

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO SILVEIRA MORILLA

AUTOMAÇÃO DE BANCADA PARA SISTEMA DE
TRANSPORTE DE ÓLEO PESADO POR
CORE ANNULAR FLOW

SANTOS/SP

2015

RODRIGO SILVEIRA MORILLA

**AUTOMAÇÃO DE BANCADA PARA SISTEMA DE TRANSPORTE
DE ÓLEO PESADO POR *CORE ANNULAR FLOW***

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para a obtenção de título de mestre no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Heraldo Silveira Barbuy e co-orientação da Profa. Dra. Karina Tamião de Campos Roseno.

SANTOS/SP

2015

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Morilla, Rodrigo Silveira.

Título principal : Automação de bancada para sistemas de transporte de óleo pesado por core annular flow / Rodrigo Silveira Morilla. 2015.
n. de f 85.

Orientador: Heraldo Silveira Barbuy.

Coorientador: Karina Tamião de Campos Roseno.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2015.

1. Transporte óleo-água. 2. fluxo bifásico *core annular flow*. 3. Automação. 4. sensor piezoelétrico. I. Barbuy, Heraldo Silveira. II. Roseno, Karina Tamião de Campos. III. Automação de bancada para sistemas de transporte de óleo pesado por core annular flow.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

DEDICATÓRIA

À

*Minha esposa Sylvia, meus pais e meu irmão, o
alicerce da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Aos meus pais, José Carlos Morilla e Sonia Regina Silveira Morilla pelo exemplo de vida, família e por se tornarem a base da minha vida.

Ao Prof. Heraldo Silveira Barbuy pela orientação no presente programa de mestrado.

À Professora Karina Tamião de Campos Roseno pela coorientação neste programa de mestrado.

Ao meu incansável amigo Bruno Simões de Abreu que me apoia insistentemente desde os tempos de faculdade pela companhia e apoio durante o presente programa.

Aos mestres e companheiros do curso de Mestrados, pela experiência de vida e pelo convívio durante estes anos.

Aos técnicos de laboratório da Universidade Santa Cecília Volnei e Heverton pela ajuda inestimável.

A minha amada esposa Sylvia dos Santos Candido Morilla pela paciência, apoio, por entender a minha ausência em determinadas horas para que eu pudesse realizar este trabalho e principalmente pela oportunidade de poder conviver com ela.

RESUMO

O escoamento de fluidos monofásicos em tubulações industriais permite o uso de uma gama de diferentes instrumentos de medição de vazão ou pressão que são inadequados para escoamento bifásico, por causarem emulsão. Entretanto, devido a aproximadamente 50% da produção nacional de petróleo ser classificada como óleo pesado, uma técnica conhecida como *Core Annular Flow* (CAF), que consiste no transporte de óleo através de uma camada de água, apresenta-se como uma solução viável para a grande perda de carga que ocorre no transporte monofásico do óleo. Este trabalho faz um estudo experimental da utilização de um sensor piezoelétrico como sensor de vazão em uma malha de controle de escoamento bifásico. Com o mesmo sensor foi identificada a transição do regime laminar para o turbulento, à proporção que foi aumentada a vazão. Foi estabelecido um valor do sinal de referência ("*set point*") de modo a operar com vazão próxima da máxima possível em regime laminar. Obtém-se assim escoamento próximo do máximo, sem emulsão. O procedimento apresentado pode contribuir para o transporte de petróleo pesado em dutos e no escoamento bifásico denominado "*core flow*".

Palavras -Chave: Transporte óleo-água. Fluxo bifásico. *Core annular flow*. Automação. Sensor piezoelétrico. Controle de vazão.

ABSTRACT

The single-phase fluid flow in industrial pipes allows the use of a range of different flow or pressure measuring devices that are inappropriate for two-phase flow, by causing emulsion. However, due to approximately 50 % of national oil production be classified as heavy oil, a technique known as Core Annular flow (CAF), which consists of the transport oil through a water layer, presents itself as a viable solution for the large head loss that occurs in the oil-phase transport. This work proposes a practical study of the use of a piezoelectric sensor as flow sensor in a control loop of two-phase flow. With the same sensor was identified the transition from laminar to turbulent and the proportion that the flow rate was increased. It was defined a set point to operate near the maximum possible flow in a laminar regime. It is thus obtained close to the maximum flow without emulsion. The presented procedure can contribute to the heavy oil transportation pipeline, the so-called two-phase flow core annular flow.

Keywords: Oil-water transportation. Two-phase flow. Core Annular Flow. Automation. Piezoelectric sensor. Flow control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Exemplo de padrão de escoamento <i>Core Annular Flow</i> .	17
Figura 2-1 – Padrão de escoamento típico para tubos horizontais óleo/água	21
Figura 2-2 – Esquema do aparato experimental de Reynolds	22
Figura 2-3 – Experimento de Reynolds	23
Figura 2-4 – Diagrama de blocos típico de um sistema de controle com realimentação.	24
Figura 2-5 – Bancada de ensaios para sistema de controle de pressão por malha fechada.	25
Figura 2-6 – Diagrama de sistema de controle em malha aberta.	26
Figura 2-7 – Válvula de recirculação.	27
Figura 2-8 – Esquema de instalação de válvula de recirculação.	28
Figura 2-9 – Válvula de controle automática.	28
Figura 2-10 – Esquema de posicionamento dos instrumentos de medição.	31
Figura 2-11 – Medidores de vazão por restrição.	32
Figura 2-12 – Medidores lineares.	33
Figura 2-13 – Medidores de velocidade local.	34
Figura 2-14 – Sonda condutiva de fios paralelos.	37
Figura 2-15 – Princípio de medição com micro-ondas.	38
Figura 2-16 – Esquema de densímetro de raio- γ .	39
Figura 2-17 – Incerteza de fração de vazio para várias energias de raios-X e corrente de tubo fixa 4mA.	40
Figura 2-18 – Tipos de eletrodos utilizados.	41
Figura 2-19 – Esquema bancada para calibração de sensor capacitância	42
Figura 2-20 – Efeito piezoelétrico e seu inverso.	43
Figura 2-21 – Exemplo de cerâmicas piezoelétricas.	44
Figura 2-22 – Deformação do sensor piezoelétrico.	45
Figura 3-1 – Bancada não automatizada.	46
Figura 3-2 – Cesta de pré-separação.	47
Figura 3-3 – Injetor de óleo em acrílico.	47
Figura 3-4 – Rotâmetro.	48
Figura 3-5 – Manômetros utilizados.	49
Figura 3-6 – Esquema de bancada.	50

Figura 3-7 – Esquema de instalação dos circuitos desenvolvidos.	51
Figura 3-8 – Inversores de frequência utilizados no experimento.	52
Figura 3-9 – Placa do circuito controlador que usa amplificador operacional LM 741.	52
Figura 3-10 – Placa amplificadora e retificadora do sinal do sensor piezoelétrico. ...	53
Figura 3-11 – Pontos de detecção dos padrões de vibração.	54
Figura 3-12 – Detalhe da localização do sensor à jusante do injetor.	55
Figura 3-13 – Detalhe do ponto de instalação do sensor após a primeira curva.	55
Figura 3-14 – Gráfico de resposta dos sensores.	57
Figura 3-15 – Esquema de montagem dos circuitos.	57
Figura 3-16 – Diagrama do circuito para amplificar a tensão de saída do sensor.	58
Figura 3-17 – Circuito retificador e filtro do sistema sensor.	58
Figura 3-18 – Circuito controlador Proporcional Integral (PI).	59
Figura 3-19 – Comparação entre onda de saída do circuito amplificador de sinal e do circuito retificador de onda.	62
Figura 3-20 – Detalhe da figura 3-13 mostrando a tubulação após o processo de limpeza.	63
Figura 3-21 – Fluxograma de processo da bancada automatizada.	65
Figura 3-22 – Emulsão fotografada durante regime turbulento.	66
Figura 4-1 – Vazão de água em função da frequência do inversor de água.	69
Figura 4-2 – Vazão de óleo em função da frequência do inversor de água.	69
Figura 4-3 – Relação entre as vazões de óleo e água.	70
Figura 4-4 – Coeficiente de variação.	72
Figura 4-5 – Resposta do sensor até regime turbulento.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Resumo das principais características dos métodos de medidas de vazão clássicos.....	35
Tabela 3-1–Tensão emitida pelo sensor piezoelétrico para determinação de padrão de vibração	56
Tabela 4-1 – Resultado dos experimentos.	68
Tabela 4-2 – Resultados obtidos durante o experimento.	70
Tabela 4-3 – Desvios padrão para as vazões de água e óleo.	71
Tabela 4-4 – Coeficiente de variação para os valores de pressão de óleo, vazão de água e vazão de óleo.....	71
Tabela 4-5 – Resposta do sensor até regime turbulento.	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	-Área.
A	-Constante de conicidade do tubo.
ANP	-Agência Nacional de Petróleo.
API	- <i>Americam Petroleum Institute</i> .
EUA	-Estados Unidos da América.
C	-Coeficiente de ajuste empírico de descarga.
C_r	-Coeficiente de resistência.
CAF	- <i>Core Annular Flow</i> .
CLP	-Computador Lógico Programável.
CNTP	-Condições Normais de Temperatura e Pressão.
cP	-Centipoise, unidade utilizada para expressar viscosidade dinâmica equivalente a 1/1.000 kg/m.s (SI).
cm²	-Centímetro quadrado, unidade derivada do SI, utilizada para determinação de áreas (superfície).
Dt	-Diâmetro interno tubo.
f	-Frequência.
F	-Letra utilizada para representar uma força.
H	-Hora, unidade de tempo (SI), equivalente a 3600 segundos.
Hp	- <i>Horse Power</i> , unidade de potência do sistema inglês, equivalente a 745,7N.m/s.
Hz	-Hertz, unidade derivada do SI, utilizada para a determinação de frequência, equivalente a 1 ciclo por segundo.
I₀	-Intensidade de raios γ incidente.
ISA	- <i>International Society of Automation</i> .
Kg	-Quilograma, unidade de massa equivalente a 1.000 gramas (SI).
Kgf	-Quilograma força, é uma unidade definida pela força de uma massa de 1 kg, sujeita a ação da gravidade. Adota-se a equivalência de 1 kgf = 9,80665 N (SI).
K_i	-Ganho integral do controlador.
K_p	-Ganho proporcional do controlador.
L	-Litro, unidade de volume.
LPM	-Litros por minuto.
m	-Metro, unidade de comprimento, equivalente a 100 cm (SI).
m²	-Metro quadrado, unidade derivada do SI, utilizada para determinação de áreas (superfície).
m³	-Metro cúbico, unidade derivada do SI, utilizada para determinação de volume, equivalente a 1.000 litros.
min	-Minuto, unidade de tempo (SI), equivalente a 60 segundos.
mm	-Milímetro, unidade de comprimento equivalente à 1/1.000 metro (SI).
m	-Vazão mássica.

<i>n</i>	-Rotação da bomba.
N	-Newton, unidade de medida de força, equivalente a 1 kg.m/s ² (SI).
N_x	-Letra utilizada para representar a rotação.
p	-Pressão.
Q	-Letra utilizada para representar a vazão de um fluido.
rpm	-Rotações por minuto.
s	- Segundos, unidade de tempo (SI).
SI	-Sistema Internacional de Unidades (CGS).
URSS	-União das Repúblicas Socialistas Soviéticas.
V	-Volt, unidade derivada do SI, utilizada para determinação de tensão elétrica.
V_c	-Tensão elétrica do controlador.
V_x	-Velocidade de escoamento do fluido.
”	-Símbolo utilizado para exprimir medida em polegadas (sistema métrico inglês), unidade equivalente a 0,0254 metros (SI).
β	-Letra grega. Relação de diâmetros.
ε_m	-Letra grega. Atenuação de raios gama.
μ	-Letra grega. Viscosidade.
γ	-Letra grega. Letra grega usada para exprimir o valor da constante usada que define a massa específica de um fluido.
ρ	- Letra grega. Densidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Objetivos gerais.....	18
1.2. Objetivos específicos.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. <i>Core Annular Flow</i>	20
2.2. Comportamento mecânico de escoamentos laminar e turbulento de fluidos	22
2.3. Automação por sistemas de controle em malha fechada.....	23
2.3.1. Controle por realimentação	23
2.3.2. Controle de grandeza física em malha aberta	25
2.4. Controle de fluxo por velocidade variável ou VSD (<i>variable speed drive</i>)	26
2.4.1. Controle por drenagem do fluido - Válvula de recirculação	27
2.4.2. Controle por abertura de válvula	28
2.5. Controladores.....	29
2.5.1. Controlador proporcional (P)	29
2.5.2. Controlador Proporcional e Integral (PI)	30
2.6. Medidores de vazão	30
2.6.1. Métodos diretos	31
2.6.2. Métodos de restrição de fluxo	32
2.6.3. Medidores de fluxo lineares	33
2.6.4. Medidores de velocidade Local	34
2.7. Métodos de medição de fração de componentes	36
2.7.1. Sonda condutiva de fios paralelos.....	36
2.7.2. Método por micro ondas.....	37
2.7.3. Ultrassom.....	39

2.7.4. Densimetria de raios gama	39
2.7.5. Capacitância	40
2.8. Sensores piezoelétricos	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1. Apresentação do modelo de bancada existente	46
3.1.1. Arranjo físico e componentes da bancada	46
3.2. Sistemas desenvolvidos	51
3.3. Materiais	52
3.4. Métodos	53
3.4.1. Escolha dos pontos de instalação do sensor piezoelétrico a analisar	53
3.4.2. Detecção da amplitude de sinal dos sensores piezoelétricos	56
3.4.3. Montagem dos circuitos.	57
3.4.4. Procedimento pré-experimental	61
3.4.5. Procedimento experimental	62
3.4.6. Simulação de regime turbulento	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1. Automação da unidade de <i>core-flow</i>	67
4.2. Resultados obtidos na simulação do regime turbulento	72
5. CONCLUSÃO	75
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXO A – Data sheet	84

1. INTRODUÇÃO

É comum se encontrar escoamentos multifásicos na extração de óleo nos poços e nos dutos de produção sendo conhecido que este tipo de deslocamento é possível em tubos verticais, inclinados ou horizontais. Como esta extração de óleo é realizada em parte no mar, a mistura de gás e as fases líquidas do óleo são transportadas por longas distâncias até que sejam separadas, e então a perda de carga no dimensionamento destes dutos é um fator importante (SILVA, 2000).

Para que um óleo seja classificado pesado, seu grau API (*American Petroleum Institute*) deve ser baixo (entre 10° e 20°) e sua viscosidade deve ser alta (de 100cP – 10000cP). O grau API é definido por:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\gamma^{\circ}} - 131,5 \quad (1.1)$$

sendo γ° o peso específico relativo do óleo (medida na CNTP – condições normais de temperatura e pressão).

De acordo com dados divulgados em 2 de setembro de 2013, a produção nacional de óleo equivalente é de 2,5 milhões de barris (ANP, 2013). As reservas nacionais confirmadas são da ordem de 14,09 bilhões de barris de óleo equivalente, sendo que aproximadamente 50% deste montante apresenta grau API inferior a 20°. Devido a grande quantidade de óleo pesado, se faz necessário o desenvolvimento de tecnologias para transporte, aprimoramento da produção e do refino. Suas características de fluidez dificultam sua extração e transporte através de tubulações.

O transporte deste óleo pesado tem despertado grande interesse. Assim sua dificuldade de bombeio tem levado ao desenvolvimento de novas técnicas e ao aperfeiçoamento de antigos procedimentos. O *core annular flow* (CAF), técnica utilizada em um oleoduto da *Shell* próximo a cidade de *Bakersfield, Califórnia*, foi implementado na década de 70 e operou durante 12 anos transportando óleo cru a uma vazão de cerca de 24.000 barris/dia (MELLO, 2013).

A técnica de *core annular flow* utilizada no oleoduto da *Shell*, faz uso da imiscibilidade que há entre o óleo e a água e de a densidade do óleo ser menor que a da água. Assim, o fluido menos viscoso (água) deve formar uma camada em torno do mais viscoso (óleo), lubrificando a passagem pela tubulação em que escoam,

reduzindo drasticamente a perda de carga devido a amenizar o atrito entre o fluido mais viscoso e a tubulação. A figura 1.1 ilustra o escoamento em questão.



Figura 1-1 – Exemplo de padrão de escoamento *Core Annular Flow*.

Este padrão de escoamento evita a necessidade do reaquecimento do óleo cru ao longo do trajeto. O aquecimento é executado para a redução da viscosidade, facilitando o transporte. Entretanto, existe uma grande dificuldade em manter o padrão ao longo do percurso devido a necessidade de controle preciso desta operação e também a topografia do percurso (BANNWART *et al.*, 2004).

O desenvolvimento de uma tecnologia para o transporte do óleo é um grande desafio, uma vez que sua viscosidade elevada dificulta seu escoamento em dutos. Assim, boa parte das propostas de desenvolvimento para escoamento deste tipo de óleo, tem como objetivo a diminuição dos efeitos viscosos. Estes envolvem, por exemplo, a adição de calor, de óleo leve e a formação de emulsões (VARA, 2001).

O controle deste sistema é dificultado pela ausência de equipamentos capazes de monitorar o padrão ao longo da tubovia. Novas técnicas de detecção do padrão *core annular flow* tem sido desenvolvidas, entretanto sem atingir os resultados esperados por seus idealizadores (VARA, 2001).

