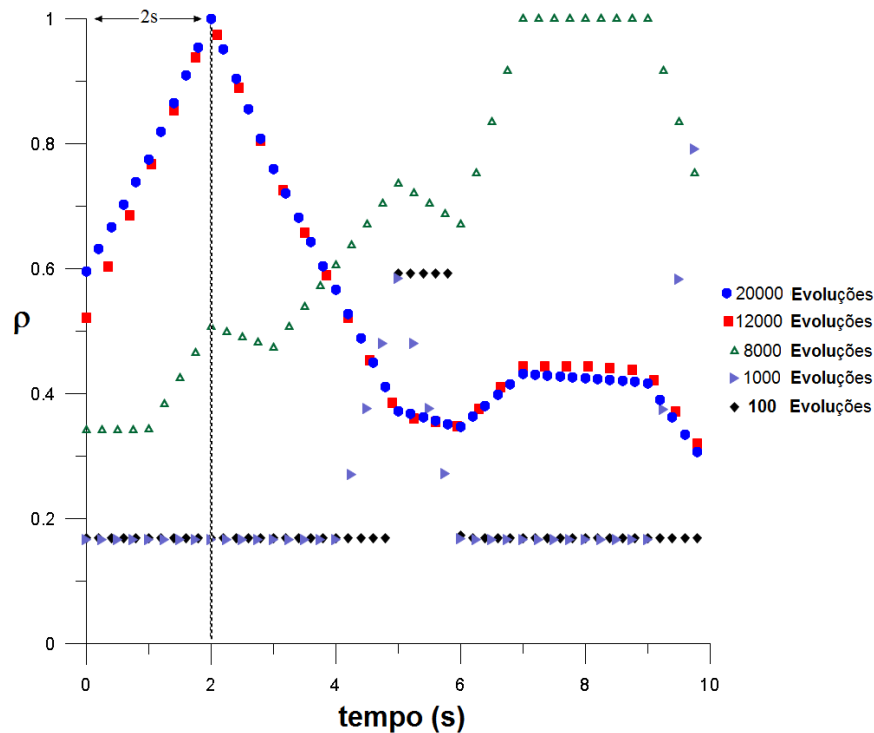


Figura 4.2: a) Gráfico do coeficiente normalizado de “Cross Correlation”, “ $\rho$ ”, calculado pelo método Evolutivo para evoluções desde 100 até 20000.

Observa-se que a forma da curva vai evoluindo, daí o nome de método evolutivo, com o número de evoluções. A medida que o número de evoluções é maior a curva do coeficiente de “Cross Correlation” vai se aproximando à forma na qual a curva não muda, mesmo aumentando o número de evoluções.

Isso acontece a partir de um determinado número de evoluções maior que à metade do número de dados que no caso apresentado é a partir de 10.000 evoluções já que o número total de dados é 20.000.

### 4.1.3 Cálculo da Função de “Cross Correlation” no caso Simples e Média

Foram calculados a partir dos sinais  $x(t)$  e  $y(t)$  apresentados na Figura 4.3, os coeficientes de “Cross Correlation”, pelos métodos Ponto a Ponto e Evolutivo, considerando primeiro o caso Média e logo o caso Simples como foi mencionado na secção 3.7.2. Com esses resultados determinaram-se o tempo máximo, “ $\tau_{max}$ ” para o qual é alcançado o ponto máximo da curva e o tempo para a Média, chamado de “ $t_{med}$ ” para o qual acontece a média de cada resultado. Também foram determinados a curtose e o coeficiente de assimetria que estão resumidos na tabela 4.1

Na figura 4.3 é apresenta-do o gráfico dos pulsos em cada um dos detectores.

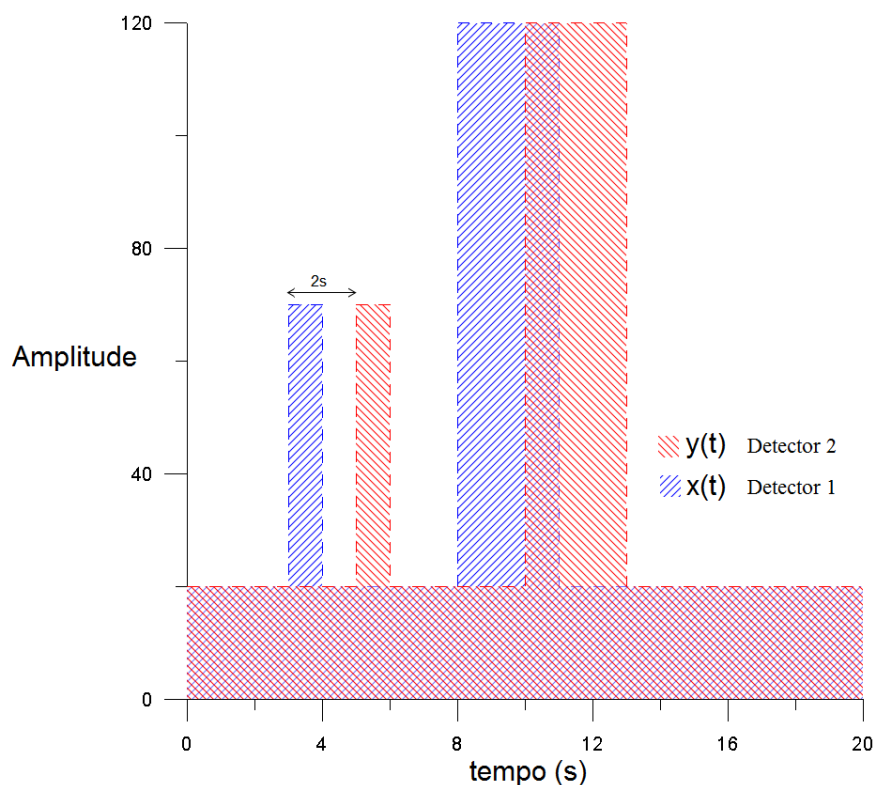


Figura 4.3: Pulsos quadrados correspondentes a uma vazão de  $111 \times 10^{-3} l.s^{-1}$  em cada um dos detectores quando afastados 20 cm.

Na continuação apresentam-se os valores correspondentes aos coeficiente de “Cross Correlation” para o caso Média calculados pelo método Ponto a Ponto, Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Tabela de dados estatísticos da simulação do caso Simples e Média

PULSO QUADRADO						
Caso	Modo	Método	$(\tau_{max} \pm \Delta\tau)$ (s)	$(t_{med} \pm \Delta t)$ (s)	Curtose	Assimetria
Média	Direto	PP	$2,00 \pm 0,39$	$3,96 \pm 1,44$	-0,76	0,89
		EV	$2,00 \pm 0,38$	$3,97 \pm 1,43$	-0,72	0,93
Simples	Direto	PP	$2,00 \pm 0,05$	$4,05 \pm 1,46$	-0,75	0,78
		EV	$2,00 \pm 0,20$	$4,07 \pm 1,47$	-0,90	0,70
	Relay	PP	$2,00 \pm 0,07$	$4,06 \pm 1,44$	-0,54	0,86
		EV	$2,00 \pm 0,25$	$4,04 \pm 1,80$	-0,60	0,84
	Polar	PP	$2,00 \pm 0,25$	$3,32 \pm 1,40$	0,12	0,88
		EV	$2,00 \pm 0,26$	$3,75 \pm 1,41$	0,10	0,95

A partir dos dados da Tabela 4.1 é elaborado o gráfico do coeficiente de “Cross Correlation”, “ $\rho$ ”, Figura 4.4 e junto com ela apresenta-se uma gaussiana centrada no valor médio obtido da tabela 4.1, com a finalidade de mostrar a diferença do tempo associado a este valor com relação ao tempo associado ao máximo.