No decorrer deste trabalho, no capítulo 2 são abordados tópicos pesquisados para o desenvolvimento do sistema de controle de vazão, que incluem uma descrição do *sistema core annular flow*, a diferença do comportamento mecânico entre os escoamentos laminar e turbulento, sistemas de controle por

malha fechada, sistemas de controle utilizando controlador proporcional-integral, controle de fluxo por bombeamento com velocidade variável ou VSD (*variable speed drive*), medidores de vazão, métodos de medição de vazão por frações e sensores piezoelétricos.

No capítulo 3, apresenta-se uma unidade de bancada de *core-flow*, os sistemas desenvolvidos para o controle de vazão de óleo e água, e os materiais e métodos utilizados nos experimentos deste trabalho.

No capítulo 4 foram apresentados os resultados obtidos e apresentadas as discussões dos mesmos.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões e no capítulo 6 são sugeridos assuntos para trabalhos futuros.

1.1. Objetivos gerais

Este trabalho teve como objetivo geral a automação de uma unidade de bancada do *Core Annular Flow* projetada e instalada no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília. A pesquisa propõe a detecção do padrão de escoamento por sensores piezoelétricos, visando o controle da velocidade de bombeamento para operar em escoamento laminar.

1.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos apresentam-se:

- Escolha da localização e instalação dos sensores de vibração;
- Levantamento dos padrões de vibração através da instalação de sensores piezoelétricos para identificar transição do escoamento laminar para escoamento turbulento do sistema, conforme a vazão é aumentada;
- Desenvolvimento de um sistema eletrônico retroalimentado no qual seja possível regular a velocidade das bombas de óleo e água e a proporção entre as mesmas;
- Permitir o aumento da rotação das bombas simultaneamente através de apenas um comando;

- Identificar o ajuste do valor de referência ou “*Set Point*” da velocidade de bombeamento, de modo a operar próximo à vazão máxima possível com escoamento laminar;
- Incluir na bancada um circuito eletrônico permanente;
- Transportar o óleo pesado sem que ocorra a emulsão com a água do sistema e sem a interferência humana.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. *Core Annular Flow*

Uma das primeiras tecnologias desenvolvidas para o escoamento de óleos pesados foi o *Core-flow*. Esta tem como objetivo injetar água junto as paredes do tubo fazendo com que o óleo permaneça no centro do fluxo. Com este fenômeno, ocorre então a diminuição da resistência ao escoamento do óleo no tubo, reduzindo assim a potência requerida para o bombeamento e a pressão interna do tubo. Este padrão de escoamento tem sua grande importância devido a drástica redução de perdas de carga, chegando ao patamar esperado para um escoamento contendo apenas água na tubulação (VARA, 2001).

O *Core Annular Flow* foi inicialmente desenvolvido por Isaacs e Speed em 1904 para o transporte de líquidos altamente viscosos.

Calvert e Williams (1955) propuseram algo utilizado amplamente ainda nos dias de hoje nos campos de produção de petróleo, ou seja, o ar utilizado para deslocar positivamente a água no tubo no sentido da extração, e assim elevar o óleo juntamente. Nestes experimentos foram observados padrões visuais de comportamento água/óleo.

Kiel (1968), obteve a patente para a Empresa Norte Americana Exxon de um sistema de injeção de óleo pesado em emulsão de água e óleo, nos padrões CAF para extração tendo em vista aumentar a produção de óleo e gás.

Lamb e Simpson (1973) reportam um oleoduto com extensão de 238 km, localizado na Indonésia, capaz de transportar 40.000 barris por dia de petróleo através de uma emulsão de água e óleo por um tubo de diâmetro igual à 500 mm.

Olimans e Ooms (1986) através da revisão dos modelos supracitados, da diluição do óleo em solventes e da instalação de estações intermediárias de aquecimento fez experiências com os padrões CAF em tubos de 1 polegada a 8 polegadas de diâmetro e com óleo de viscosidade de 500 cP e densidade de 900 kg/m³. Foi concluído que o escoamento com o tubo de maior diâmetro (8") e com o escoamento em fluxo laminar se mostrou mais eficaz.

As diversas características dos padrões de escoamento apresentados durante o experimento foram analisadas por Joseph, Chen e Renardy (1997). Todos os tipos foram observados tanto para escoamento horizontal quanto vertical, e se mostraram fruto das variações de velocidade e pressão dos fluidos. A figura 2-1 ilustra os padrões encontrados.

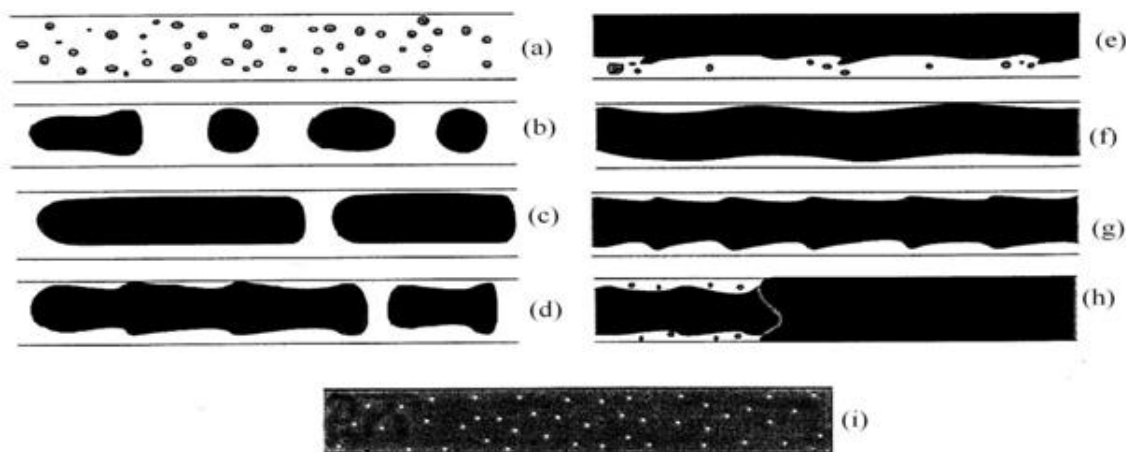


Figura 2-1 – Padrão de escoamento típico para tubos horizontais óleo/água (a) Dispersão ou emulsão de óleo em água; (b) Gotas alargadas ou esféricas de um fluido em outro; (c) Intermitente; (d) Intermitente; (e) Estratificado; (f) Anular ondulado; (g) *Wavy Core Annular Flow*, *Core-Flow* ou *Bamboo Waves*; (h) *Wavy Core Annular Flow*, com dispersão de bolhas; (i) Dispersão de água em óleo (JOSEPH, CHEN, RENARDY, 1997).

O escoamento *Core flow*, dentre todos os possíveis para o escoamento de óleo lubrificante com a adição de água, é o padrão que possui maior razão de vazão de óleo por perda de carga, aumentando a eficiência do transporte de óleos viscosos (RUSSEL E CHARLES, 1959).

Tubulações para o transporte de fluidos viscosos como óleo cru, que sejam lubrificadas com água, são viáveis e tem alto potencial econômico. Estes óleos geralmente são mais leves (menos densos) que a água, embora não seja incomum a existência de óleos mais pesados (mais densos) que a água (BAI; JOSEPH, 2000).

Uma série de experimentos foram realizados por Russel (1959) e Charles *et al.* (1961), os quais descobriram que o menor gradiente de pressão ocorre quando a razão de injeção de água é de 30 a 40% para o óleo em questão.

Através da modelagem numérica, utilizando-se do método dos volumes finitos para a descrição da geometria da interface do escoamento *Core-flow*, BAI e Joseph (2000) desenvolveram a teoria de perturbação para o escoamento estável de uma fase dispersa e viscosa que foi aplicado ao *Core-flow* e obtiveram resultados satisfatórios.

Biazussi (2010), utilizou técnicas avançadas de captação de imagem com câmeras de alto desempenho para identificar a espessura do filme de água e assim desenvolver um instrumento capaz de medir o fluxo na mesma tubulação.

Mello (2013), projetou e construiu uma bancada para a elaboração de sua pesquisa e realizou testes experimentais para a determinação da potência consumida pela bomba no transporte de mistura bifásica (água e óleo). No entanto, esta unidade necessita ainda de um sistema automatizado com coleta de dados automática.

2.2. Comportamento mecânico de escoamentos laminar e turbulento de fluidos

A partir do experimento de Reynolds em 1883 foi possível diferenciar o tipo de escoamento. Os experimentos foram realizados utilizando um reservatório cheio de água, a qual escoava através de um tubo conectado ao reservatório. Uma agulha posicionada dentro do tubo injetava um corante dentro da tubulação permitindo a observação do escoamento do fluido (ROCHA *et al.* 2014). A figura 2-2 ilustra o aparato de Reynolds utilizado em seus experimentos.

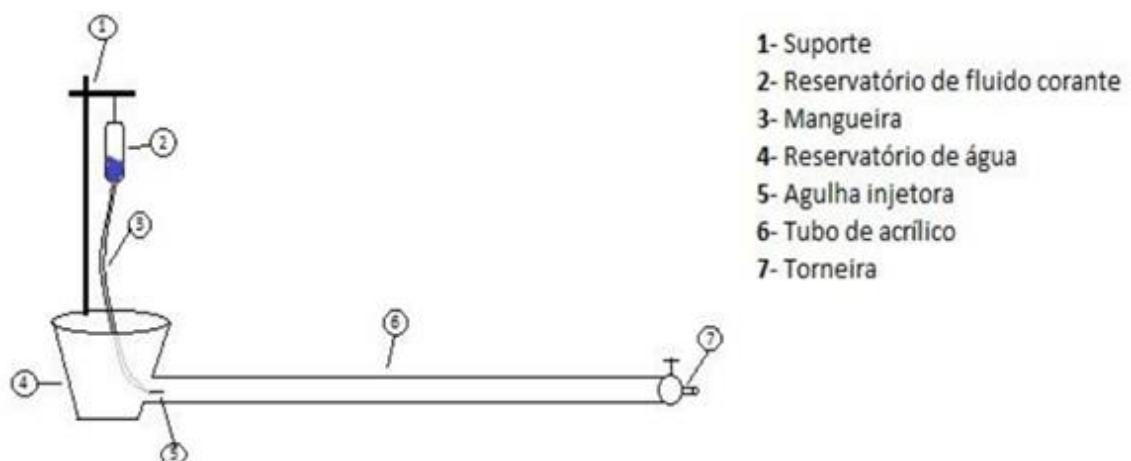


Figura 2-2 - Esquema do aparato experimental de Reynolds (ROCHA *et al.*, 2014).

A partir das observações dos experimentos realizados por Reynolds os escoamentos foram classificados em dois tipos, escoamento laminar e turbulento. A diferença entre o comportamento dos escoamentos é ilustrado na figura 2-3.

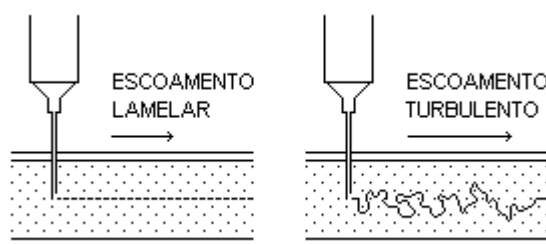


Figura 2-3 - Experimento de Reynolds (Soares, 2013).

Para as velocidades baixas, as linhas de correntes apresentaram um comportamento de laminas paralelas, formando um único fio de tinta na água ao longo do tubo.

Com o aumento da velocidade de escoamento da água, foram percebidas oscilações na tinta até o aparecimento de pequenos vórtices (turbilhonamentos). A faixa de vazão em que as ondulações ocorrem é chamado de transição do regime laminar para o regime turbulento.

2.3. Automação por sistemas de controle em malha fechada

Os controles automáticos de processos foram desenvolvidos para melhorar a eficiência. As estratégias de controle utilizam ferramentas como controladores, sensores, interligação com outras malhas de controle ou até mesmo parâmetros pré-estabelecidos para tomarem ações mecânicas ou lógicas tendo como objetivo principal que uma variável dinâmica se mantenha constante através da correção ou alteração desta ou de outras variáveis com as quais tenha interação.

Para que a variável dinâmica se mantenha no intervalo desejado, pode-se optar por diferentes estratégias de controle, dentre as quais se destacam a retroalimentada ou de Controle por Realimentação e a por Controle Antecipatório.

2.3.1. Controle por realimentação

Um sistema de controle realimentado de uma grandeza física, processado analogicamente, consiste na sua regulação a cada instante, através da comparação entre um sinal de referência $r(t)$ ou de valor desejado com o sinal de medida $m(t)$ da

variável controlada, produzido por um sistema sensor. A diferença entre o sinal de referência e o sinal de medida é chamada de sinal de erro ε ou $e(t)$ ou erro atuante. O sinal de referência é também denominado sinal de comando, *set point signal*, SP, e o sinal de medida é denominado *process value*, PV. O sinal de erro determina o esforço corretivo, procurando diminuir ou anular a diferença entre a referência e a medida. O sinal de erro age na entrada do sistema controlador, cuja saída é a variável de controle $v_c(t)$. A variável de controle aciona o primeiro estágio da planta fixa do sistema, que contém o elemento atuador sobre a variável controlada $c(t)$ ou $y(t)$. O conjunto controlador e planta fixa é denominado de sistema atuador. A figura 2-4 apresenta um diagrama típico de um sistema de controle por realimentação.

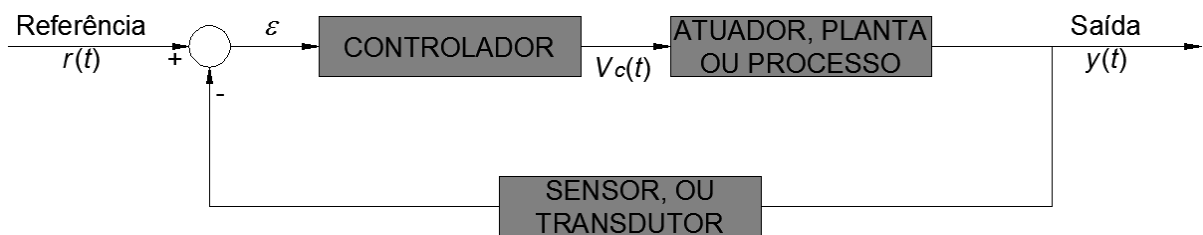


Figura 2-4 - Diagrama de blocos típico de um sistema de controle com realimentação (Leonardi, Maya, 2011).

No diagrama da figura 2-4, o controlador recebe o sinal de referência e o sinal de medida e, através da comparação dos dados recebidos produz o sinal de erro, o qual processado pelo controlador ajusta continuamente a variável de controle.

No caso de se desejar manter a variável controlada constante no sistema de controle a realimentação é chamada de regulador. Neste caso o sinal de referência é ajustado em correspondência ao valor desejado da variável controlada, assim o sinal de referência será constante ou degrau.

Um exemplo típico da utilização de sistemas realimentados é a operação de bombas em instalações industriais nas quais é necessário um controle da vazão. A figura 2-5 apresenta o fluxograma de processo para a aplicação em bombas.

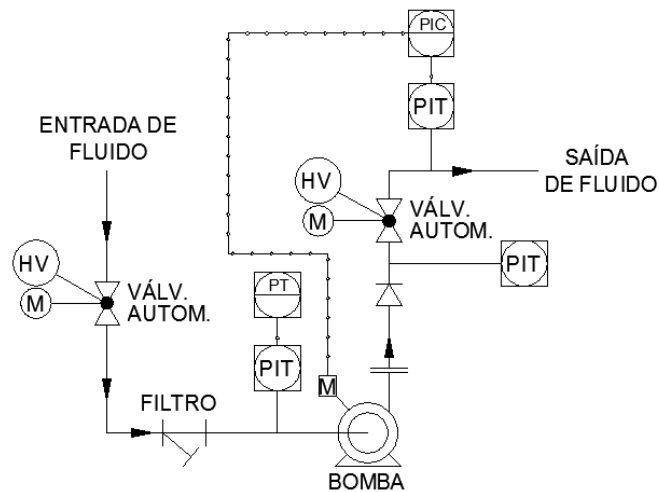


Figura 2-5 – Bancada de ensaios para sistema de controle de pressão por malha fechada.

No diagrama da figura 2-5, a bomba é de velocidade variável. O ajuste do sinal de referência $r(t)$, a comparação com o sinal de medida $m(t)$ e o controlador estão contidos no bloco PIC, cuja saída que é a variável controlada $v_c(t)$ que determina a frequência do inversor que age sobre o motor de indução (inversor e motor simbolizados pelo bloco M) e o motor age sobre a bomba centrífuga. O conjunto inversor, motor e bomba, além da tubulação constituem a planta fixa. O sistema sensor é constituído pelo bloco PIT que está conectado ao PIC. Neste exemplo o sistema sensor se baseia na pressão interna da tubulação para determinar a vazão. O processo descrito ocorre após a abertura das válvulas motorizadas HV.

2.3.2. Controle de grandeza física em malha aberta

No caso do controle de grandeza física em malha aberta, o sinal de entrada da planta fixa, determina o valor da grandeza física a ser controlada, em determinada condição de temperatura ambiente, características do produto e outros parâmetros. Nestas condições, a variável controlada é ajustada para um valor adequado. O sinal de referência, o comparador e o controlador não são utilizados e o sistema sensor poderá permanecer apenas para indicação do valor da variável controlada. Entretanto, temperatura ambiente, produto e outros parâmetros sofrem alterações que acarretam mudança do valor da variável controlada, pois a variável de controle está fixada. Em um sistema realimentado estas variações seriam compensadas através da reajuste automático da variável de controle (entrada da planta fixa). No caso de controle de vazão, a temperatura pode alterar a

viscosidade, ou fluido pode ter características como sua densidade alterada no decorrer do tempo. A figura 2-6 apresenta um diagrama de circuito de controle por malha aberta.

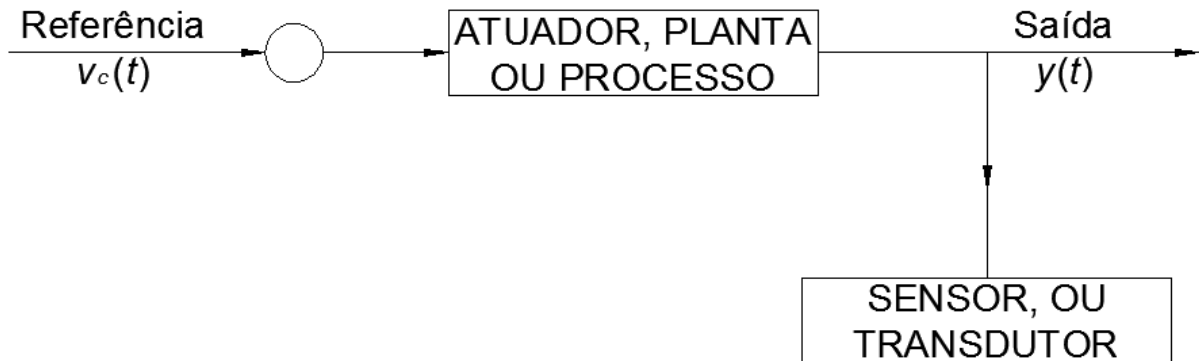


Figura 2-6 - Diagrama de sistema de controle em malha aberta.

2.4. Controle de fluxo por velocidade variável ou VSD (*variable speed drive*)

A variável controlada vazão pode ser ajustada por meio de bombeamento com velocidade variável. Pode-se fazer o mesmo para a variável controlada pressão interna da tubulação. No caso de ocorrer, por exemplo, uma momentânea diminuição da variável controlada, a rotação da bomba é incrementada para recuperar o valor desejado. Este foi o método utilizado neste trabalho, para controle de vazão, tanto do óleo como da água.

No diagrama da figura 2-5, o sensor de vazão toma por base a medição da pressão interna da tubulação. Existem outros tipos de sensores de vazão em que se baseiam em pressão, muitas vezes em pressão diferencial causada por uma restrição de fluxo. Existem também outros tipos de sistemas sensores de vazão que não se baseiam na pressão.

O VSD apresenta como relação entre vazão e rotação da bomba a equação (2.1):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad (2.1)$$

Nos quais Q_1 é vazão inicial, Q_2 é a vazão final, N_1 é rotação inicial da bomba e N_2 é a rotação final da bomba.

Existem outras maneiras de controle de vazão ou de pressão em tubulações através da utilização de válvulas de recirculação ou de válvulas de controle.

2.4.1. Controle por drenagem do fluido - Válvula de recirculação

Para o controle por drenagem de fluido, as válvulas de recirculação (figura 2-7) são instaladas diretamente na descarga de bombas. A velocidade da bomba é mantida constante e a pressão ou a vazão são controladas mecanicamente através do retorno de parte do fluido da tubulação para o reservatório. Este sistema pode ser utilizado, separadamente, para o bombeamento de óleo e para o bombeamento de água, antes da formação do fluxo bifásico (*core annular flow*).

Este sistema evita que ocorra pressão excessiva no rotor da bomba, evitando assim a consequente cavitação. A figura 2-8 apresenta um esquema de instalação da válvula de recirculação. As válvulas de recirculação possuem custo elevado, porém baixa manutenção.

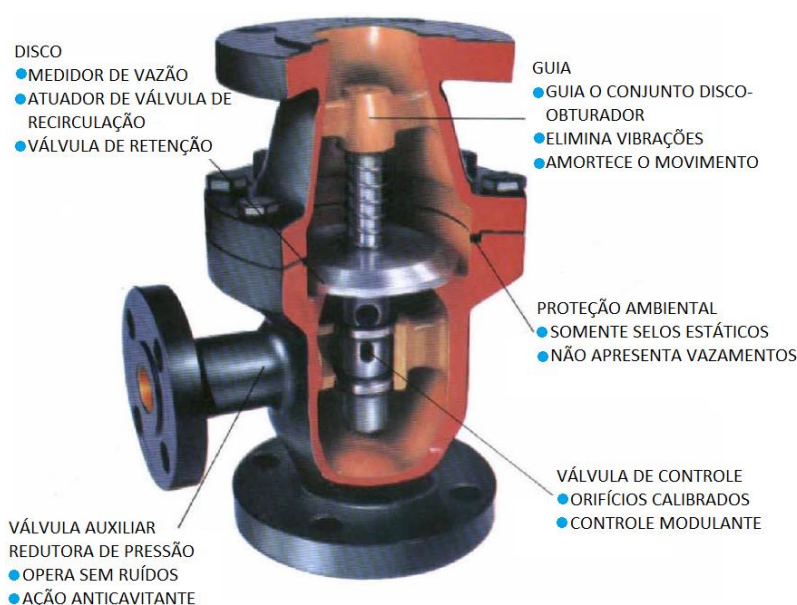


Figura 2-7 - Válvula de recirculação. Fonte: (DURCON, 2014).

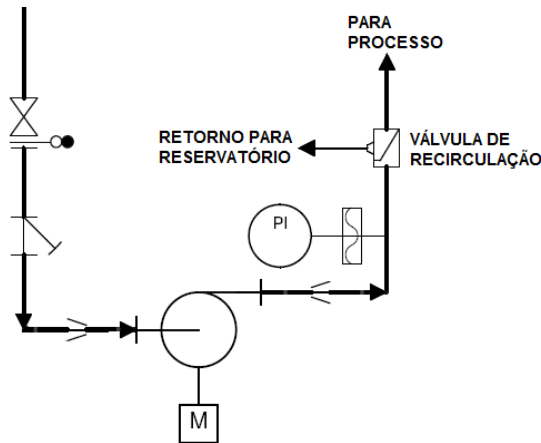


Figura 2-8 – Esquema de instalação de válvula de recirculação.

Na figura 2-8, M é o motor da bomba com rotação constante e PI é um instrumento indicador de pressão.

2.4.2. Controle por abertura de válvula

O controle de vazão ou pressão pode ser feito por meio de válvulas de abertura proporcional chamadas de válvulas de controle de fluxo (figura 2-9). Estas são instaladas na descarga das bombas de maneira a manter a variável controlada no valor desejado, por meio da alteração de perda de carga.

Este sistema pode ser utilizado, separadamente, para o bombeamento de óleo e para o bombeamento de água, controlando as vazões antes da formação do fluxo bifásico (*core annular flow*). Este sistema pode ser utilizado também para controle de vazão da emulsão de água com óleo, porém não para o controle bifásico pois causaria emulsão.



Figura 2-9 – Válvula de controle automática. Fonte: (VAPORTEC, 2014).

Para o caso de controle de pressão, válvula aplica uma queda de pressão igual à diferença de pressão entre a fornecida e a requerida pelo sistema. Nesta aplicação, a rotação da bomba é constante e deve-se sempre atentar para que não ocorra uma parada total da linha com a bomba ainda em funcionamento (Vaportec, 2014).

2.5. Controladores

O controlador estabelece a relação dinâmica entre a variável de controle $V_c(t)$ com o sinal de erro $e(t)$ já mencionados. Existem diversos tipos de controladores, como por exemplo controlador com filtro de avanço de fase (lead), ou com atraso de fase (Lag), controlador proporcional (P), controlador proporcional e integral (PI) e o controlador proporcional integral e derivativo (PID), são os controladores eletrônicos mais utilizados.

2.5.1. Controlador proporcional (P)

Um controlador proporcional consiste em um amplificador com ganho K_p ajustável e possui uma relação expressa entre a saída $v_c(t)$ do controlador P e o sinal de erro $e(t)$ dado por

$$v_c(t) = K_p e(t) \quad (2.2)$$

no qual, $v_c(t)$ é a saída em relação ao tempo; $e(t)$ é o sinal de erro em relação ao tempo; o fator K_p é denominado ganho proporcional.

Uma importante característica do regulador com controlador proporcional é a existência de um erro residual permanente, para plantas sem polo na origem. O valor do sinal de erro após o transitório inicial de regulação é chamado de erro atuante estacionário, o qual varia de modo inverso com o ganho proporcional K_p . Assim pode-se reduzir o erro por meio do aumento do ganho proporcional, entretanto isto pode prejudicar o transitório de regulação. Pode resultar na diminuição do tempo de estabelecimento (também chamado tempo de acomodação ou *settling time*) do sistema, mas eventualmente pode conduzir a instabilidade (FERNANDES, 2006).

2.5.2. Controlador Proporcional e Integral (PI)

Um controlador proporcional integral (PI) consiste em um amplificador com ganhos K_p e K_I (ganho integrativo) ajustáveis e possui uma relação expressa entre a saída $v_c(t)$ do controlador P e o sinal de erro $e(t)$ por meio da equação (2.3).

$$V_c(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (2.3)$$

Aplicando-se a transformada de Laplace (equação 2.4),

$$V_c(s) = K_p E(s) + K_I \frac{1}{s} E(s) \quad (2.4)$$

$$G_c(s) = K_p E(s) + \frac{K_I}{s} E(s) = \left(K_p + \frac{K_I}{s} \right) E(s) \quad (2.5)$$

O termo integrativo $K_I \int e(t) dt$ acrescentado ao controlador proporcional anterior, permite a correção progressiva ao longo do tempo do erro residual que o controlador proporcional deixaria permanecer. No caso de sinal de referência constante, ou seja, em problemas do tipo regulador, a ação integrativa elimina o erro atuante estacionário.

Conforme a equação 2.5, resulta a função de transferência do controlador PI (equação 2.6):

$$G_c(s) = \frac{V_c(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} = \frac{sK_p + K_I}{s} \quad (2.6)$$

Como se observa na equação 2.6, a função de transferência do controlador apresenta um polo em $s=0$, característico da ação integrativa. Pode-se obter também o zero da função $G_c(s)$, que é " z " = $-\frac{K_I}{K_p}$

O controlador PI é largamente utilizado em sistemas quando um controlador de ação proporcional não tiver a capacidade de reduzir o erro estacionário a um patamar aceitável.

2.6. Medidores de vazão

Para a medição de vazão, deve-se utilizar instrumentos de acordo com as características físicas e químicas do fluido, como por exemplo: quanto a corrosão,

viscosidade, abrasividade, sólidos em suspensão, perfil de velocidade e da condutibilidade elétrica. Outros fatores como custo, precisão de medição e conectividade com sistemas eletrônicos também influem na escolha dos instrumentos.

Para determinados escoamentos, existem também limitações físicas de instalação, como: trecho a montante e jusante do instrumento; orientação da tubulação (horizontal, vertical, ascendente ou descendente); se o instrumento é intrusivo ao fluxo, podendo causar turbulência, ou se é externo, se necessita de redução de diâmetro, etc. A figura 2-10 ilustra instrumentos de medição de fluxo instalados em um sistema de tubulação.

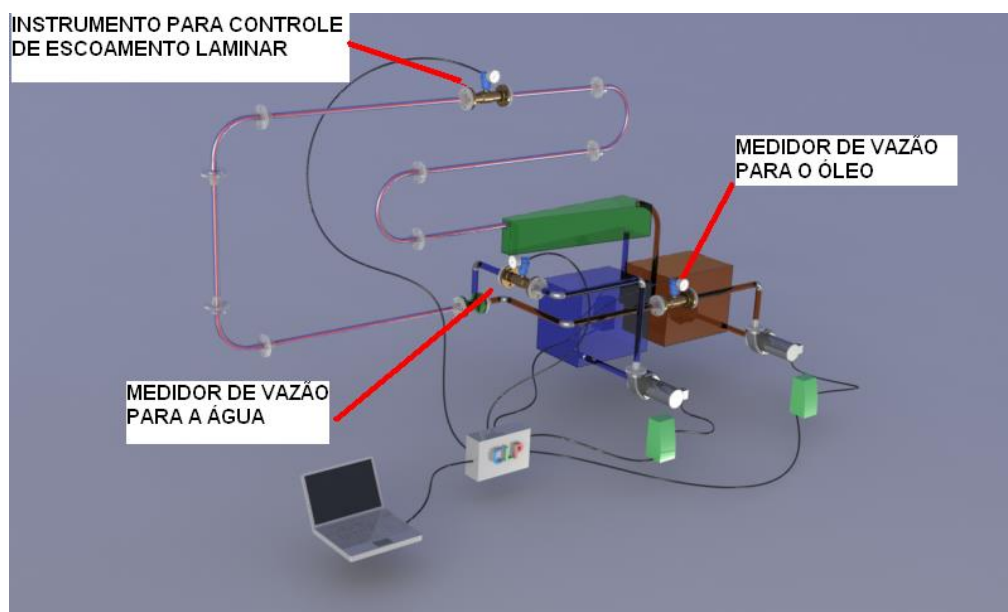


Figura 2-10 - Esquema de posicionamento dos instrumentos de medição.

Pode-se classificar a medição de vazão em quatro tipos (KIN; SHERIF; MCDONALD, 2004):

- Métodos diretos;
- Métodos de restrição de fluxo;
- Métodos de medidores de fluxo lineares;
- Métodos de medidores de velocidade local.

2.6.1. Métodos diretos

O método de medição não contínuo consiste na utilização de reservatórios para a determinação da vazão para escoamento permanente de líquidos, aferindo o

volume de líquido em um determinado intervalo de tempo pré-determinado. Quando o período de tempo é longo pode-se determinar vazões médias precisas.

2.6.2. Métodos de restrição de fluxo

A maior parte dos medidores de vazão por restrição de fluxo (exceto de escoamento laminar) consiste na aceleração de um escoamento de fluido por uma restrição do diâmetro. Os instrumentos mais comuns aplicados são placa de orifício, medidor tipo bocal e o medidor por efeito Venturi. A figura 2-11 apresenta um esquema destes medidores.

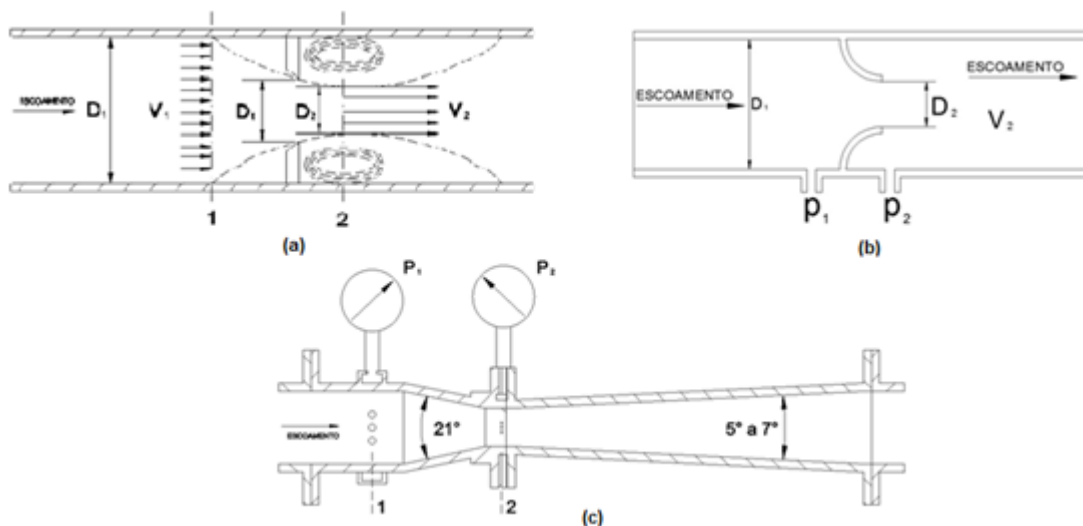


Figura 2-11 - Medidores de vazão por restrição. (a) Placa de orifício; (b) medidor tipo bocal; (c) Medidor por efeito venturi.

Como mostrado na figura 2-11, o fluxo quando passa pela restrição forma uma zona de recirculação (turbulenta) após o anteparo, como mostrado pelas linhas de fluxo. O escoamento principal continua acelerando para formar uma contração conforme a seção 2 da figura 2-11(a), e então desacelera preenchendo o tubo completamente. Na seção 2, a área do fluxo é mínima, as linhas de escoamento do fluido são retas e a pressão é constante na seção transversal do canal (BIAZUSSI, 2010). Este tipo de sensores, também chamado de sensores de deprimogênio, não se aplica para o controle do fluxo bifásico, pois causam emulsão do óleo com a água. Assim, poderiam ser aplicados para controle independente dos escoamentos de água e óleo, antes da formação do fluxo bifásico.

2.6.3. Medidores de fluxo lineares

Medidores de fluxo lineares aferem a vazão de um tubo através da transformação do escoamento em movimentos mecânicos (rotação ou deslocamento). A energia mecânica criada através do escoamento do fluido é então aferida e transformada através de parâmetros de conversão em unidade de vazão. Importante salientar que as propriedades dos fluidos são alteradas por fatores externos como temperatura ou pressão, fazendo-se necessário uma nova calibração do instrumento. A figura 2-12 ilustra os principais medidores por fluxo linear.