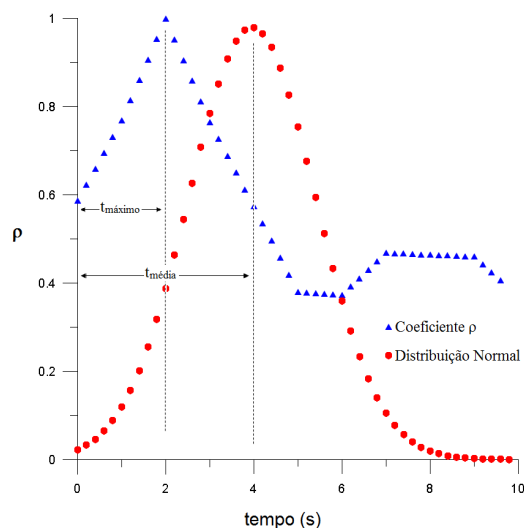


Figura 4.4: Caso Media: coeficiente de “Cross Correlation”,  $\rho$ , calculado pelo método Ponto a Ponto, no modo Direto, junto com uma gaussiana centrada no valor médio.

A curva do coeficiente “ $\rho$ ” para o pulso quadrado é totalmente assimétrica, por isso

não é recomendado para estes casos associar o valor do tempo do valor médio como o tempo de retardo, que é exatamente o tempo de deslocamento entre os sinais de entrada. A curva tem um máximo em 2 segundos. As curvas obtidas pelo método Ponto a Ponto e Evolutivo são totalmente coincidentes o que significa que é totalmente equivalente calcular o coeficiente de “Cross Correlation” tanto pelo método Ponto a Ponto como o Evolutivo e por esta razão não foi plotado.

Os cálculos correspondentes ao método Evolutivo foram feitos para um número de evoluções igual 10.000, que é à metade do número total de dados.

Os parâmetros estatísticos calculados para cada método são muito similares o qual confirma o fato de que os métodos são completamente equivalentes.

Como as curvas são completamente assimétricas o tempo correspondente à média aritmética não é igual ao tempo para o qual acontece o máximo de cada curva e a diferença entre o tempo máximo e o tempo associado com o valor da média é de aproximadamente 50%.

O tempo máximo é igual ao tempo de deslocamento temporal do sinal entre o primeiro e o segundo detector.

O tempo associado à média aritmética não é um bom parâmetro para estimar o tempo de deslocamento entre os sinais já que está muito afastado do verdadeiro tempo de deslocamento.

Na continuação apresentam-se os gráficos correspondentes aos métodos Ponto a Ponto e Evolutivo no caso Simple e em cada modo de operação, Figuras 4.5 e 4.6.

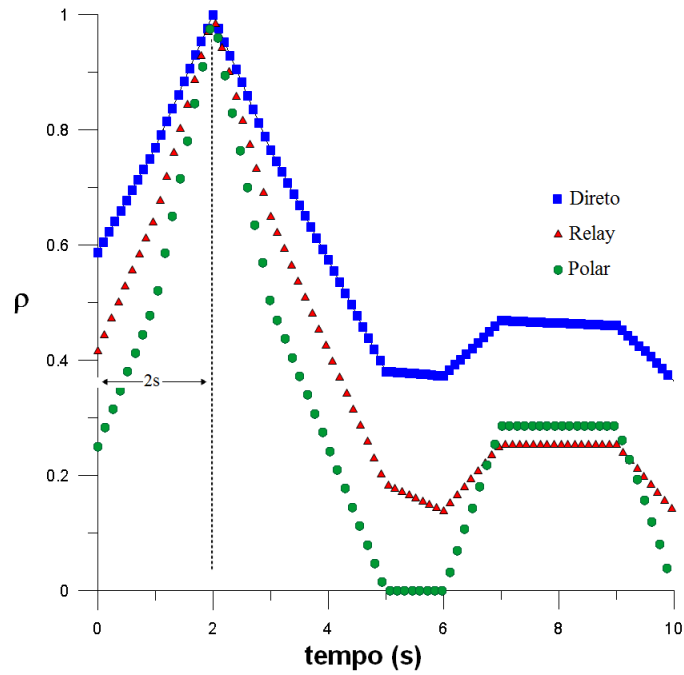


Figura 4.5: Caso Simples: coeficiente de “Cross Correlation”,  $\rho$ , calculado pelo método Ponto a Ponto, nos modos Direto, Relay e Polar. Todas têm um máximo em 2s.

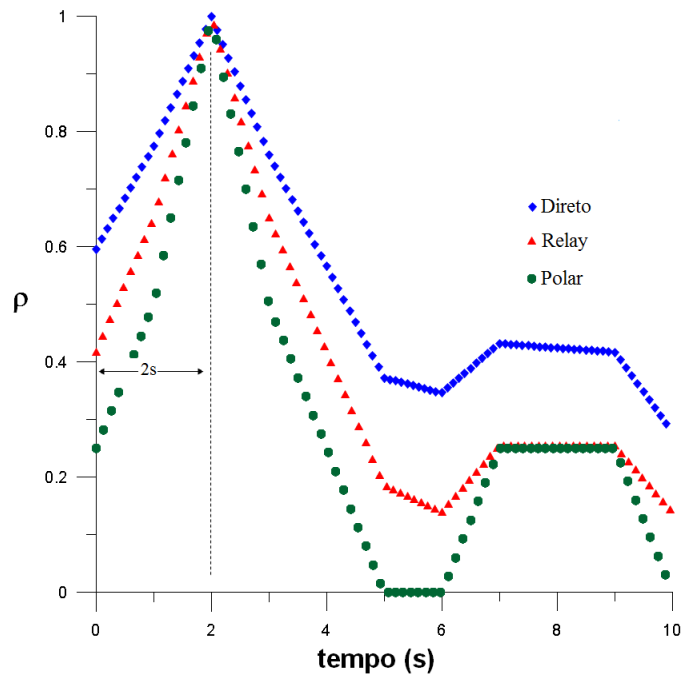


Figura 4.6: Caso Simples: coeficiente de “Cross Correlation”,  $\rho$ , calculado pelo método Evolutivo, nos modos Direto, Relay e Polar. Todas têm um máximo em 2s.

Observa-se que al igual que para o caso Média as curvas têm a mesma forma e são completamente assimétricas.

Em relação aos parâmetros estatísticos o modo Direto é o que apresenta o menor

desvio padrão, aproximadamente de um 4% quando é comparado com o modo Polar. O desvio padrão obtido para o caso Média é aproximadamente 33% (calculados segundo a equação 4.1) maior o valor obtido no caso Simples. De novo tratar os dados antes de serem usados pelo programa CROSSCORR não oferece nenhuma vantagem, muito pelo contrário. Pelo menos para o tipo de tratamento usado neste trabalho.

$$\% = [(Valormaior - Valormenor) / Valormaior] \times 100 \quad (4.1)$$

As curvas apresentam um máximo em torno do mesmo valor de tempo que neste caso é de 2 segundos e esse valor se mantém para cada um dos modos de operação utilizados. O tempo associado ao valor da média aritmética é muito diferente para o qual acontece o máximo e varia em menor ou maior grau com o modo de operação.