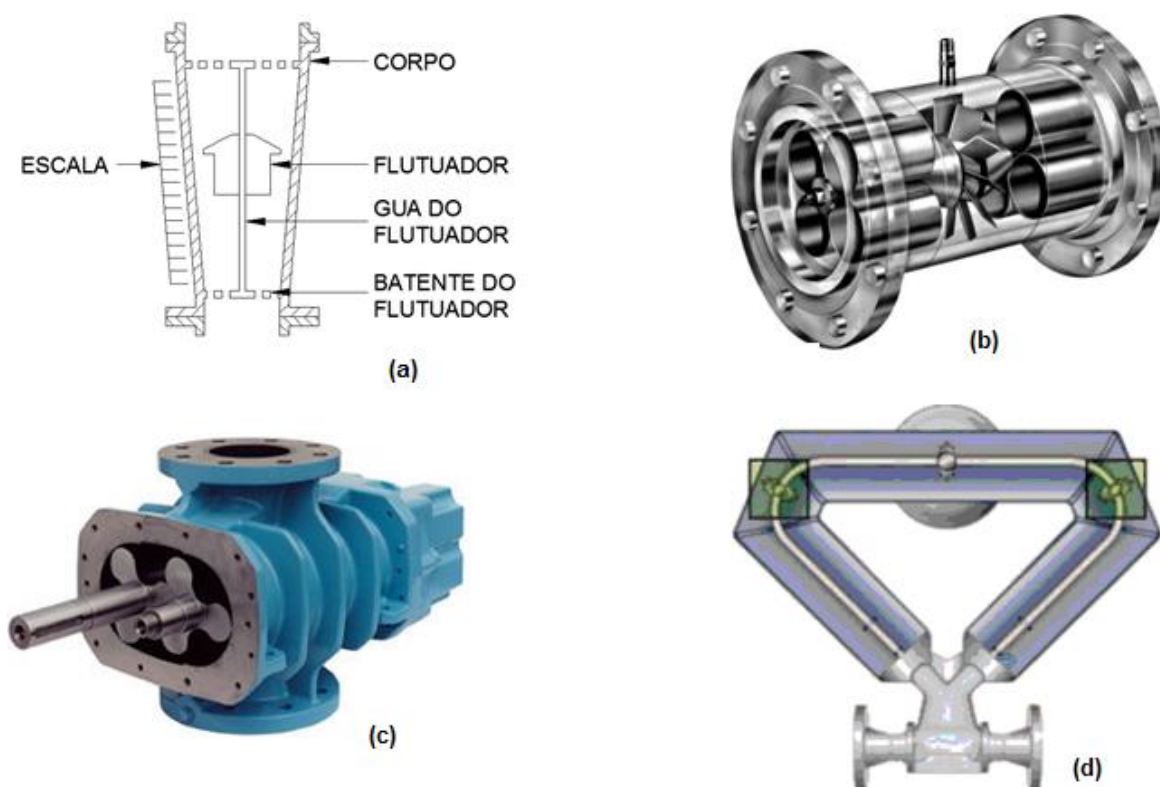


Figura 2-12 - Medidores lineares. (a) Rotâmetro (adaptado de OPAZO, 2007); (b) tipo turbina. Fonte: (VILLAJUCA, 2009); (c) deslocamento positivo. Fonte: (AERZEN, 2014); (d) Coriolis. Fonte: (EMERSON, 2014).

Para a figura 2-12 temos (a), um rotâmetro, que consiste em um tubo cônico e um medidor flutuante; (b) tipo turbina, no qual as pás impulsionam um rotor no centro, produzindo assim energia a ser interpretada como vazão; (c) deslocamento positivo, que realiza a medição através da separação do fluxo; (d) Coriolis, que acelera o fluido através de uma redução de diâmetro e capta a vibração gerada no escoamento e interpreta como vazão (BIAZUSSI, 2010). Importante salientar que para os medidores lineares existe a aceleração ou divisão do fluido, podendo causar

turbulência e/ou emulsão. Estes sensores poderiam ser aplicados para controle independente dos escoamentos de água e óleo, antes da formação do fluxo bifásico.

2.6.4. Medidores de velocidade Local

Há, os métodos que baseados na medição da velocidade em um ponto, no qual se pressupõe conhecer o perfil de velocidade do fluido determinam a vazão. A velocidade aferida é considerada representativa da velocidade média do escoamento. Ao se integrar a velocidade do tubo obtém-se a vazão.

Os principais métodos de medição de velocidade local são: anemometria de fio a quente e o tubo de Pitot apresentados na figura 2-13.

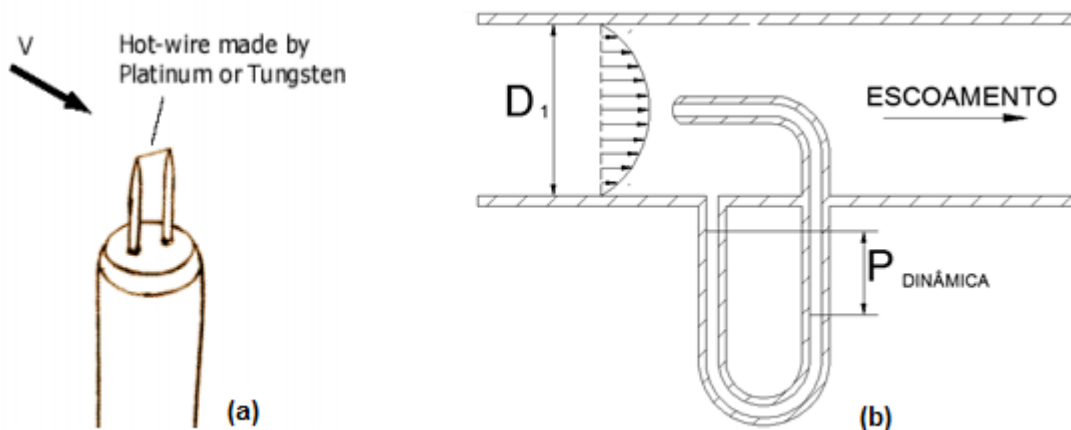


Figura 2-13 - Medidores de velocidade local. (a) Anemômetro. Fonte: (FRANÇA, 2007); (b) tubo de Pitot.

A anemometria de fio a quente (a) baseia-se na variação da resistência do fio com a temperatura e a variação da temperatura do fio com a velocidade do fluido; (b) o tubo de Pitot é um medidor de pressão diferencial entre a pressão local total e a pressão estática local, fornecendo a pressão dinâmica. Ambos os medidores apresentados acima são largamente utilizados na indústria, porém, todos causam perturbação no escoamento do fluido, não podendo ser empregados no escoamento bifásico. Assim sendo, poderiam ser aplicados para controle independente dos escoamentos de água e óleo, antes da formação do CAF. A tabela 2.2 apresenta as características dos instrumentos apresentados.

Tabela 2-1 – Resumo das principais características dos métodos de medidas de vazão clássicos (KREITH, GOSWANI, 2005; BROWN et al. 1997)

Método de medição	Aplicação indicada	Faixa indicada	Precisão	Vantagens	Desvantagens
Métodos diretos	Líquidos ou gases: utilizados para calibrar outros medidores.	Qualquer	0,1 a 0,5%	Ótima precisão, baixo custo, diversos tipos de fluidos.	Sistema grande, lento e não contínuo.
Placa de orifício	Líquidos limpos, corrosivos ou gases	Acima de 5000 Reynolds	1 a 5%	Simples e baixo custo	Coeficiente de descarga e precisão influenciada pelas condições de instalação. Alta perda de carga
Bocal	Escoamento através de tubos: Líquido ou gases	Acima de 5000 Reynolds	0,5 a 2%	Indicado para fluidos sujos	Coeficiente de descarga e precisão influenciada pelas condições de instalação. Moderada perda de carga
Tubo de Venturi	Escoamento através de tubos: Líquido ou gases	Acima de 40000 Reynolds	0,5 a 2%	Menor perda de carga e menos sensível a vibração do n° de Reynolds que bocal de orifício.	Coeficiente de descarga e precisão influenciada pelas condições de instalação.
Rotâmetro	Líquidos ou gases.	Não indicado para fluidos ultra-viscosos	0,5 a 5%		Deve ser calibrado para o fluido medido. Alguns exigem fluido transparente.
Turbina	Líquidos ou gases.	Qualquer	0,25 a 5%	Faixa larga de medidas, precisão com baixo custo e faixa larga de pressão e temperatura	Utiliza leitura eletrônica, medição influenciada pela viscosidade.
Deslocamento Positivo	Gases ou líquidos limpos, com baixo grau de sólidos e viscosos.	Qualquer	0,1 a 2%	Boa precisão, faixa larga de medidas e viscosidade dos fluidos medidos.	Sujeito a desgaste mecânico, peso elevado.
Anemometria de fio quente	Gases e líquidos limpos	0,01a 25 m/s (líquidos) até 500m/s (gases)	1 a 3%	Alta velocidade de resposta e Alta sensibilidade	Depósito de sujeiras nos fios. Fios quentes são frágeis.
Tubo de Pitot	Gases e líquidos limpos	Acima de 5000 Reynolds	0,5 a 5%	Baixa perda de carga e baixo custo	Baixa precisão e exige fluidos limpos
Coriolis	Ampla faixa de líquidos e viscosidades.	Qualquer		Grande faixa de utilização, boa precisão. Diversos tipos de fluido.	Alto custo. Influenciado por vibrações externas.

2.7. Métodos de medição de fração de componentes

O método mais utilizado para escoamento bifásicos é o da medição por frações. Para que este seja possível de se implementar, é necessário o desvio do fluxo para uma planta de testes, na qual as fases são separadas e então as medições são feitas em cada fluido. Este método apresenta as seguintes desvantagens, (SILVA, 1999):

- Requer longo período para estabilizar os líquidos, ou separar as fases;
- Ocupa um espaço físico significativo, uma vez que requer a implementação de uma infra-estrutura específica de teste;
- Medições realizadas de maneira intermitente, através de amostras do escoamento, não sendo necessariamente uma quantidade representativa da produção.

Os métodos descritos nos tópicos a seguir são empregados na de medição escoamentos multifásicos.

2.7.1. Sonda condutiva de fios paralelos

Foi apresentado por Costa, Sassim e França (2007) o desenvolvimento de uma técnica de caracterização hidrodinâmica do escoamento gás-líquido intermitente e vertical, também conhecido como *slug-flow*. Esta consiste na aplicação de fios paralelos introduzidos no escoamento, para a detecção dos sinais dinâmicos e variáveis típicas do escoamento *slug-flow*. Esta técnica funciona através da diferença da medição da resistência elétrica da mistura sobre os fios dispostos perpendicularmente ao escoamento (figura 2.14). O sinal pode variar de acordo com a topologia do escoamento do fluido, da geometria da sonda, das características do circuito elétrico e da condutibilidade elétrica do fluido.

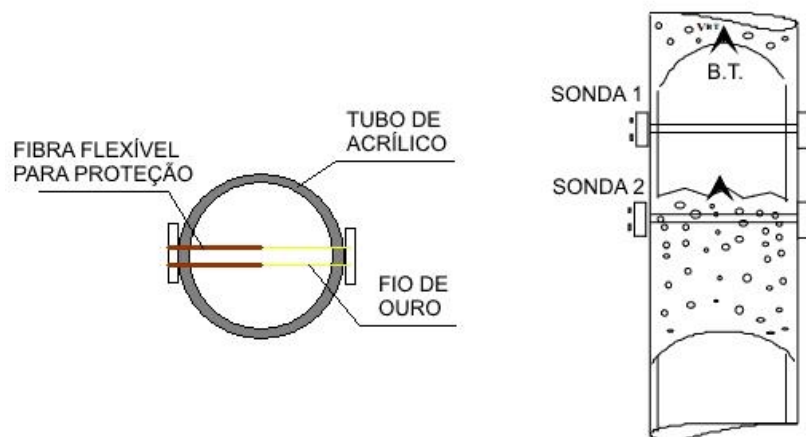


Figura 2-14 – Sonda condutiva de fios paralelos. Fonte: (COSTA; SASSIM; FRANÇA, 2007).

No entanto, esta técnica é de difícil aceitação no meio industrial por ser uma técnica intrusiva ao fluido, podendo causar perturbação no escoamento. Outro aspecto importante é a necessidade de que o fluido deve ser condutor elétrico, impossibilitando sua aplicação para hidrocarbonetos. Assim sendo, devido ao óleo apresentar baixa condutividade elétrica e também por a sonda causar emulsão, este tipo de sensor não se aplica ao propósito de controle contínuo da vazão em escoamento bifásico do tipo CAF.

2.7.2. Método por micro ondas

O método por micro ondas é muito utilizado na determinação de fração de escoamento, ou composição de uma mistura com água. Devido as características dielétricas da água, que normalmente se difere abruptamente dos elementos misturados a ela encontrados nos poços de petróleo. Waldschmidt (2008) listou algumas das vantagens na utilização deste tipo de sensor:

- Não necessitam de contato físico com o processo;
- Devido a penetração das micro ondas em quase todos os materiais, com exceção dos metais, os resultados do volume de materiais aferidos, são muito representativos;
- A água funciona muito bem como contraste com relação aos outros materiais, o que faz com que estes medidores sejam aconselháveis para a medição de fração de águas;
- Sensores são sensíveis a vapores de água e altas temperaturas;

- A potência de micro ondas utilizadas não apresenta perigos para humanos;
- Para as frequências utilizadas, a influência da condutibilidade elétrica dos materiais pode ser desprezada;
- Apresentam baixo tempo de resposta;
- Não afetam os materiais analisados.

O princípio é baseado na equação

$$\frac{\partial V}{\partial x^2} = \frac{1}{v_w^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

em que V é amplitude da onda eletromagnética (Volts), x é a distância percorrida na direção da onda, e v_w é a velocidade da onda eletromagnética em espaço livre ($1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, em que ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo e μ_0 é a permeabilidade eletromagnética no vácuo). A figura 2-15 ilustra o princípio de medição.

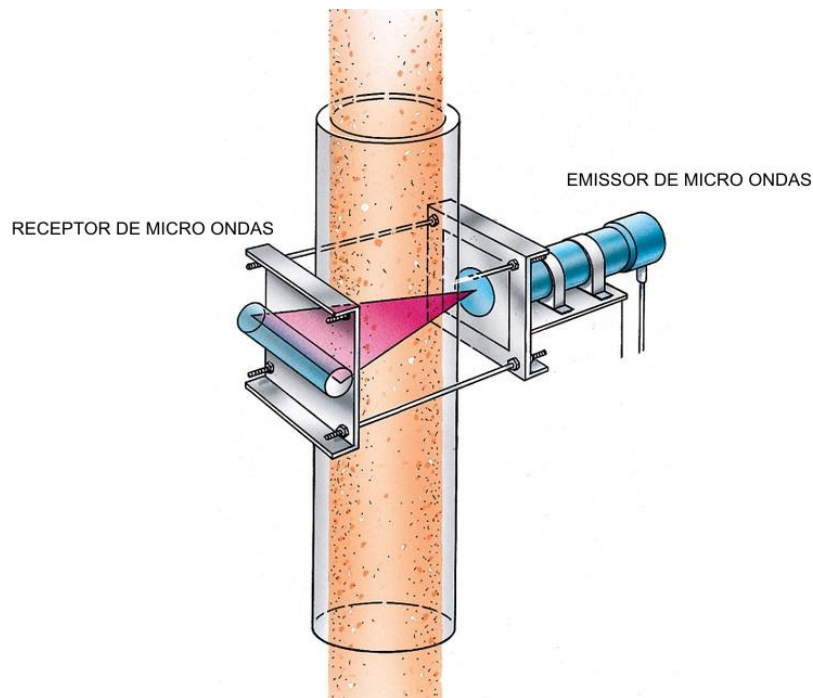


Figura 2-15 – Princípio de medição com micro-ondas. Fonte: (Berthold, 2014).

Este medidor apresenta desvantagem em sua instalação como apresentado por Waldschmidt (2008), que encontrou grande dificuldade no desenvolvimento do sensor multifásico com a utilização de micro ondas.

2.7.3. Ultrassom

Existem diferentes técnicas para a utilização de ultrassom na medição de escoamento de fluidos monofásicos. Uma destas, é a técnica de atenuação que apresenta grande potencial para medição de frações em escoamento multifásicos.

Na técnica de atenuação, as partículas sólidas em suspensão assim como as bolhas de ar em um escoamento onde a fase líquida predomina, tem como características espalhar as ondas de ultra-som. Esta dispersão de ondas faz com que ocorra uma perda de energia causando uma atenuação no sinal de ultra-som transmitido (CARLSON, 2002).

2.7.4. Densimetria de raios gama

Crowe (2006), demonstrou a atenuação de um feixe de raio- γ mono energético penetrando em uma fina fatia de material homogêneo (absorvente) segue a lei de decaimento exponencial de Lambert Beer na equação

$$\varepsilon_m = I_0 e^{-\mu_{eff}d} \quad (2.6)$$

em que I_0 é a intensidade incidente na fina fatia e d é a espessura da fatia.

O equipamento de densitometria de raios gama normalmente utiliza fontes para emissão de radiação com capacidade suficiente de penetração em vasos onde ocorre o processo, como mostrado na figura 2-16.

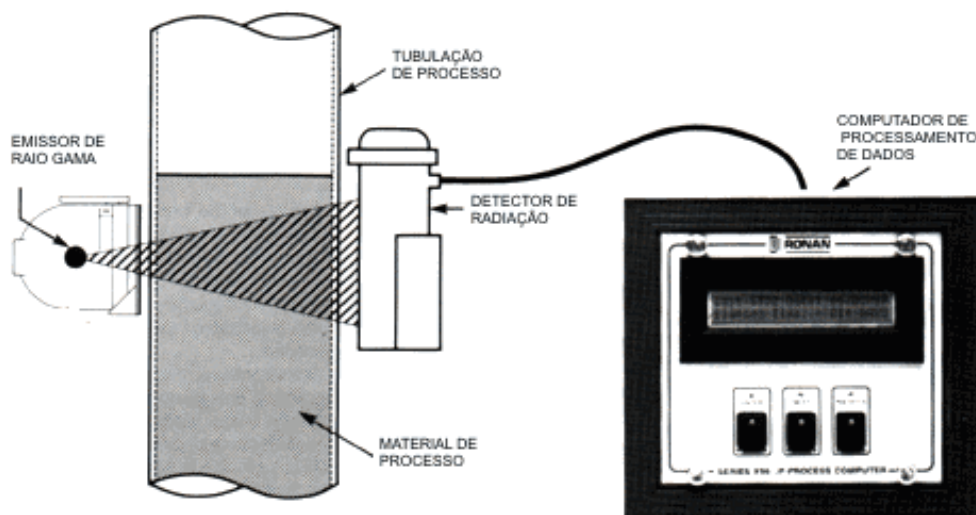


Figura 2-16 – Esquema de densiômetro de raio- γ . Fonte: (RONANMEASURE, 2014)

Esta técnica pode ser utilizada em sistemas multifásicos onde as medições com atenuação de raio- γ são empregadas para determinação das frações volumétricas dos componentes.

Kendoush e Sarkis (2002) detectaram a fração volumétrica de fase através da utilização do método de atenuação da radiação nuclear (método baseado em irradiar raios β , raios γ , nêutrons ou raios-X para atravessar a seção transversal de tubos). Foi medido a fração do vazio (ar) na mistura ar-água. A figura 2-17 ilustra a diminuição da energia a medida que a fração do vazio aumenta.

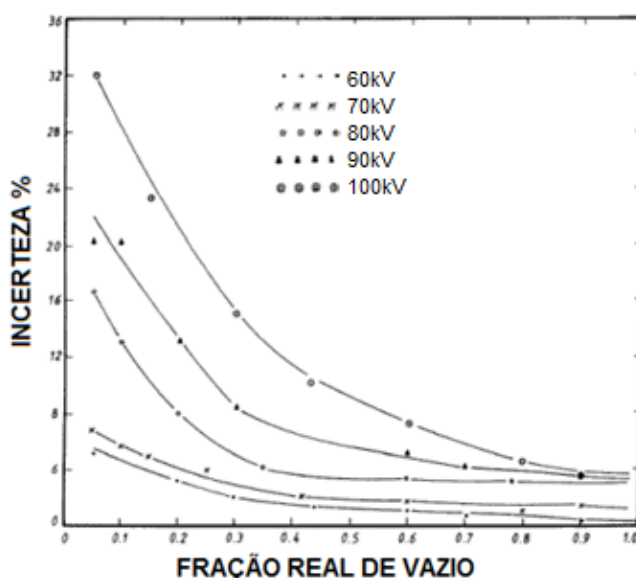


Figura 2-17 – Incerteza de fração de vazio para várias energias de raios-X e corrente de tubo fixa 4mA. Fonte: (Kendoush; Sarkis, 2002)

A atenuação de radiação nuclear possui vantagens com relação a sua aplicação para diferentes materiais em sistemas multifásicos, sua sensibilidade nas aferições, precisão na reconstrução de imagens e por ser baseado em fontes de alta energia, capaz de atravessar tubulações de aço.

Sua desvantagem se encontra na necessidade da utilização da radiação que é prejudicial a saúde humana e tem uso restrito.

2.7.5. Capacitância

Como descrito por Libert (2013), cada componente de um escoamento bifásico possui diferentes características elétricas, como condutividade e permissividade elétrica. Isso implica, que ao se formar um capacitor no qual a

mistura que escoar através da tubulação seja parte do equipamento, sua capacitância irá depender da proporção das fases que fluem no tubo.

Com um princípio simples, no qual as fases do escoamento possuem permissividades distintas, implica que a capacitância encontrada entre o par de eletrodos varia com a proporção dos fluidos. Entretanto, a relação entre a razão de concentração e a permissividade da mistura, faz com que a determinação da capacitância do sensor não seja simples, dependendo da distribuição dos componentes. Esta técnica pode ser implementada não somente para escoamento bifásicos com fluidos distintamente separados, mas também para emulsões.

Alguns dos tipos mais comuns de eletrodos utilizados na medição de vazão em escoamentos bifásicos são o eletrodo de placas côncavas, o tipo anel e o helicoidal como ilustrado na figura 2-18.

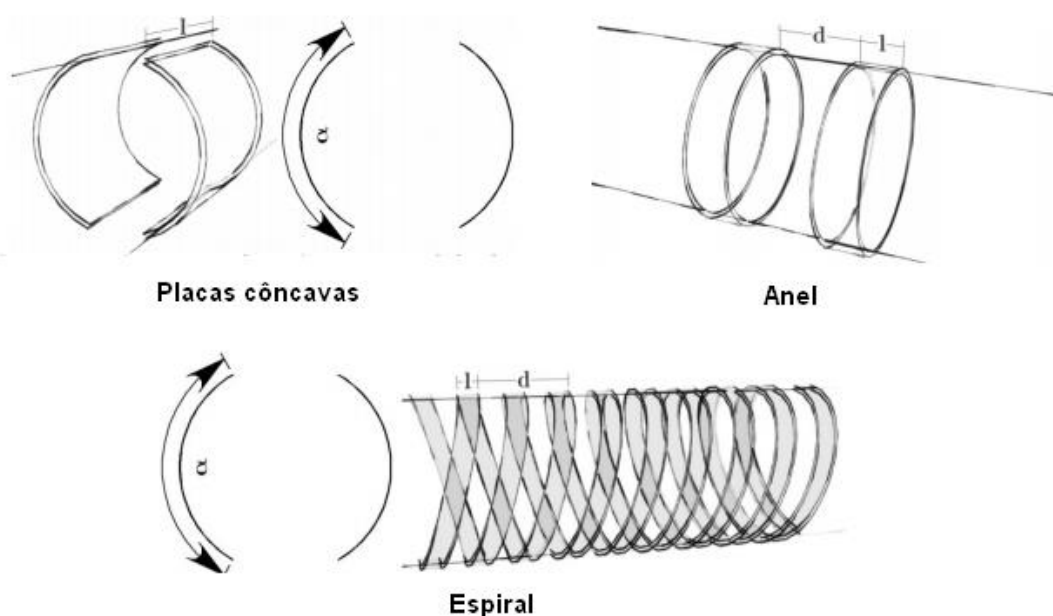


Figura 2-18 – Tipos de eletrodos utilizados. Fonte: (LIBERT, 2013)

Libert (2013) utilizou-se de sensores de placas côncavas para a montagem de uma célula de medição que pode ser por:

$$C_c = \frac{C_p C_x}{C_p + 2C_x} \quad (2.7)$$

em que: C_c é a capacitância da célula, C_p é a capacitância da parede e C_x é a capacitância do fluido.

Com o propósito de encontrar a geometria mais adequada para a medição de escoamentos multifásico do tipo *core-flow*, Galvis (2009) investigou a fundo os sensores de capacitância, incluindo em seu estudo simulações numéricas de diversas configurações de sensores, diferentes diâmetros, núcleos excêntricos e concêntricos e emulsões. Observou também que este tipo de sensor sofre interferência causadas por perturbações a jusante ou a montante do sensor.

Através da construção da sonda de forma geométrica definida por Galvis (2009), Galdiano (2010) com o intuito de utilizar este sensor como medidor de vazão para um sistema *core-flow*, realizou testes e desenvolveu um sistema de calibração da sonda, através de tarugos de teflon, devido sua permissividade elétrica ser muito semelhante a do óleo. Realizou também testes em uma bancada para verificar o efeito no sensor da passagem de um tarugo de teflon pela tubulação. A figura 2-19 mostra o esquema da bancada de testes utilizada.

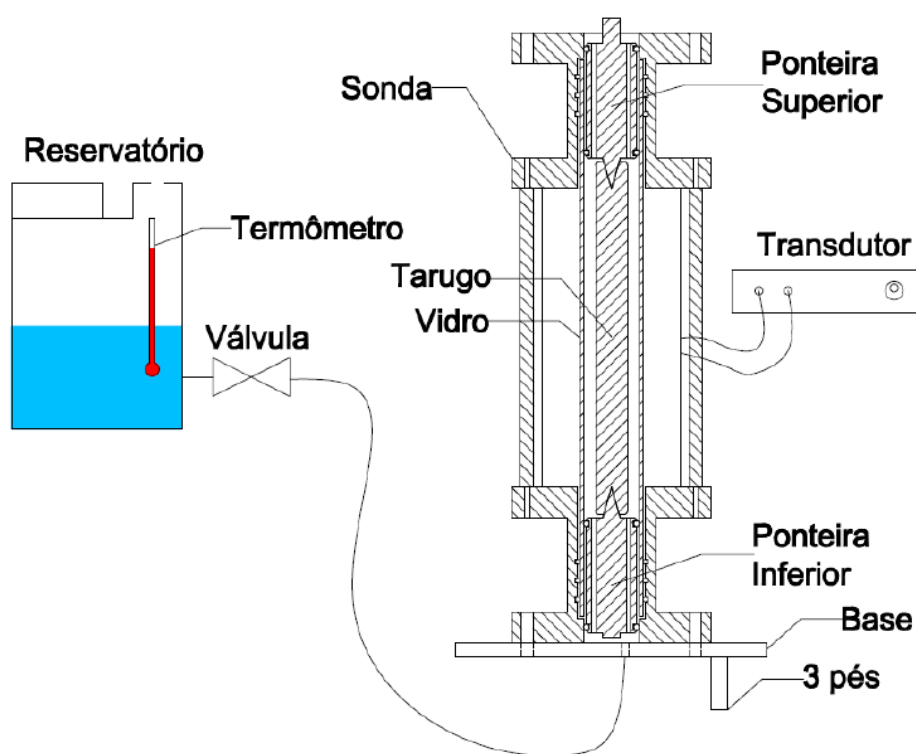


Figura 2-19 – Esquema de bancada para calibração de sensor de capacitância.

Fonte: (GALVIS, 2009)

2.8. Sensores piezoelétricos

Sensores piezoelétricos são basicamente sensores de vibração. São constituídos por um cristal piezoelétrico que ao serem excitados por uma vibração mecânica, onda sonora ou diferença de pressão, por exemplo, emitem um sinal elétrico. Este fenômeno é conhecido como efeito piezoelétrico e foi descoberto em 1880 pelos irmãos Pierre e Jaques Curie durante estudos sobre o efeito da pressão na geração de carga elétrica pelos cristais de quartzo, esfarelita e turmalina. Este efeito consiste basicamente na transformação de energia mecânica em energia elétrica (VIGINOSK, 2013). Lippman, em 1881, através de uma análise termodinâmica previu que a existência do efeito piezoelétrico inverso, que consiste na deformação do material quando o mesmo é submetido a um campo elétrico. O efeito piezoelétrico e seu inverso estão ilustrados na figura 2-20.

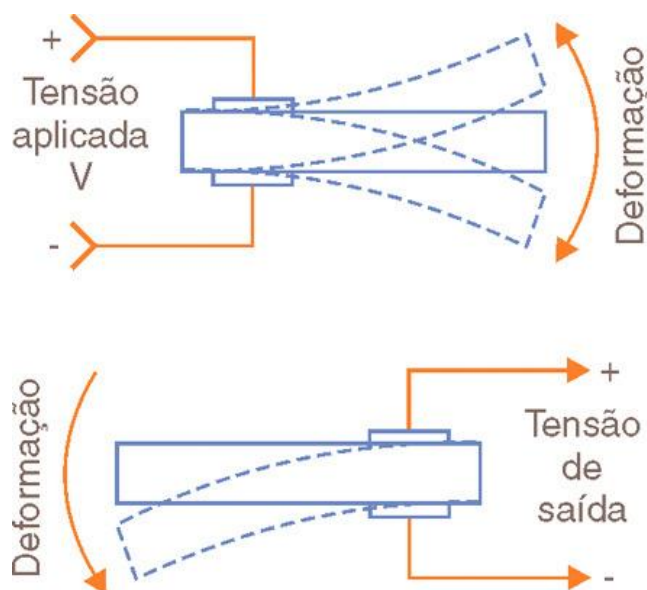


Figura 2-20 – Efeito piezoelétrico e seu inverso. Fonte: (CIRCUITOS NA PRÁTICA, 2014).

Os sensores piezoelétricos tiveram sua primeira aplicação prática durante a primeira guerra mundial, na construção de sonares por Langevin em 1921, que utilizou-se de cristais de quartzo acoplados a massas metálicas para o desenvolvimento do equipamento (VIGINOSK, 2013).

Com a dificuldade de se excitar cristais de quartzo devido a necessidade de geradores de alta tensão, após a primeira guerra iniciou-se o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos, que levaram nas décadas de 40 e 50 as cerâmicas piezoelétricas de Titânio de bário pela URSS e Japão, além das

cerâmicas de Titanato Zirconato de Chumbo desenvolvidas nos EUA (PEREIRA, 2010).

As cerâmicas piezoelétricas apresentam após serem polarizadas, melhores propriedades do que os cristais de quartzo e podem ser construídas em formas variáveis devido a seu processo de fabricação (sinterização de pós-cerâmicos conformados via prensagem). As cerâmicas piezoelétricas são os materiais predominantes no mercado. São corpos maciços semelhantes às utilizadas em isoladores elétricos e constituídas de cristais ferroelétricos sendo denominadas policristalinas. Possui características como frequência natural constante e uma vida útil de aproximadamente 5000 horas (PEREIRA, 2010). A figura 2-21 ilustra possíveis formas de cerâmicas piezoelétricas.



Figura 2-21 – Exemplo de cerâmicas piezoelétricas. Fonte: (RADAR INDUSTRIAL, 2014).

A forma de moeda é uma das mais comuns encontradas no mercado. Sua estrutura fina em forma de disco possui três elementos: membrana de piezocerâmica, folha elástica de liga de níquel e eletrodo (membrana de solução em gel). Este sensor pode ser chamado de diafragma piezoelétrico devido ao seu funcionamento que ocorre em todas as direções. Devido a forma geométrica e montagem para o sensor utilizado, a placa de metal não se expande ou contrai, fazendo com que a cerâmica sofra deformação no sentido radial gerando corrente alternada, como ilustrado na figura 2-22.

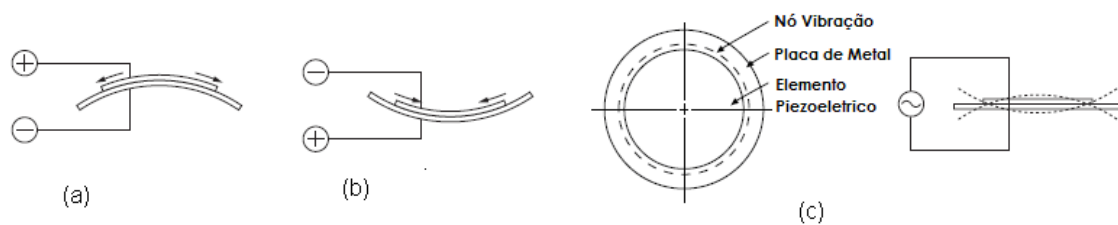


Figura 2-22 – Deformação do sensor piezoelétrico. Fonte: (VIGINOSKI, 2013).

Com base nessa revisão bibliográfica, onde foi apresentada as características dos medidores de vazão mais utilizados, o capítulo seguinte faz uma abordagem dos materiais e métodos utilizados nesta pesquisa.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Apresentação do modelo de bancada existente

Este capítulo tem por finalidade apresentar a revisão da unidade de bancada do *core anular flow* projetada por Mello (2013) instalada no laboratório de operações unitárias da universidade Santa Cecília.

3.1.1. Arranjo físico e componentes da bancada

A bancada situada no laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília é constituída de uma tubulação de PVC transparente com diâmetro de uma polegada. A água é impulsionada para a tubulação com o auxílio de uma bomba centrífuga com potência de 1 hp, que por sua vez tem sua rotação controlada através de um inversor de frequência WEG-CFW 10. O óleo é bombeado por uma bomba de 2 hp de potência, a qual é controlada por outro inversor de frequência WEG-CF 08. No final da tubulação foram instalados uma cesta de pré-separação e um tanque fabricado com placas de acrílico de espessura igual a oito milímetros, que possui volume de 270 litros. Este tanque possui em seus interior, dois defletores internos junto às saídas de água e óleo para impedir que a água saia contaminada com óleo e o óleo de água. A figura 3-1 ilustra os componentes citados.