## 4.2 Pulso Gaussiano

Foram realizadas simulações onde os detectores estão distanciados em 20 cm e injetando um pulso gaussiano com vazão de  $56 \times 10^{-3} l.s^{-1}$ . Na figura 4.7, são apresentados os pulsos  $x(t)$  e  $y(t)$  correspondentes aos detectores 1 e 2 respectivamente.

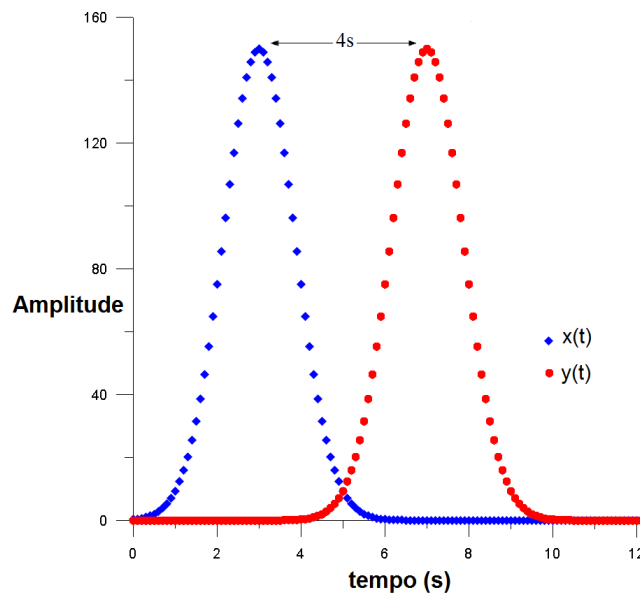


Figura 4.7: Sinais gaussianos  $x(t)$  e  $y(t)$  com um tempo de deslocamento de 4s entre eles

Foram calculados os coeficientes de “Cross Correlation” pelos métodos Ponto a Ponto e Evolutivo considerando primeiro o caso Média e depois o caso Simples como foi exposto na secção 3.7.2. A partir desses resultados determinou-se o tempo para o qual é alcançado o ponto máximo  $t_{max}$  e também o tempo para a Média  $t_{med}$  de cada resultado. Também foram determinados varios parâmetros estatísticos, como a curtose e o coeficiente de assimetria, que estão resumidos na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Tabela de dados estatísticos da simulação do caso Simples e Média

<b>PULSO GAUSSIANO</b>						
Caso	Modo	Método	$(\tau_{max} \pm \Delta\tau)$ (s)	$(t_{med} \pm \Delta t)$ (s)	Curtose	Assimetria
M e d i a	Direto	PP	4,00 ± 0,41	2,16 ± 1,11	-0,77	0,88
		EV	4,00 ± 0,39	2,20 ± 1,11	-0,69	0,93
S i m p l e s	Direto	PP	4,00 ± 0,35	2,43 ± 1,19	-0,83	0,84
		EV	4,00 ± 0,35	2,14 ± 1,19	-0,84	0,84
	Relay	PP	4,00 ± 0,38	1,90 ± 1,36	-1,40	0,50
		EV	4,00 ± 0,38	1,89 ± 1,35	-1,40	0,50
	Polar	PP	4,00 ± 0,33	1,74 ± 1,37	-1,31	0,31
		EV	4,00 ± 0,33	1,74 ± 1,37	-1,31	0,31

Na continuação apresenta-se o gráfico correspondente ao coeficiente de “Cross Correlation” dos cálculos da tabela 4.2, para o caso Média figura 4.8.

Como no caso anterior, apresenta-se somente o gráfico para o caso Média conforme apresentado correspondente ao método Ponto a Ponto porque para o Evolutivo é completamente equivalente.



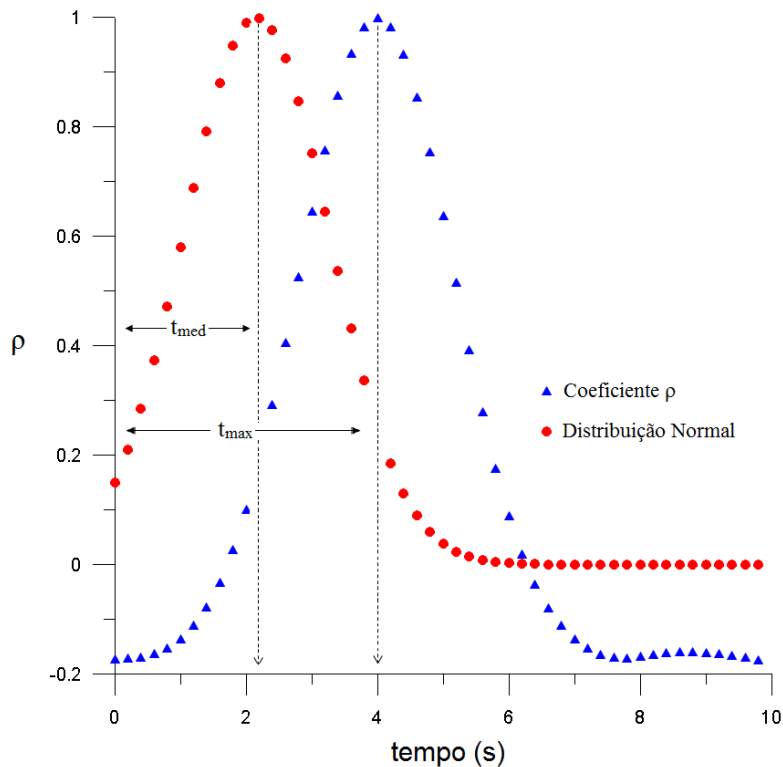


Figura 4.8: Caso Media: calculado pelo método Ponto a Ponto o coeficiente de “Cross Correlation”,  $\rho$ , no modo direto. Junto com esta curva apresenta-se uma gaussiana centrada no valor médio aos 2,16s.

A pesar dos pulsos serem gaussianos e simétricos a forma da curva do coeficiente de “Cross Correlation” não é simétrica, como o indica o valor do coeficiente de assimetria. Por esse fato a curva gaussiana centrada no valor médio de 2,16s fica à esquerda do valor máximo da curva do coeficiente  $\rho$  aos 4s.

Ainda sendo os pulsos completamente simétricos o valor da média não é um bom parâmetro para determinar o tempo de deslocamento dos pulsos, porque seu valor está muito afastado do tempo de retardo que neste caso é de 4s.

Como anteriormente o tempo máximo é igual ao tempo de deslocamento dos pulsos entre os detectores. Os parâmetros estatísticos obtidos tanto pelo método Evolutivo quanto no Ponto a Ponto não apresentam nenhuma diferença significativa, como pode ser observado pelos valores apresentados na tabela 4.2.

Por outro lado observa-se que pre-tratar os dados antes de entrar no programa CROSSCORR não oferece nenhum ganho. É só gasto de tempo computacional. Os dados podem entrar diretamente no programa para calcular o coeficiente “ $\rho$ ”.

Na continuação apresentam-se os gráficos do coeficiente “ $\rho$ ” calculado, para o caso

simples, figuras 4.9 e 4.10.

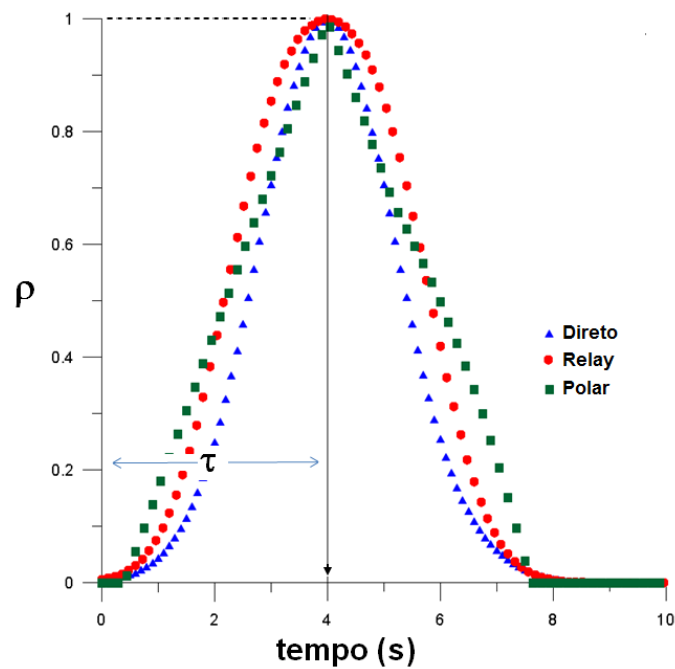


Figura 4.9: Caso Simples: calculado pelo método Ponto a Ponto coeficiente de “Cross Correlation”,  $\rho$ , nos modos Direto, Relay e Polar. Todas têm um máximo em 4s

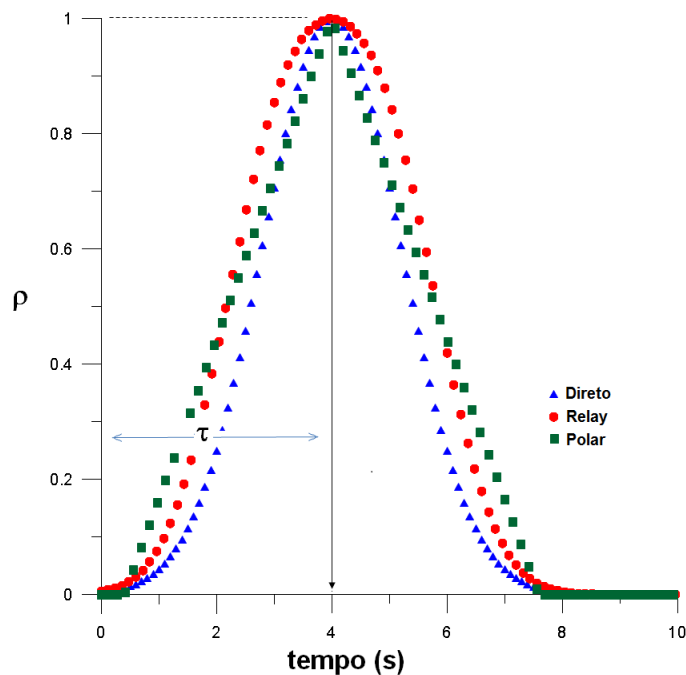


Figura 4.10: Caso Simples: calculado pelo método Evolutivo coeficiente de “Cross Correlation”,  $\rho$ , nos modos Direto, Relay e Polar. Todas têm um máximo em 4s

Quando o caso Média é comparado com o caso Simples no modo Direto, observa-se que o valor do desvio padrão obtido no Média é um 14% maior que o do Simples.

Também como no caso Média, o valor da média aritmética no caso Simples, nos três modos de operação, não coincide com o máximo das curvas porque também são assimétricas como indicam os valores do coeficiente de assimetria de cada um deles, o que sinaliza que o termo médio de novo não é um parâmetro bom para medir o tempo de deslocamento entre os pulsos. A diferença com o tempo no qual acontece o máximo é muito grande, aproximadamente 50% maior.

Os máximos de todas as curvas feitas por qualquer método ou modo não se alteram como é apresentado nas Figuras 4.9 e 4.10. Todas alcançam o máximo para o mesmo tempo. Os resultados obtidos com os pulsos quadrados ou gaussianos validaram o programa.

### 4.3 Simulação Fluxo Pistão

Foram realizadas três simulações supondo fluxo pistão para uma separação dos detectores de 10 cm e três valores diferentes de vazão de,  $(56, 111, 278) \times 10^{-3} l.s^{-1}$ , usando pulsos quadrados. Foram calculados os coeficientes de “Cross Correlation” usando o método Ponto a Ponto, para cada vazão, no modo Direto. Os parâmetros estatísticos estão resumidos na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Tabela de dados estatísticos da simulação usando pulsos quadrados

<b>Fluxo Pistão</b>				
Vazão ( $10^{-3} l.s^{-1}$ )	$t_{max} \pm M2$ (s)	$t_{med} \pm \Delta t$ (s)	Curtose	Assimetria
56	$4.00 \pm 0.19$	$5.98 \pm 1.44$	-0.76	0.74
111	$2.00 \pm 0.19$	$4.01 \pm 1.43$	-0.75	0.78
278	$0.50 \pm 0.18$	$2.79 \pm 1.46$	0.45	1.53

Os resultados da curva do coeficiente “ $\rho$ ” em função do tempo, apresentam-se na figura 4.11.

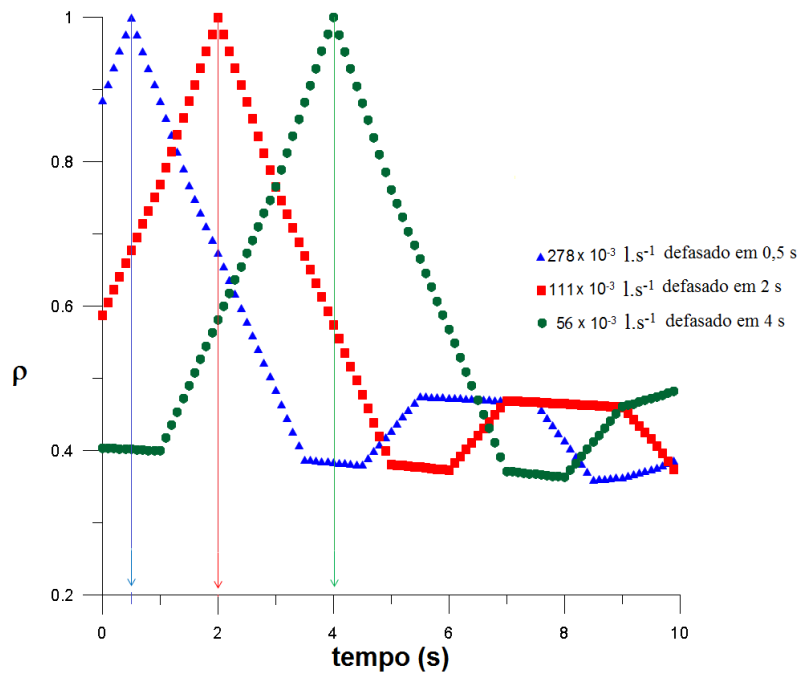


Figura 4.11: Coeficiente de correlação,  $\rho$ , calculado pelo Ponto a Ponto no modo Direto, para três vazões diferentes.