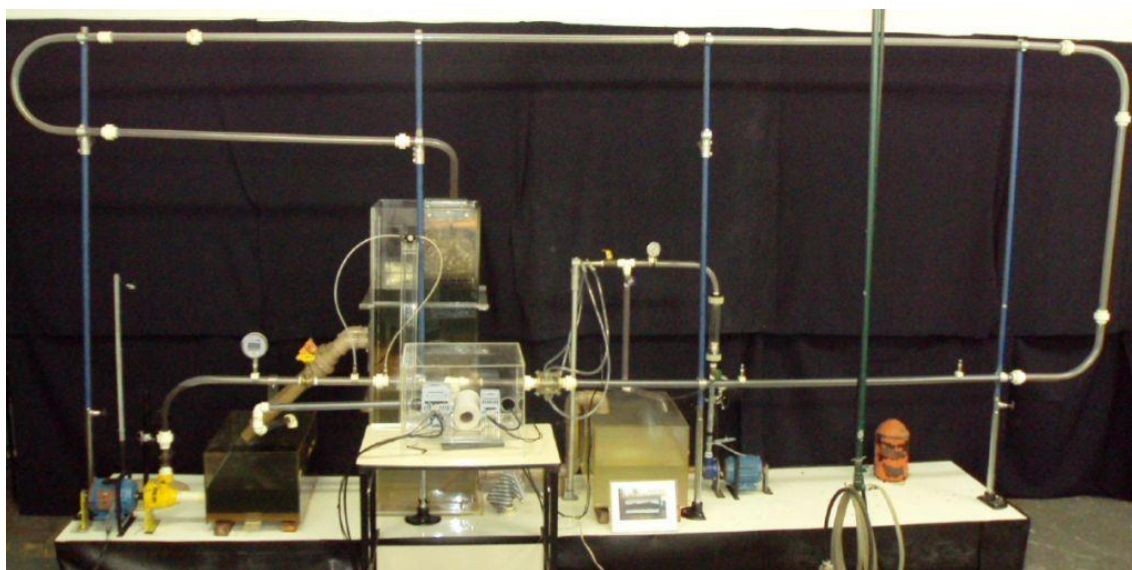


Figura 3-1 - Bancada não automatizada.

A cesta separadora, também construída em acrílico, possui em seu interior anéis *Rashing* de 1 polegada de diâmetro, fabricados em polipropileno (figura 3-2), cuja função é quebrar o jato para minimizar a emulsão, além de facilitar a separação dos fluidos.



Figura 3-2 – Cesta de pré-separação.

Para se obter o sistema *core annular flow*, foi instalado um injetor de água e óleo no início da tubulação de fluido bifásico (figura 3-3), fabricado em acrílico, de conexões flangeadas. Neste, o óleo é injetado no centro da tubulação já previamente preenchida com água.

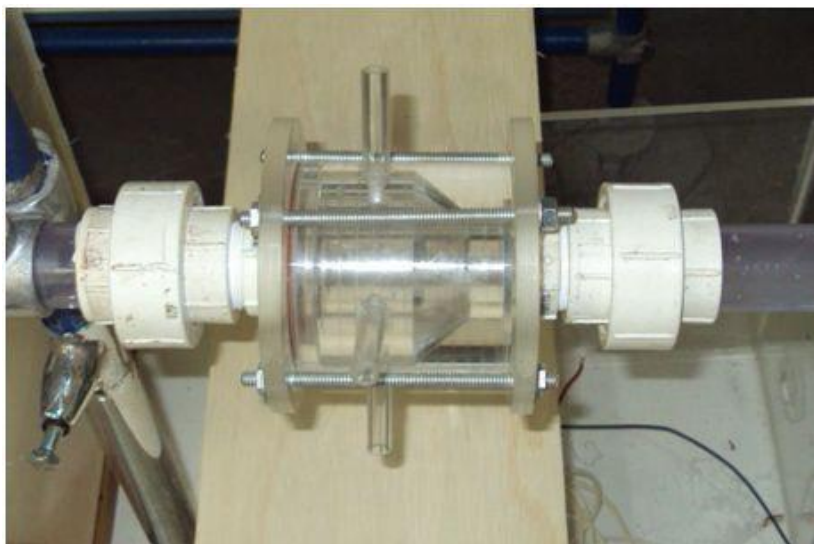


Figura 3-3 – Injetor de óleo em acrílico.

Para a medição da vazão de água, foi instalado um rotâmetro BLI-7000 de fabricação da *Blaster Controles* com capacidade de mensurar uma vazão de até 20 LPM (figura 3-4). Na tubulação de óleo foi instalada uma placa de orifício confeccionada no próprio laboratório da UNISANTA, fabricada em acrílico com 2 milímetros de espessura, diâmetro interno de 15,15 milímetros e bordas retas. Esta possui uma tomada de pressão à jusante e outra à montante, conectadas a um tubo em “U” de vidro preenchido com parte mercúrio, parte água, de modo a indicar a pressão diferencial na placa.

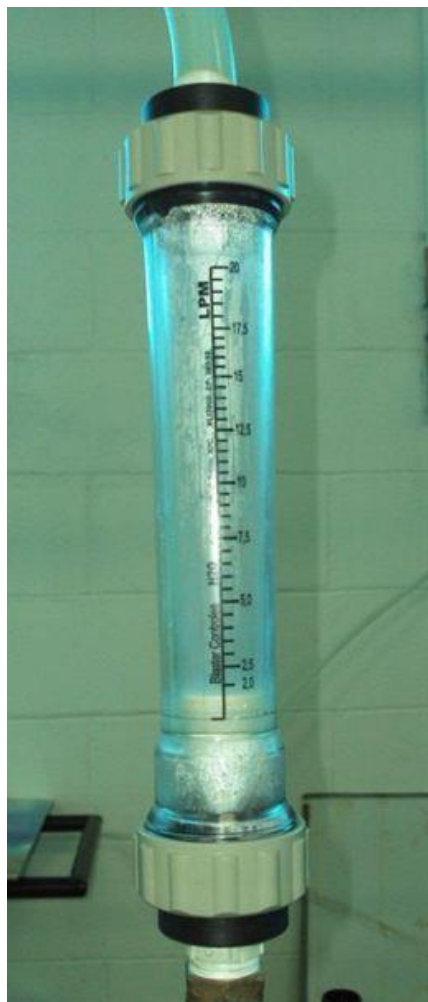


Figura 3-4 – Rotâmetro.

Para o cálculo da perda de carga da unidade experimental foram instalados:

- Um manômetro analógico de 0 a 4 kgf/cm^2 na descarga da bomba de óleo;

- Dois manômetros analógicos de 0 a 2 kgf/cm² na descarga da bomba de água;
- Dois manômetros digitais com 3 ½ dígitos, precisão de 0,15% e faixa de operação de 0 a 10 kgf/cm² nas tomadas da placa de orifício;
- Dois manômetros digitais com 3 ½ dígitos, precisão de 0,15% e faixa de operação de 0 a 10 kgf/cm² nas tomadas de perda de carga.

A figura 3-5 apresenta os manômetros citados.



Figura 3-5 – Manômetros utilizados.

A figura 3-6 apresenta um esquema da bancada de *core anular flow*.

3.2. Sistemas desenvolvidos

Para a automação da bancada de *Core Annular Flow* presente no laboratório de operações unitárias da Universidade Santa Cecília em Santos, foi necessário o desenvolvimento de um circuito controlador que utilizasse como sinal de realimentação a tensão emitida por um sensor piezoelétrico, e que se utilizando desta variável, controlasse os inversores de frequência das bombas de água e óleo existentes na bancada. Como será demonstrado no item 3.4.2, as tensões obtidas na detecção da amplitude do sinal dos sensores piezoelétricos, foram de valores abaixo da ordem de 1V. Assim, como os circuitos eletrônicos em geral operam com tensões maiores, para melhorar a relação sinal/ruído, foi desenvolvido um circuito com amplificador operacional que multiplica o valor da tensão emitida pelo sensor.

Uma vez que sensores piezoelétricos produzem corrente alternada, foi anexado ao circuito amplificador de sinal um estágio retificador de onda, para obter um sinal cujo valor médio filtrado constitui o sinal de realimentação do controlador.

A figura 3-7 apresenta um diagrama esquemático da instalação destes sistemas.

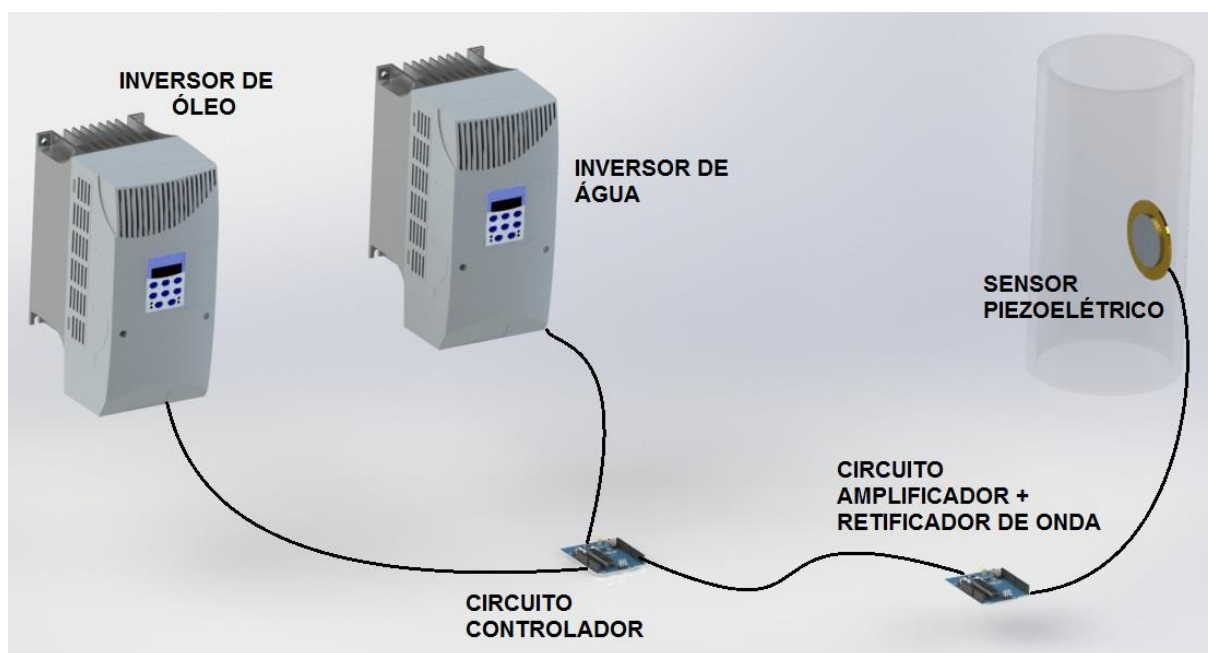


Figura 3-7 - Esquema de instalação dos circuitos desenvolvidos.

3.3. Materiais

Para a detecção dos parâmetros de controle da bancada de *core-annular flow* foram utilizados sensores piezoelétricos de 15 mm de diâmetro cujas características encontram-se no Anexo A.

O acionamento da bomba de água foi realizado com a utilização de um inversor de frequência CFW 10 da marca WEG, que será chamado de inversor de água. Para o acionamento da bomba de óleo, utilizou-se um inversor de frequência CFW 08, da marca WEG, que será denominado de inversor de óleo. A figura 3-8 é uma imagem destes dois inversores.

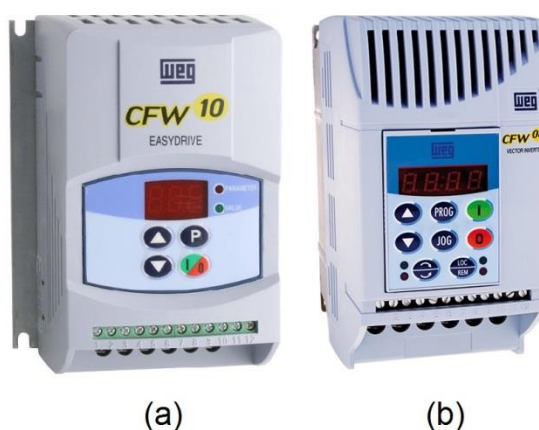


Figura 3-8 - Inversores de frequência utilizados no experimento. Fonte: (WEG, 2015).

Os inversores serão alimentados por uma placa de controle construída com a utilização de um amplificador operacional LM 741, cuja imagem está na figura 3-9, e o esquema elétrico é apresentado na figura 3-17.

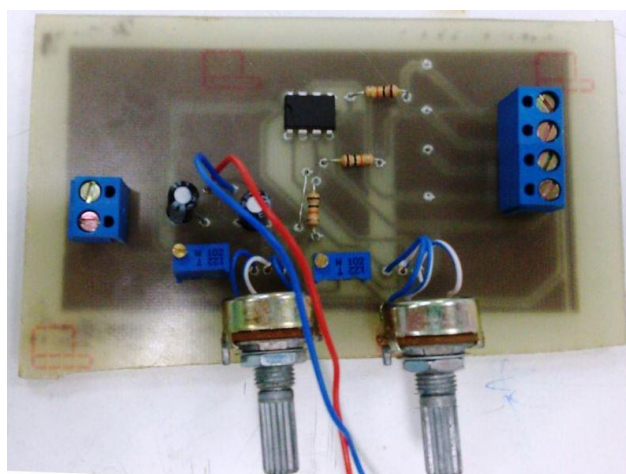


Figura 3-9 - Placa do circuito controlador que usa amplificador operacional LM 741.

Para tratamento do sinal emitido pelo sensor piezoelétrico, foi montada uma placa amplificadora e retificadora de onda que também contém um amplificador operacional LM 741 cuja imagem se encontra na figura 3-10 e os esquemas elétricos são apresentados nas figuras 3-15 e 3-16.

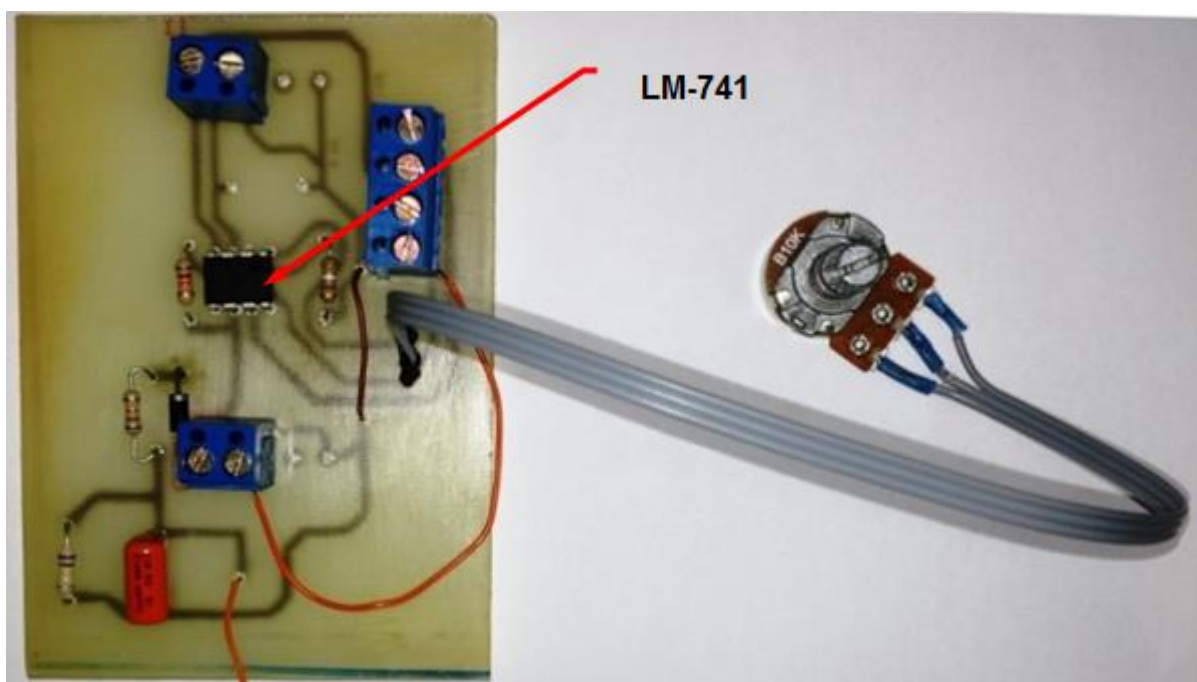


Figura 3-10 - Placa amplificadora e retificadora do sinal do sensor piezoelétrico.

As tensões de entrada dos inversores e a tensão de saída do circuito amplificador e retificador de sinal foram auferidas com a utilização de multímetros Minipa ET-2042D.

Para verificação do funcionamento do placa amplificadora e retificadora foi utilizado um osciloscópio Tektronix TDS 210.

3.4. Métodos

3.4.1. Escolha dos pontos de instalação do sensor piezoelétrico a analisar

A determinação dos pontos convenientes para a instalação dos sensores piezoelétricos, de modo a detectar o início do regime turbulento, é descrita conforme segue.

Para a determinação dos pontos de instalação, as bombas de regeneração de água e óleo foram acionadas por meio dos inversores de frequência, iniciando

com frequência de 40Hz. Foram feitos incrementos manuais de 1 Hz até que surgisse o regime turbulento, identificado pela visualização se um aumento significativo da vibração e ocorrência da emulsão de óleo e água.