O método adotado para calcular o coeficiente de “Cross Correlation” é o método Ponto a Ponto no modo Direto já que é o que apresenta o menor desvio padrão.

Quando a vazão aumenta no fluxo pistão a forma da curva se mantém mas o tempo para o qual acontece o máximo se desloca para a esquerda do eixo do tempo.

Para maior vazão se é mantida a distância entre detectores o tempo de deslocamento é menor, como indicam os resultados da tabela 4.3 e as formas das curvas são iguais para cada uma das vazões.

## 4.4 Simulação de Fluxo de Difusão

Foram realizadas três simulações supondo fluxo de difusão para uma separação dos detectores de 10cm e três valores diferentes de vazão de  $(56, 111, 278) \times 10^{-3} l.s^{-1}$ , usando pulsos quadrados. Nesta situação o pulso no segundo detector não é idêntico ao pulso do primeiro detector por causa do efeito da difusão. Foram calculados os coeficientes de “Cross Correlation” usando o método Ponto a Ponto, para cada vazão, no modo Direto. Novamente como nos casos anteriores calcularam-se vários parâmetros estatísticos que estão resumidos na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Tabela de dados estatísticos da simulação usando pulsos quadrados

Fluxo Difusão				
Vazão ( $10^{-3}l.s^{-1}$ )	( $t_{max} \pm \Delta t$ ) (s)	( $t_{med} \pm \Delta t$ ) (s)	Curtose	Assimetria
56	$3.29 \pm 0.12$	$5.68 \pm 0.12$	-1.41	0.39
111	$0.81 \pm 0.16$	$3.36 \pm 0.15$	-0.83	0.85
278	$0.05 \pm 0.16$	$2.59 \pm 0.16$	1.07	1.50

Os resultados das curvas do coeficiente “ $\rho$ ” em função do tempo, apresentam-se na Figura 4.12.

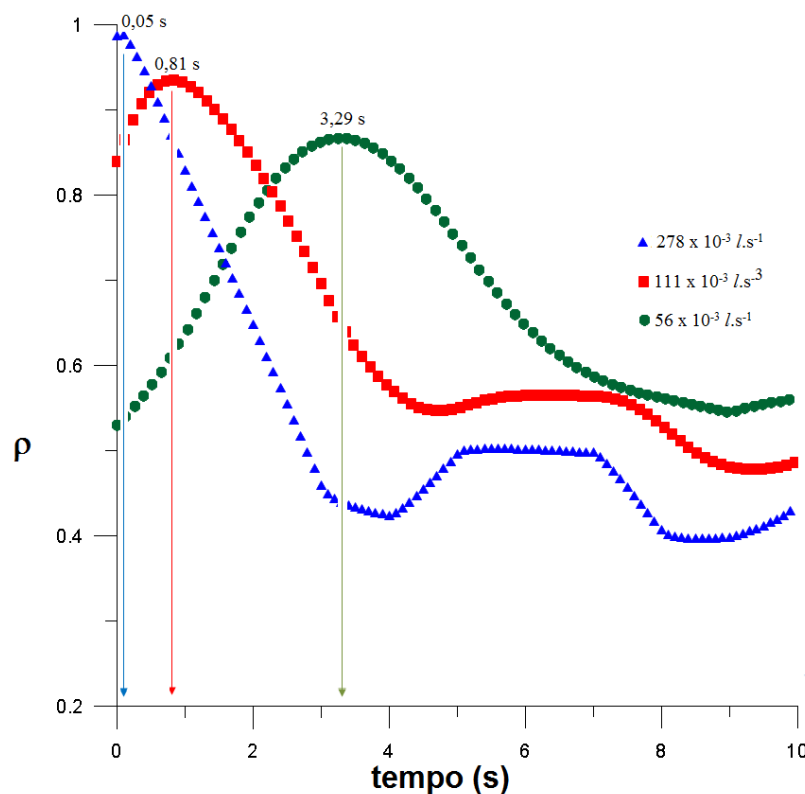


Figura 4.12: a) Gráfico do coeficiente de “Cross Correlation”,  $\rho$ , calculado pelo Ponto a Ponto no modo Direto, para três vazões diferentes.

Para este caso os resultados podem ser interpretados da seguinte forma:

Da curva para a vazão de  $278 \times 10^{-3} l.s^{-1}$ , que é a maior vazão, observa-se que a forma da curva do coeficiente  $\rho$  é muito parecida com as obtidas no caso de fluxo pistão. Isto é assim porque o pulso ao chegar no segundo detector está pouco deformado e se comporta como um caso de fluxo tipo pistão.

A curva correspondente à menor vazão é a que apresenta uma maior difusão e por isso a forma da curva é completamente diferente que para os casos de fluxo pistão.

O tempo de retardo ainda para estes casos é o associado ao máximo da curva do coeficiente de “Cross Correlation”.

O objetivo de testar o programa CROSSCORR com dados simulados foi atingido porque a partir dos resultados obtidos permite fazer os experimentos já tendo claro que o método de cálculo a adotar é o Ponto a Ponto e o tempo de retardo será determinado a partir dos máximos das curvas dos coeficientes de “Cross Correlation”.

## 4.5 Testes Experimentais

Foram medidas 5 vazões diferentes de grandezas de  $56 \times 10^{-3} \text{ l.s}^{-1}$  até  $278 \times 10^{-3} \text{ l.s}^{-1}$ . Por cada vazão fizeram-se quatro testes, chamados de T1, T2, T3 e T4, e em cada um deles injetou-se uma quantidade muito pequena de radiotraçador na linha de água e os dados foram registrados por meio dos detectores de NaI(Tl) de 30,1 mm de diâmetro por 17,2 mm (1 1/4”x3/4”) de espesura cujas dimensões em milímetros, foram determinadas experimentalmente por SALGADO [17], como parte de seu trabalho doutoral. O volume teórico duto/detector determinado a partir da geometria do sistema de medida é de  $(33,0 \pm 0,4) \times 10^{-3} \text{ l.s}^{-1}$ . Na figura 4.13, apresentam-se os sinais nos dois detectores de um dos experimentos realizados como ilustração.

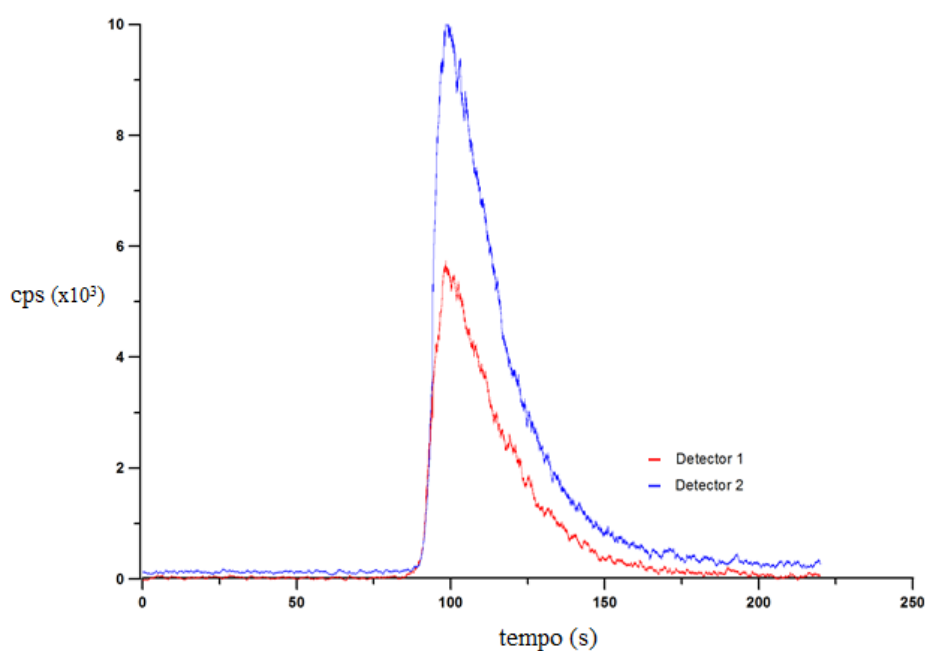


Figura 4.13: Gráfico dos sinais nos Detectores 1 e 2, de um dos testes experimentais de vazão de  $56 \times 10^{-3} \text{ l.s}^{-1}$

Mediante o métodos Ponto a Ponto e Evolutivo no modo Direto determinou-se para cada experimento o tempo de deslocamento  $\tau$ . Devido a similaridade entre os gráficos foi apresentado apenas para uma vazão “Q”. Na figura 4.14, apresenta-se o coeficiente  $\rho$ , calculado pelo método Ponto a Ponto e Evolutivo para a vazão de  $56 \times 10^{-3} \text{ l.s}^{-1}$ .

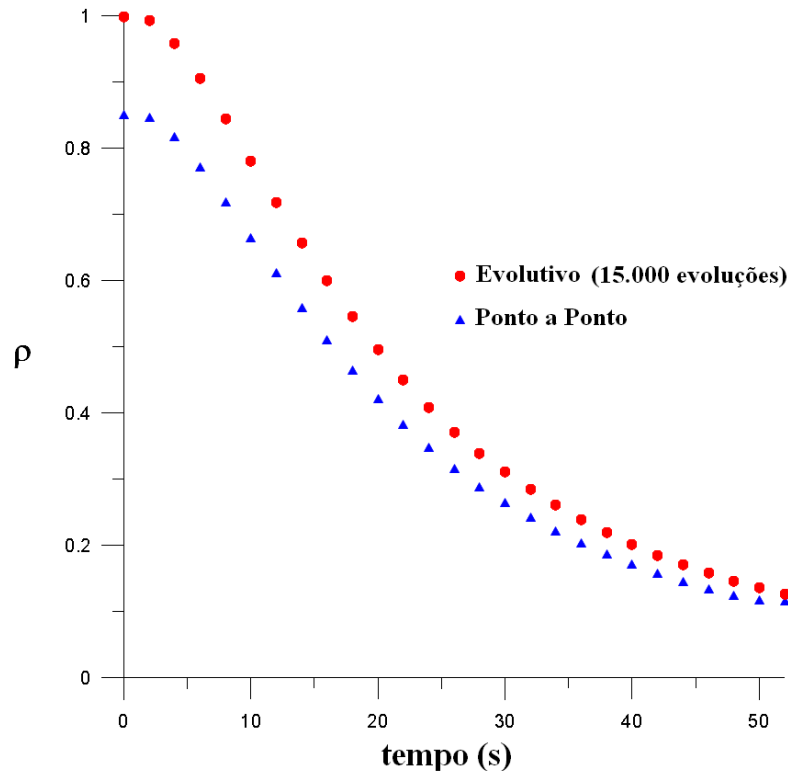


Figura 4.14: Gráfico do coeficiente de “Cross Correlation”,  $\rho$ , calculado pelo método Ponto a Ponto e Evolutivo para uma vazão experimental de  $56 \times 10^{-3} \text{ l.s}^{-1}$  no modo direto.

As formas das curvas obtidas pelo método Evolutivo e o Ponto a Ponto são parecidas à metade da forma da curva do coeficiente calculado para o pulso gaussiano. A razão disto é que os detectores estão tão próximos que praticamente o que está-se obtendo é uma curva de autocorrelação. A autocorrelação é a correlação do sinal com ele mesmo.

Os resultados dos teste experimentais são apresentados das tabelas 4.5 a 4.10, começando pela menor vazão até chegar a maior que é a de  $278 \times 10^{-3} \text{ l.s}^{-1}$ :

Tabela 4.5: Tempos de deslocamento  $\tau$ , calculados pelo método Ponto a Ponto e Evolutivo no modo Direto

<b>Vazão= <math>(56 \pm 1.4) \times 10^{-3} L.s^{-1}</math></b>		
<b>Teste</b>	<b>Método Ponto a Ponto</b>	<b>Método Evolutivo</b>
	$\tau_1(s)$	$\tau_2(s)$
1	0.60	0.61
2	0.68	0.68
3	0.53	0.53
4	0.57	0.58
$\tau_{media} \pm \Delta\tau$	$0.60 \pm 0.06$	$0.60 \pm 0.06$
$(Q \pm \Delta Q) \times 10^{-3} L/s$	$55.0 \pm 12.0$	$55.0 \pm 12.0$

O desvio padrão tanto para o método Ponto a Ponto quanto o Evolutivo é em torno de 10% do valor da média aritmética dos tempos medidos e determinar o tempo de deslocamento é equivalente. Este espalhamento no resultado deve-se a vazão não ser constante embora o rotâmetro indique que a vazão não têm variações. O rotâmetro não tem a sensibilidade suficiente e as pequenas variações na vazão são indetectáveis por ele.

Tabela 4.6: Tempos de deslocamento  $\tau$ , calculados pelo Método Ponto a Ponto e Evolutivo no modo Direto

<b>Vazão= <math>(111 \pm 1.4) \times 10^{-3} L.s^{-1}</math></b>		
<b>Teste</b>	<b>Método Ponto a Ponto</b>	<b>Método Evolutivo</b>
	$\tau_1(s)$	$\tau_2(s)$
1	0.24	0.24
2	0.39	0.39
3	0.38	0.38
4	0.15	0.16
$\tau_{media} \pm \Delta\tau$	$0.29 \pm 0.12$	$0.29 \pm 0.11$
$(Q \pm \Delta Q) \times 10^{-3} L/s$	$110.0 \pm 60.0$	$110.0 \pm 57.0$

Embora os valores dos tempos e dos desvios padrões são similares tanto os calculados pelo Ponto a Ponto quanto o Evolutivo, pode-se observar que os valores dos desvíos são 41% das médias obtidas. Deve-se ao fato que a vazão não se mantém constante entre os testes e a aumentar-se a vazão os “volumes mortos” dentro do tubo de medida são maiores.

Os valores calculados por ambos métodos são de novo muito parecidos mas a tendência no desvio padrão em relação à média se mantém.