Com este procedimento, foram detectados dois pontos, que são o ponto à jusante do injetor (ponto 1) e o localizado após a primeira curva (ponto 2). A figura 3-11 mostra estes pontos.



Figura 3-11 – Pontos de detecção dos padrões de vibração.

A figura 3-12 é um detalhe da figura 3-11 onde está mostrada a localização do ponto 1.

Ponto de localização do sensor
à jusante do injetor

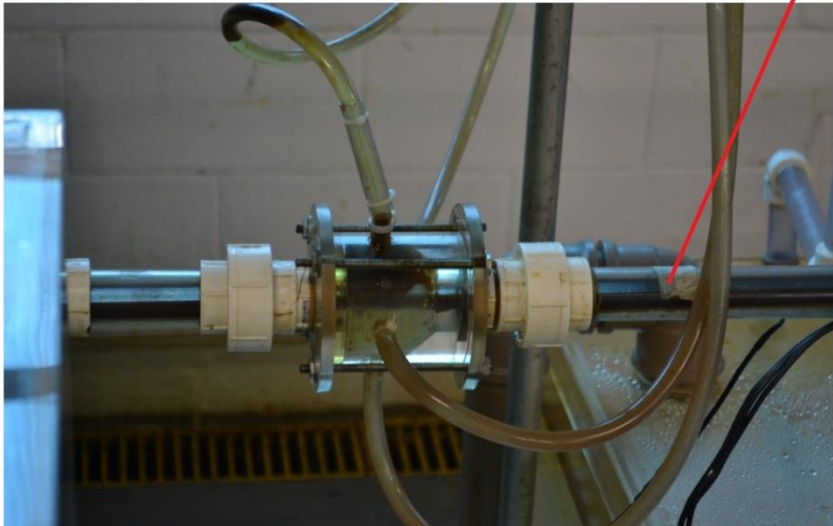


Figura 3-12 - Detalhe da localização do sensor à jusante do injetor.

A figura 3-13 tem o objetivo de mostrar a localização do sensor instalado no ponto 2.

Ponto de instalação do sensor
após a primeira curva



Figura 3-13 - Detalhe do ponto de instalação do sensor após a primeira curva.

Os sensores foram instalados com 0° de inclinação em relação ao eixo longitudinal da tubulação para minimizar sua interferência no escoamento do fluido.

3.4.2. Detecção da amplitude de sinal dos sensores piezoelétricos

Para a realização do experimento, se fez necessário o teste da bancada com escoamento bifásico.

A bancada foi iniciada manualmente por meio do acionamento do inversor de frequência da bomba regeneradora de água até a frequência de 45Hz. Nesta situação, a bomba de óleo foi acionada mantendo-se fechada a válvula instalada em sua descarga, até que o circuito de óleo fosse totalmente preenchido. Após a abertura da válvula de óleo, a frequência da bomba de óleo foi regulada para ficar em 30Hz.

Com a estabilização do escoamento, foi iniciado o aumento da vazão de água por meio de incrementos de 1Hz na frequência no inversor até atingir 50Hz. Após a bomba de água entrar em regime constante com frequência de 50Hz, foram feitos incrementos na bomba regeneradora de óleo de 1Hz até esta atingisse 40Hz.

O processo descrito foi repetido para elevar a frequência de acionamento das bombas de água e óleo até que atingissem respectivamente 55Hz e 50Hz.

Com o auxílio de um multímetro, foram verificadas qualitativamente as tensões elétricas produzidas pelos sensores dos dois pontos selecionados, para os três pares de frequências citados. O experimento foi repetido 10 vezes para estatisticamente obter-se uma média de amplitude mais confiável para cada frequência. A frequência do sinal gerado pelo sensor piezoelétrico foi sempre de 60Hz, conforme verificado no osciloscópio, o que justifica a utilização do multímetro.

A tabela 3-1 mostra os valores médios encontrados nas medições efetuadas para os pares de frequência, dos inversores, apresentadas.

Tabela 3-1–Tensão emitida pelo sensor piezoelétrico para determinação de padrão de vibração.

Frequência (Hz)		Tensão (V)	
Óleo	Água	Ponto 1	Ponto 2
30	45	0,0204	0,173
40	50	0,0263	0,183
50	55	0,0230	0,191

As figuras 3-14 (a) e 3-17 (b) ilustram graficamente as respostas obtidas pelos sensores dos pontos 1 e 2 e apresentadas na tabela 3-1.

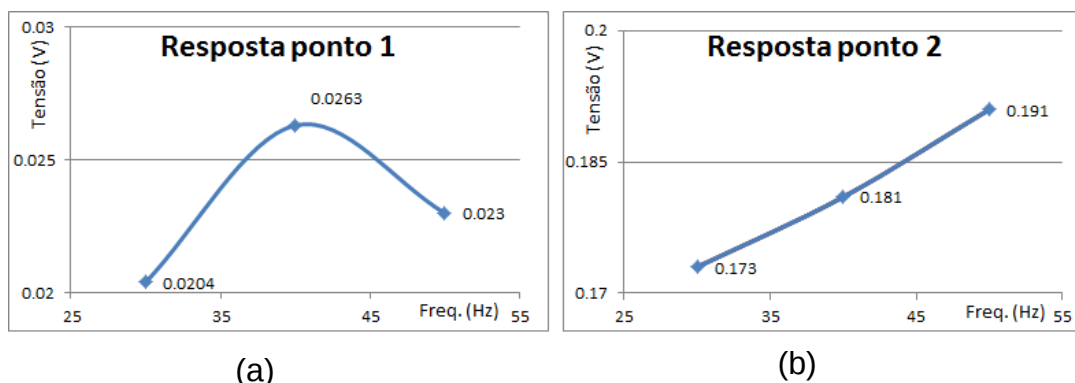


Figura 3-14 - Gráfico de resposta dos sensores.

Com base nos pontos marcados, foram traçadas as curvas estimadas nos gráfico da figura 3-14. Para a figura 3-14 (a), relativo ao comportamento do sensor do ponto 1, não apresenta proporcionalidade entre frequências de acionamento e amplitude do sensor. O gráfico da figura 3-14 (b), verifica-se que os três pontos aceitam uma aproximação linear. Isso caracteriza que a vibração do sensor é aproximadamente proporcional à frequência de bombeamento. Em todos os ensaios realizados no ponto dois, observou-se um aumento na tensão emitida pelo sensor aproximadamente proporcional ao incremento de frequência.

O estudo do controle do escoamento será somente feito com base no sensor do ponto 2.

3.4.3. Montagem dos circuitos.

Foram montados diversos circuitos, descritos a seguir, interligados conforme a figura 3-15.

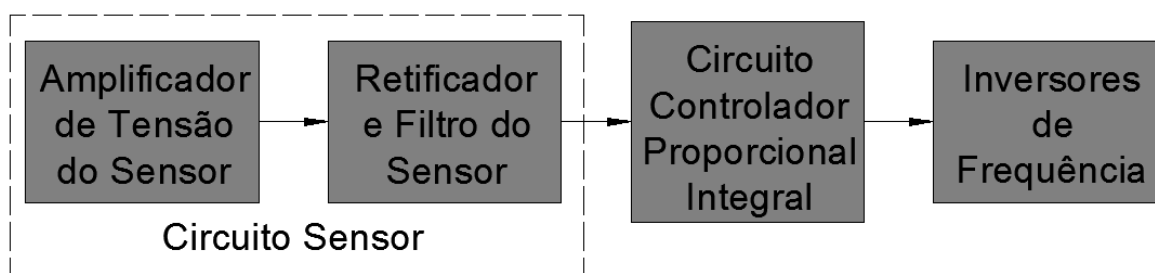


Figura 3-15 - Esquema de montagem dos circuitos.

Os valores de tensão encontrados na resposta do ponto 2, estão na faixa entre 0,17 e 0,20V. Estes sinais foram amplificados em 22 vezes por meio de um circuito amplificador operacional LM741, apresentado na figura 3-16.

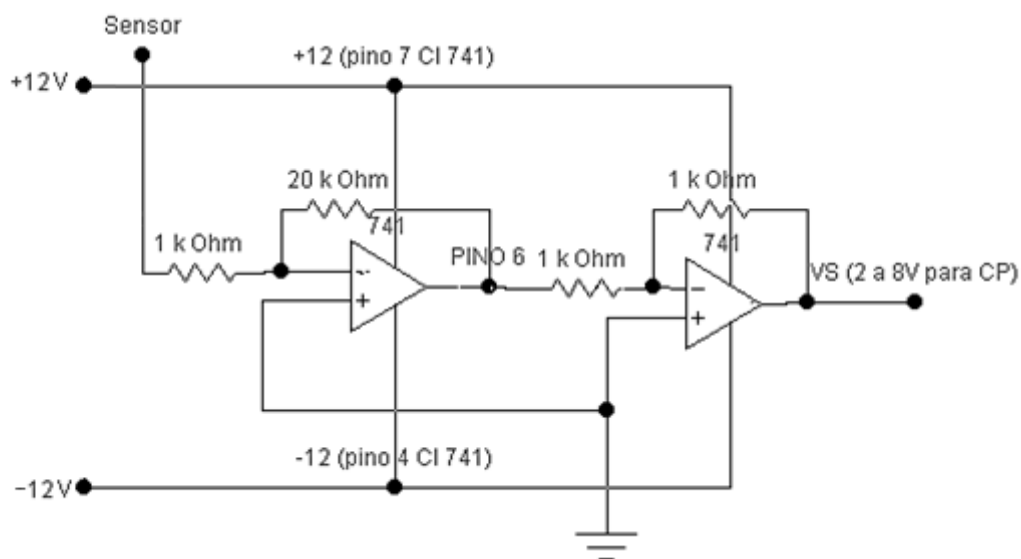


Figura 3-16 – Diagrama do circuito para amplificar a tensão de saída do sensor.

A saída do circuito amplificador operacional ilustrado na figura 3-16 foi conectada ao circuito retificador de onda, seguido de filtro de 1ª ordem, apresentado na figura 3-17, para que a tensão de entrada do circuito controlador ilustrado na figura 3-18 seja sempre positiva. Sua saída é o sinal analógico, de medida da vazão.

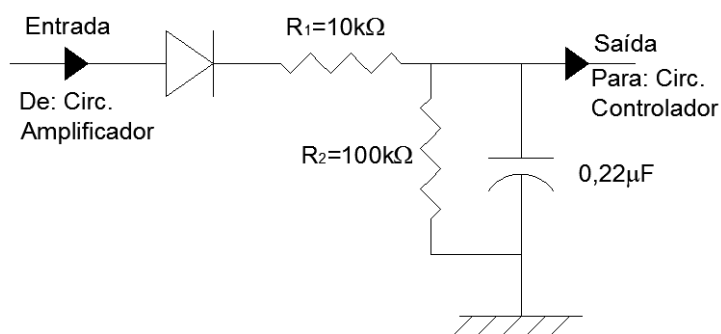


Figura 3-17 - Circuito retificador e filtro do sistema sensor.

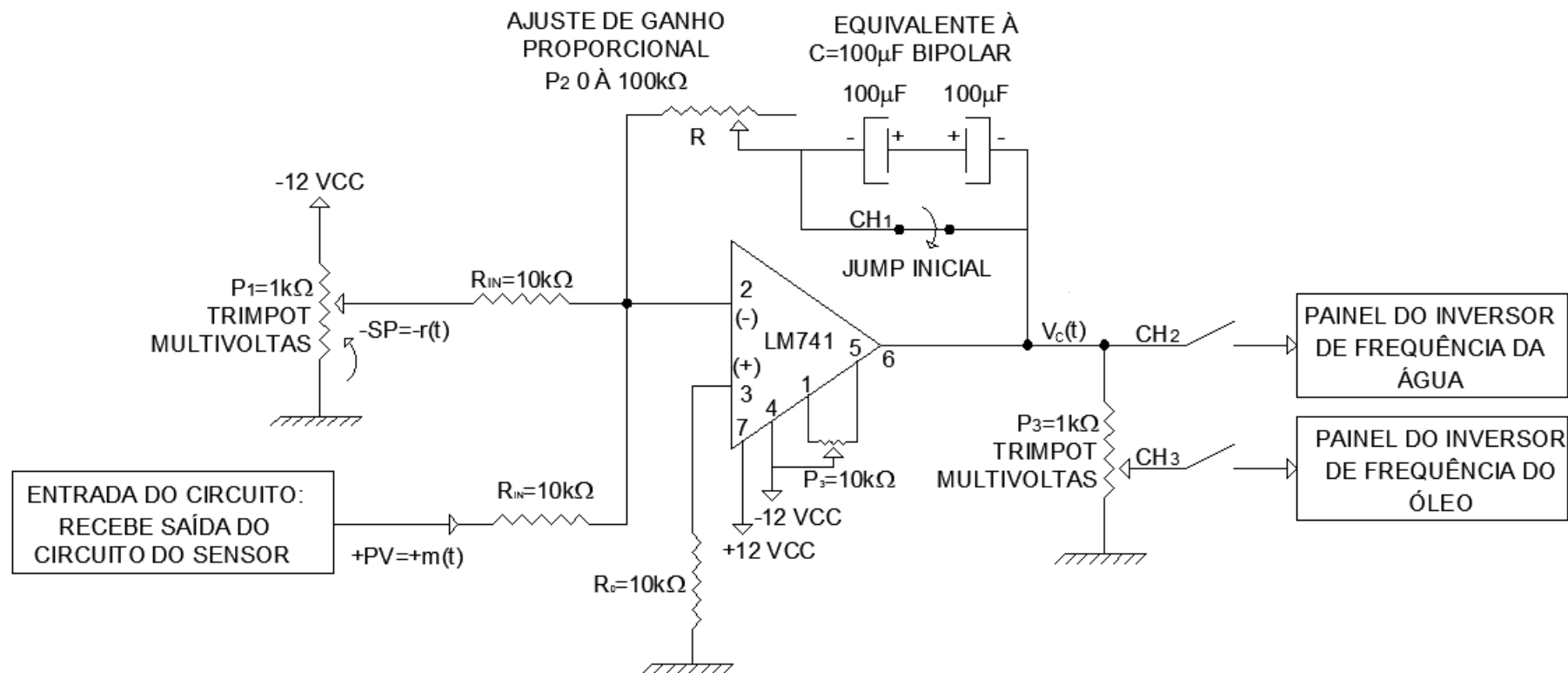


Figura 3-18 - Circuito controlador Proporcional Integral (PI).

Na figura 3-18, P1, P2 e P3 são potenciômetros de ajuste, R é a resistência de ajuste do ganho proporcional, CH1 é a chave inicialmente fechada para iniciar com ação integrativa nula (capacitor descarregado), CH₂ é a chave que aplica a tensão de controle $V_c(t)$ do inversor de água, CH₃ é a chave que aplica o sinal de controle do inversor de óleo (inicialmente aberta) e LM 741 é um amplificador operacional.

Neste circuito o “potenciômetro” P₁ de 1k Ω , ajusta o valor desejado da vazão de água, também denominado de *set point* (SP) ou sinal de referência (R(t)). Foi aplicada uma tensão contínua positiva arbitrária inferior ao ajuste inicial da tensão de referência, na segunda entrada do controlador, simulando o sinal do sensor, denominado sinal de medida m(t) ou *process value* (PV). Em seguida o potenciômetro P1 foi ajustado durante o bombeamento para que a tensão de controle transmitida pela chave CH2 atingisse 7,5V, que corresponde a 45Hz do inversor da bomba de água, pois representa 75% dos 10V correspondentes a 60Hz do inversor, o qual trabalha em escala proporcional.

O potenciômetro P₃, permite o ajuste da tensão de controle do inversor da bomba regenerativa de óleo, transmitida pela chave CH3, como uma fração da tensão do inversor de frequência da bomba de água. Esta fração foi ajustada para aproximadamente 9/10. Nos ensaios realizados, a tensão de controle da bomba de óleo foi de aproximadamente 6,80V equivalendo à frequência de 40,8Hz.

O circuito controlador compara o sinal de medida, que é o emitido pelo circuito amplificador e retificador do sistema sensor, com o *set point* estabelecido no potenciômetro P₁. Enquanto não for aberta a chave CH1, o circuito operará como um controlador proporcional, produzindo na saída as tensões de controle já mencionadas.

No circuito do controlador proporcional integral analógico apresentado na figura 3-18, a tensão de saída do amplificador operacional, em relação ao comum do circuito é a tensão de controle $V_c(t)$ da vazão de água. O sinal de erro $e(t)$ será dado por $e(t) = r(t) - m(t) = SP - PV$ (3.3). A relação entre a variável de controle $V_c(t)$ e o sinal de erro $e(t)$ é dado pela equação 3.1.

$$V_c(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (3.1)$$

Em que:

$$K_p = \frac{R}{R_{IN}} \quad (3.2)$$

e,

$$K_I = \frac{1}{R_{IN}C} \quad (3.3),$$

Sendo K_p é o ganho proporcional e K_I é o ganho integrativo. Como $C=100\mu F$, $R_{IN}=10k\Omega$ e tendo sido ajustado $R=76,7k\Omega$, resultaram os ajustes de $K_p=7,67$ e $K_I = 1$.

A tabela 3-2 apresenta as tensões de controle e as correspondentes frequências aplicadas nos inversores utilizadas nas etapas posteriores do experimento.

Tabela 3-2 - Relação entre tensão de entrada nos inversores de frequência e suas rotações.