Para esta vazão já o desvio padrão é 71% do valor da média. O que segue confirmando que os “volumes mortos” são maiores com o aumento da vazão. Dentro do tubo o radiotraçador flui pelo centro do duto indicando possíveis canalizações presentes.



Tabela 4.7: Tempos de deslocamento  $\tau$ , calculados pelo Método Ponto a Ponto e Evolutivo no modo Direto

<b>Vazão = <math>(167 \pm 1.4)10x^{-3}L.s^{-1}</math></b>		
<b>Teste</b>	<b>Método Ponto a Ponto</b>	<b>Método Evolutivo</b>
	$\tau_1(s)$	$\tau_2(s)$
1	0.16	0.16
2	0.28	0.28
3	0.29	0.30
4	0.04	0.05
$\tau_{media} \pm \Delta\tau$	$0.19 \pm 0.12$	$0.20 \pm 0.12$
$(Q \pm \Delta Q)X10^{-3}L.s^{-1}$	$170.0 \pm 131.0$	$170.0 \pm 119.0$

Tabela 4.8: Tempos de deslocamento  $\tau$ , calculados pelo Método ponto a ponto e Evolutivo no modo Direto

<b>Vazão = <math>(222 \pm 1.4)x10^{-3}L.s^{-1}</math></b>		
<b>Teste</b>	<b>Método Ponto a Ponto</b>	<b>Método Evolutivo</b>
	$\tau_1(s)$	$\tau_2(s)$
1	0.04	0.04
2	0.08	0.08
3	0.14	0.15
4	0.02	0.02
$\tau_{media} \pm \Delta\tau$	$0.07 \pm 0.05$	$0.07 \pm 0.06$
$(Q \pm \Delta Q)X10^{-3}L.s^{-1}$	$470.0 \pm 394.0$	$470.0 \pm 461.0$

Tabela 4.9: Tempos de deslocamento  $\tau$ , calculados pelo Método ponto a ponto e Evolutivo no modo Direto

<b>Vazão = <math>(278 \pm 1.4)x10^{-3}L.s^{-1}</math></b>		
<b>Teste</b>	<b>Método Ponto a Ponto</b>	<b>Método Evolutivo</b>
	$\tau_1(s)$	$\tau_2(s)$
1	0.03	0.04
2	0.04	0.05
3	0.01	0.01
4	0.04	0.05
$\tau_{media} \pm \Delta\tau$	$0.03 \pm 0.01$	$0.04 \pm 0.02$
$(Q \pm \Delta Q)X10^{-3}L.s^{-1}$	$110.0 \pm 500.0$	$830.0 \pm 513.0$

A partir desses resultados foi elaborada a tabela 4.10, com as médias e os desvios padrões para cada vazão:

Tabela 4.10: Médias e desvios padrões dos tempos de deslocamento  $\tau$ , para cada valor de vazão medida

$(Q \pm \Delta Q) \times 10^{-3} l.s^{-1}$	<b>Método Ponto a Ponto</b> $(\tau_1 \pm \Delta \tau_1) s$	<b>Método Evolutivo</b> $(\tau_2 \pm \Delta \tau_2) s$
56 ± 1.4	0.60 ± 0.06	0.60 ± 0.06
111 ± 1.4	0.29 ± 0.12	0.29 ± 0.11
167 ± 1.4	0.19 ± 0.12	0.20 ± 0.12
222 ± 1.4	0.07 ± 0.05	0.07 ± 0.06
278 ± 1.4	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.02

Com esses resultados dos tempos de retardo e as suas incertezas foram feitos os cálculos do volume deslocado em cada uma das vazões e a partir disso foi feita a tabela 4.11. As incertezas para cada vazão foram calculadas pela equação 4.2 [18].

$$\Delta V = [(\tau \cdot \Delta Q)^2 + (Q \cdot \Delta \tau)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

Tabela 4.11: Volumes calculados a partir dos tempos de retardo  $\tau$  obtidos pelo método ponto a ponto, para cada média de vazão medida

<b>Método Ponto a Ponto</b>		
$(Q \pm \Delta Q) \times 10^{-3} l.s^{-1}$	$(V_1 \pm \Delta V_1) \times 10^{-3} l$	$\frac{\Delta V}{V_1} \times 100$
56 ± 0.7	33.33 ± 3.36	10.08
111 ± 0.7	32.22 ± 13.33	41.38
167 ± 0.7	31.67 ± 20.00	63.16
222 ± 0.7	15.56 ± 11.11	71.43
278 ± 0.7	8.33 ± 2.78	33.33

Tabela 4.12: Volumes calculados a partir dos tempos de retardo  $\tau$  obtidos pelo método evolutivo, para cada média de vazão medida

<b>Método Evolutivo</b>		
$(Q \pm \Delta Q) \times 10^{-3} l.s^{-1}$	$(V_1 \pm \Delta V_1) \times 10^{-3} l$	$\frac{\Delta V}{V_1} \times 100$
56 ± 0.7	33.33 ± 3.36	10.08
111 ± 0.7	32.22 ± 12.22	37.94
167 ± 0.7	31.67 ± 20.00	63.16
222 ± 0.7	15.56 ± 13.33	85.71
278 ± 0.7	11.11 ± 5.56	50.00

Com este conjunto de dados calcula-se a média do volume deslocado para o método Ponto a Ponto e o Evolutivo e os resultados apresentam-se na tabela 4.13, considerando

só as medidas das primeiras três vazões porque nas duas últimas os “volumes mortos” envolvidos são muito grandes.

Tabela 4.13: Volumes medios calculados para as três primeiras vazões

Método	$(V \pm \Delta V) \times 10^{-3} l$	$\frac{\Delta V}{V} \times 100$
Ponto a Ponto	$32.4 \pm 12.2$	38
Evolutivo	$32.4 \pm 11.9$	37

Os volumes efetivos das três primeiras vazões são da mesma grandeza, aproximadamente de 33 ml, mas nas duas ultimas vazões o volume efetivo é muito menor o que indica que as distancias dos detectores têm que ser modificadas para poder medir em essas novas condições de fluxo porque o correlator desenvolvido já não permite medir vazões por cima de 600 l/h.

Para reforçar o fato de que as incertezas nas medidas dos tempos de deslocamento estão relacionadas com o aumento dos “volumes mortos”. Quando a vazão de água aumenta, são apresentadas duas series de fotos em diferentes tempos que mostram como o perfil de fluxo se altera na área de medida, o que faz que o volume efetivo de deslocamento do fluido seja menor. Por exemplo, na figura 4.15, apresenta-se o volume efetivo do fluido quando entra, no cano de medida, com uma vazão de  $56 \times 10^{-3} l.s^{-1}$ . O corante adicionado para ajudar na visualização do efeito, tende a ocupar todo o volume dentro do tubo mais rapidamente do quando a vazão é de  $278 \times 10^{-3} l.s^{-1}$ , como mostra a figura 4.16, onde a tinta vermelha demora mais para ocupar todo o volume dentro do tubo. Isso explica-se por que ao aumentar a vazão, as incertezas das medidas foram também maiores.

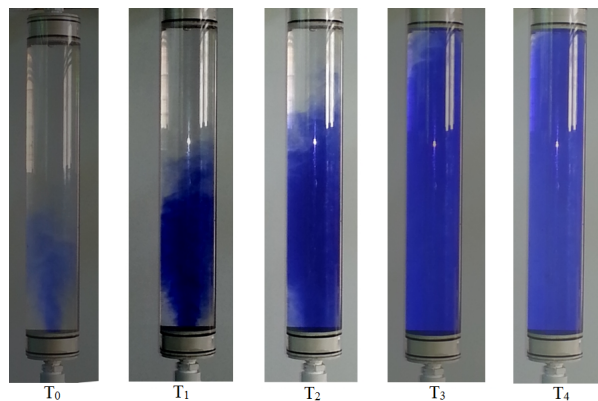


Figura 4.15: Foto que apresenta a entrada do fluido dentro do tubo de medida durante o escoamento com vazão de  $56 \times 10^{-3} l.s^{-1}$ , em diferentes tempos “t” usando corante azul.

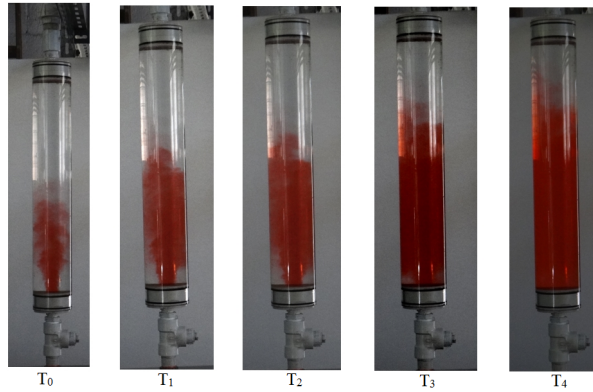


Figura 4.16: Foto que apresenta a entrada do fluido dentro do tubo de medida durante o escoamento com vazão de  $278 \times 10^{-3} \text{ l.s}^{-1}$ , em diferentes tempos “t” usando corante vermelho.

O problema na incerteza da medida também se deve a um problema geométrico e não da técnica de “cross correlation” nem do correlator (software e hardware).

Para esse cumprimento experimental dos detectores teríamos que medir vazões por embaixo de  $56 \times 10^{-3} \text{ l.s}^{-1}$  (200/h).

A relação entre a velocidade máxima,  $v_{max}$ , e a velocidade mínima,  $v_{min}$ , conhecida como rango, equação 4.3, depende da distância entre detectores. Neste caso é possível que as vazões medidas estão fora da faixa do correlator, que é o que acontece nas duas ultimas.

$$R = \frac{v_{max}}{v_{min}} \quad (4.3)$$

A técnica é muito rápida e muito sensível as mudanças do fluxo e ainda quando o rotâmetro indicare que a vazão não muda os resultados no desvío padrão nos tempos de retardo para cada um dos experimentos indicam que a dispersão é muito grande.

Não foi possível determinar o tempo de retardo entre os dois detectores pelo método de transiente de tempo porque a velocidade de deslocamento da água era tão rapida mesmo para a vazão menor, o que fez que os dois dois sinais fiquem tão proximos que foi impossível até mesmo subtrair a radiação de fundo para calcular o tempo médio de deslocamento.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Deste trabalho pode-se concluir que:

O Sistema correlator desenvolvido foi capaz de medir a vazão instantânea pela determinação do tempo de deslocamento de um radiotraçador na água por meio da função de “Cross Correlation”.

Os testes com dados teóricos (simulações) “indicam” que o tempo máximo deve ser usado como o tempo de deslocamento dos sinais.

À Medida que a vazão aumenta em um modelo de difusão, mantendo-se a geometria de medida, a interpretação do tipo de fluxo pode ser baseada no tipo pistão. E torna-se difícil a determinação do tempo de retardo, o que pode ser contornado alterando a distância entre os detectores.

O correlator desenvolvido pode ser usado para medir vazão de água na faixa de 200 a 600  $l/h$ , visto que acima destes valores o volume efetivo muda.

Os cálculos envolvidos são muito mais simples do que os usados pelas técnicas da transformada de Fourier ou de transiente de tempo, que também são técnicas usadas para medir vazão.

Esta metodologia não precisa de calibração dos detectores, nem de pre-tratamento dos dados antes de que os dados sejam processados pelo correlator.

Permite medir vazão em um pequeno comprimento de tubulação o que a faz uma técnica adequada para lugares de espaço reduzido.

## **CAPÍTULO 6**

### **SUGESTÕES**

Estudar o efeito da distância entre detectores

Inserir no correlator o cálculo do tempo máximo

Avaliar a metodologia usando fontes de radiação externa

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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.
- [2] ANP. “AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP)”. Anuario Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2012/07/anuario-estatistico-2011-da-anp-destaca-os-resultados-do-pre-sal>, 2012.
- [3] FRENZEL, F., GROTHEY, H., HABERSETZER, C., et al. *Industrial Flow Measurementv Basics and Practice*. ABB Automation Products GmbH, 2011.
- [4] RIBEIRO, M. *Medição de Petróleo e Gás Natural*. 2 ed. Disponível em:, <http://www.dca.ufrn.br/acari/Sistemas%20de%20Medida/Medicao%20Petroleo%20&%20Gas%20Natural%20a%20ed.pdf>, 2003.
- [5] IAEA. *Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry*. IAEA 316, 1990.
- [6] RAMOS, V. S. *Uso das Técnicas de Radiotraçadores e Contagem Total em Medidas de Vazão de Sistemas Abertos*. Ms.C. dissertação, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [7] CANDEIRO, R. E. M. *Unidade Compacta para Produção de Radiotraçador Gasoso CH382BR e Desenvolvimento de Metodologia Para Inspeção em Instalações Industriais*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [8] GONÇALVES, E. *Desenvolvimento de Metodologia 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.
- [9] BECK, M., PLASKOWSKI, A. *Cross Correlation Flowmeters: Their Design And Application*. 1 ed. Great Britain, Taylor-Francis, 1987.
- [10] ZHENG, C., BENNETT, G. *Applied Contaminant Transport Modeling*. New York, Willey, 1995.

- [11] SEINFELD, J., LAPIDUS, L. *Mathematical Methods in Chemical Engineering*. New Jersey, Prentice-Hall, 1974.
- [12] BECK, M. “Correlation in Instruments: cross correlation flowmeters”, *Instrument Science and Technology*, v. 14, pp. 7–18, nov. 1981.
- [13] LEVENSPIEL, O. *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. New York, Limusa Willey, 2006.
- [14] BRANDÃO, L. E. B. *Otimização de Unidades de Tratamento de Águas Residuais Urbanas e Industriais Empregando-se Traçadores Radioativos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- [15] DANCKWERTS, P. “Continuous Flow Systems-Distribution of Residence Times”, *Chemical Engineering Science*, v. 2, n. 1, pp. 1–18, 1953.
- [16] MAFRA, O. *Técnicas e Medidas Nucleares*. São Paulo, Brasil, Blucher, 1973.
- [17] SALGADO, C. M. *Identificação de Regimes de Fluxo e Predição de Frações de Volume em Sistemas Multifásicos Usando Técnica Nuclear e Rede Neural Artificial*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- [18] NASA. *Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods*. Nasa Handbook NASA-HDBK-8739.19-3, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 2010.