Tensão		Frequência	
Óleo (V)	Água (V)	Óleo (Hz)	Água (Hz)
6,82	7,50	40,91	45,00
7,58	8,33	45,45	50,00
8,33	9,17	50,00	55,00

3.4.4. Procedimento pré-experimental

Após a montagem, e teste individual dos circuitos do sensor: amplificador com retificador e filtro, e do circuito controlador, foi realizado um teste do funcionamento em conjunto.

O sensor piezoelétrico, instalado no ponto 2 da tubulação, teve seu sinal conectado ao circuito do sensor, sendo o sinal do elemento piezoelétrico e da saída retificada do sensor apresentadas na tela do osciloscópio.

A figura 3-19 apresenta a tela do osciloscópio com as tensões mencionadas, e observa-se o valor da frequência de 60Hz. As tensões apresentadas na figura 3-19, correspondem ao par de frequência 45Hz (água) e 40,91Hz (óleo).



Figura 3-19 - Comparação entre onda de saída do circuito amplificador de sinal e do circuito retificador de onda.

O circuito de controle foi testado antes de sua conexão com a placa dos circuitos amplificador e retificador de onda, mostrada na figura 3-10 da página 53. O potenciômetro P_3 , foi ajustado em aproximadamente 90% do curso. Assim sendo, a placa do circuito sensor foi conectada a entrada do circuito de controle substituindo o sinal simulado, que com o término da instalação dos circuitos eletrônicos foi feito por meio da conexão das saídas do circuito de controle com os inversores de frequência.

A placa apresentada na figura 3-9 da página 52 será usada na instalação final, substituindo o circuito de controle, que foi montado em um painel didático.

3.4.5. Procedimento experimental

O início do procedimento experimental foi a verificação da condição de abertura das válvulas V2 (óleo) e V4 (água) apresentadas na figura 3-6, da página 50.

A partir da constatação de que as válvulas estavam fechadas, foi ligado o circuito de controle e teve a tensão de referência $R(t)$ ajustada de modo a se obter

uma tensão de controle da bomba de água igual a 9,8V. Após esta providência a chave CH2, apresentada na figura 3-18 da página 59, foi acionada para início da circulação de água.

Com a bomba de água acionada, a válvula da descarga de água, V2, foi completamente aberta e em seguida, já com tensão de medida produzida pelo sensor, foi aberta a chave CH1 para ativar a ação integrativa, estabilizando na frequência de 35Hz no inversor da bomba de água. Foi mantida a água circulando pela tubulação por cinco minutos, com a finalidade de executar um processo de limpeza. A figura 3-20 é um detalhe da figura 3-13, que mostra a tubulação após o processo de limpeza.



Figura 3-20 - Detalhe da figura 3-13 mostrando a tubulação após o processo de limpeza.

No cursor do potenciômetro P₃ (figura 3-18) foi então verificada a tensão de saída de 5,4V, que corresponde a uma frequência de 31,7Hz.

A chave CH3 foi acionada para iniciar o funcionamento da bomba de óleo. Com esta providência, o óleo fluiu pela tubulação de reciclo. Após o completo preenchimento do circuito de óleo, a válvula Vro (retorno do óleo) foi fechada simultaneamente à abertura da válvula V2 (óleo). Com a circulação do óleo através da tubulação, foi iniciado o escoamento *core flow*. Foram coletados dados deste escoamento após o sistema entrar em regime.

A frequência do inversor da bomba de água foi então ajustada por meio do potenciômetro P1 a atingir 40Hz. Nesta condição, foi observado que a frequência da

bomba de óleo ficou igual a 36,3Hz. Da mesma forma que no procedimento anterior, foram coletados os dados de vazão e pressão de água e óleo respectivamente.

O mesmo procedimento foi repetido aumentando-se a frequência do inversor de água para 44,3Hz, o que correspondeu uma elevação na frequência da bomba de óleo para 40,2Hz.

Após os dados terem sido coletados nas três frequências, a rotação da bomba de água foi reduzida até que seu inversor recebesse a tensão correspondente à 35 Hz.

Os dados da vazão de água no rotâmetro e a pressão de descarga do óleo, que foram colhidos após os fluxos dos três conjuntos de frequências entrarem em regime permanente são apresentados na tabela 4-1 no capítulo de resultados e discussões.

A chave CH₃ foi desligada, parando por completo a bomba de óleo e a válvula presente na descarga de óleo V2 foi fechada.

O circuito permaneceu ligado por cinco minutos, com a finalidade de cumprir o procedimento de limpeza já descrito anteriormente, deixando o circuito preparado para novos experimentos. A figura 3-21 ilustra o fluxograma da bancada e seu controlador.

Este procedimento experimental foi repetido por 10 vezes.

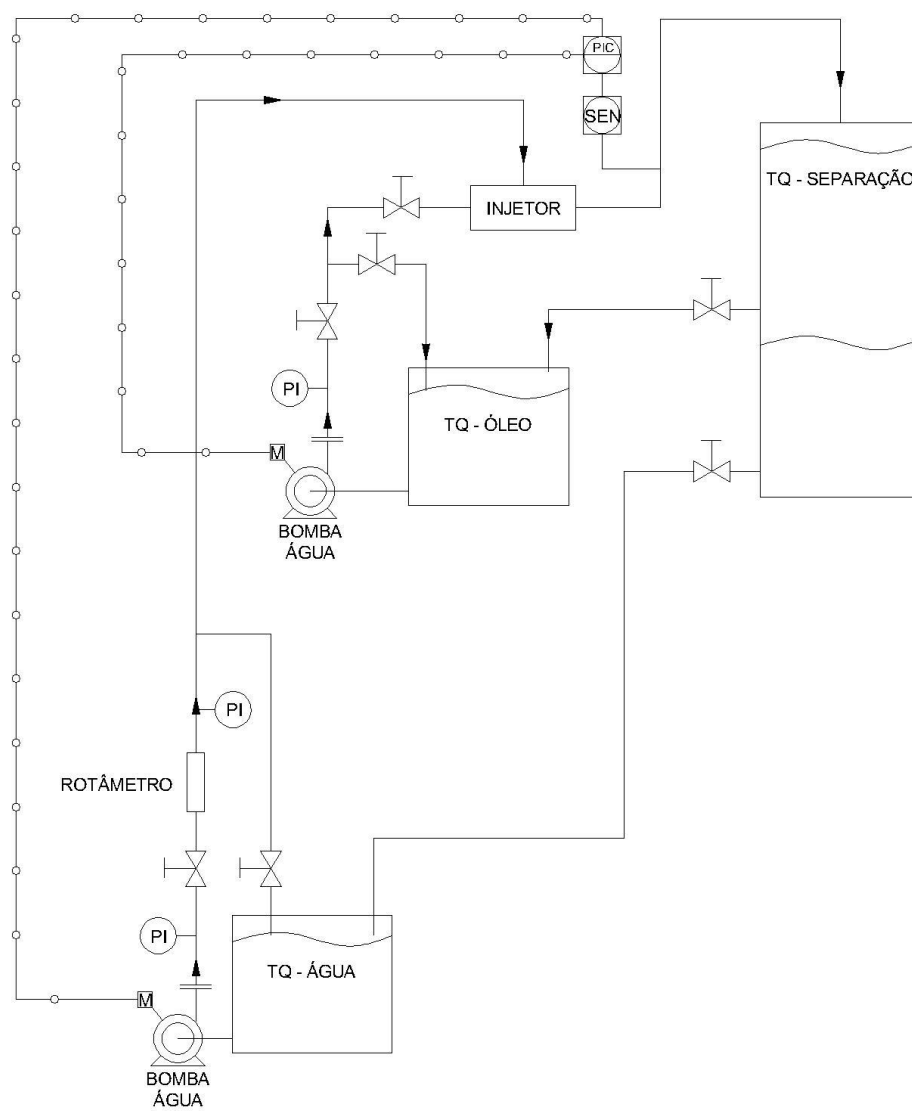


Figura 3-21 - Fluxograma de processo da bancada automatizada.

3.4.6. Simulação de regime turbulento.

Para demonstrar que o sensor detecta o regime turbulento, foi realizada uma simulação no modo manual, ou seja desconectando o circuito de controle dos inversores. Com esta providência, a operação do sistema foi feita de forma manual alterando as características de funcionamento até que o regime turbulento fosse iniciado. As frequências dos inversores de água e óleo foram aumentadas progressivamente, mantendo-se a frequência de óleo em aproximadamente 90% da do inversor de água até que a de água atingiu 60Hz, ainda sem apresentar turbulência. Como o inversor não permite ajustar sua frequência acima de 60Hz, a frequência da bomba de óleo foi elevada para 60Hz, igualando-se a frequência de bomba de água. Nesta condição o sensor apresentou um aumento expressivo de tensão, caracterizando turbulência. Este regime turbulento causou emulsão do óleo com a água, conforme pode-se observar na figura 3-22 fotografada durante o experimento.



Figura 3-22 - Emulsão fotografada durante regime turbulento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados em duas partes, sendo a primeira referente a automação da unidade e a segunda a simulação do regime turbulento.

4.1. Automação da unidade de *core-flow*

A tabela 4-1 apresenta a tensão eficaz do elemento sensor piezoelétrico, a pressão na tubulação de óleo e a vazão de água aferidos antes da formação do fluxo bifásico em função das frequências aplicadas nos inversores, nos dez ensaios realizados. Também constam a vazão de óleo calculada de acordo com a equação (4.1) determinada por Mello (2012) e a vazão total, resultado da soma da vazão de água com a vazão de óleo.

$$P_o = 0,0006Q_o^2 - 0,0819Q_o + 1,9832 \quad (4.1)$$

Em que P_o é a pressão aferida na linha de óleo e Q_o é a vazão calculada de óleo.

Usando os dados da tabela 4-1 foi construído o gráfico da figura 4-1 que relaciona a vazão de água com a frequência do inversor da bomba de água (lembrando que a frequência da bomba de óleo correspondeu a 90,7% da frequência da bomba de água).

A regressão linear dos dados apresenta uma equação da reta com um coeficiente angular de 0,22 (l/min)/Hz.

Ainda com os dados da tabela 4-1, foi construído o gráfico da figura 4-2 que relaciona a vazão de óleo com a frequência da bomba de água.

No gráfico da figura 4-2, foi traçada uma reta estimativa da média dos pontos obtidos, cujo coeficiente angular é aproximadamente igual à -0,18(l/min)/Hz. Embora a frequência do inversor de óleo tenha sido aumentada proporcionalmente com a da água, a vazão de óleo diminuiu com o aumento da frequência. Não foi estudada a otimização da vazão de óleo através da alteração da relação das frequências dos inversores.

Tabela 4-1 - Resultado dos experimentos.

Ensaio	Frequência(Hz)		Tensão (V)	Pressão óleo	Vazão água	Vazão de óleo	Vazão total
	Água	Óleo	Sensor	kgf/cm ²	l/min	l/min (calc.)	l/min
1	35,0	31,7	0,155	0,31	5,0	25,01	30,01
	40,0	36,3	0,164	0,34	6,5	24,44	30,94
	44,3	40,2	0,171	0,36	7,5	24,06	31,56
2	35,0	31,7	0,156	0,34	5,5	24,44	29,94
	40,0	36,3	0,165	0,38	6,5	23,68	30,18
	44,3	40,2	0,172	0,39	7,5	23,5	31,00
3	35,0	31,7	0,157	0,32	5,5	24,82	30,32
	40,0	36,3	0,166	0,38	6,5	23,68	30,18
	44,3	40,2	0,172	0,41	7,5	23,13	30,63
4	35,0	31,7	0,156	0,33	5,5	24,63	30,13
	40,0	36,3	0,166	0,37	6,5	23,87	30,37
	44,3	40,2	0,173	0,4	7,5	23,31	30,81
5	35,0	31,7	0,156	0,32	5,5	24,82	30,32
	40,0	36,3	0,165	0,37	6,5	23,87	30,37
	44,3	40,2	0,172	0,41	7,5	23,13	30,63
6	35,0	31,7	0,157	0,34	5,5	24,39	29,89
	40,0	36,3	0,167	0,4	6,5	23,31	29,81
	44,3	40,2	0,172	0,42	7,5	22,94	30,44
7	35,0	31,7	0,158	0,34	5,5	24,44	29,94
	40,0	36,3	0,167	0,41	6,5	23,13	29,63
	44,3	40,2	0,173	0,48	7,5	21,85	29,35
8	35,0	31,7	0,158	0,33	5,5	24,63	30,13
	40,0	36,3	0,165	0,37	6,5	23,87	30,37
	44,3	40,2	0,173	0,41	7,5	23,13	30,63
9	35,0	31,7	0,157	0,34	5,5	24,44	29,94
	40,0	36,3	0,167	0,41	6,5	23,13	29,63
	44,3	40,2	0,174	0,47	7,5	22,03	29,53
10	35,0	31,7	0,156	0,33	5,5	24,63	30,13
	40,0	36,3	0,166	0,4	6,5	23,31	29,81
	44,3	40,2	0,174	0,43	7,5	22,76	30,26

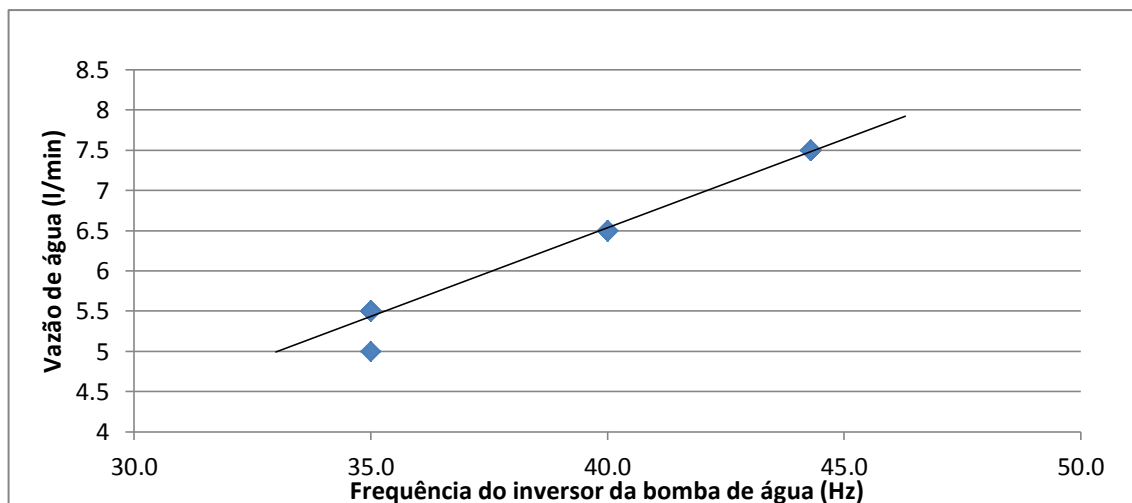


Figura 4-1 - Vazão de água em função da frequência do inversor de água.

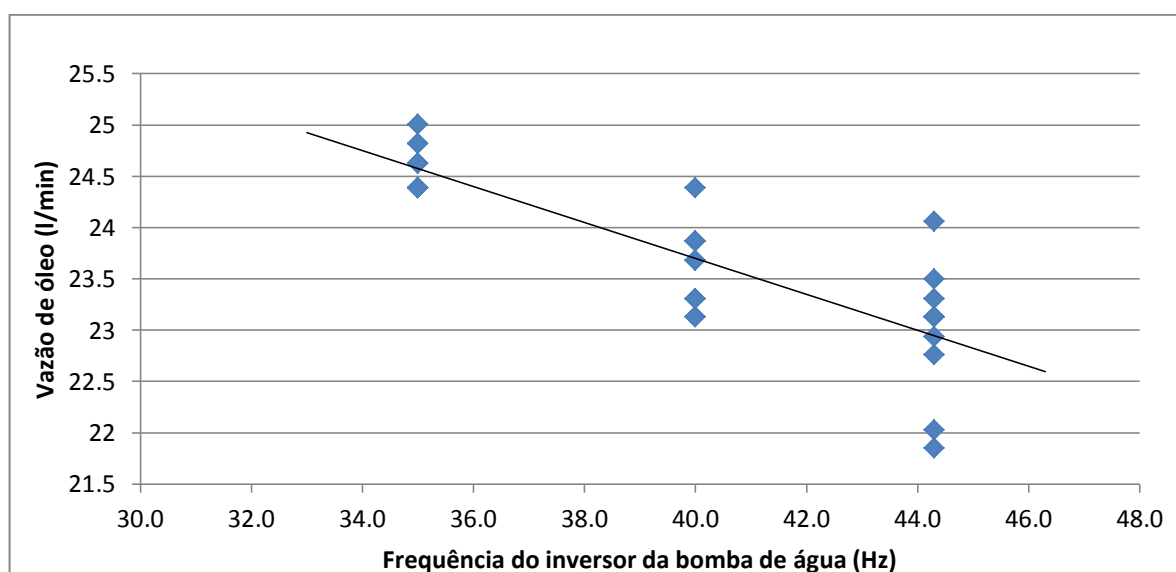


Figura 4-2 - Vazão de óleo em função da frequência do inversor de água.

Ainda usando os dados apresentados na tabela 4-1, foi traçado o gráfico da figura 4-3 que relaciona as vazões de água e óleo. A reta média estimada apresentou coeficiente angular de -0,80. Aumentando-se as frequências dos dois inversores, a vazão de água aumentou, em detrimento da vazão de óleo.

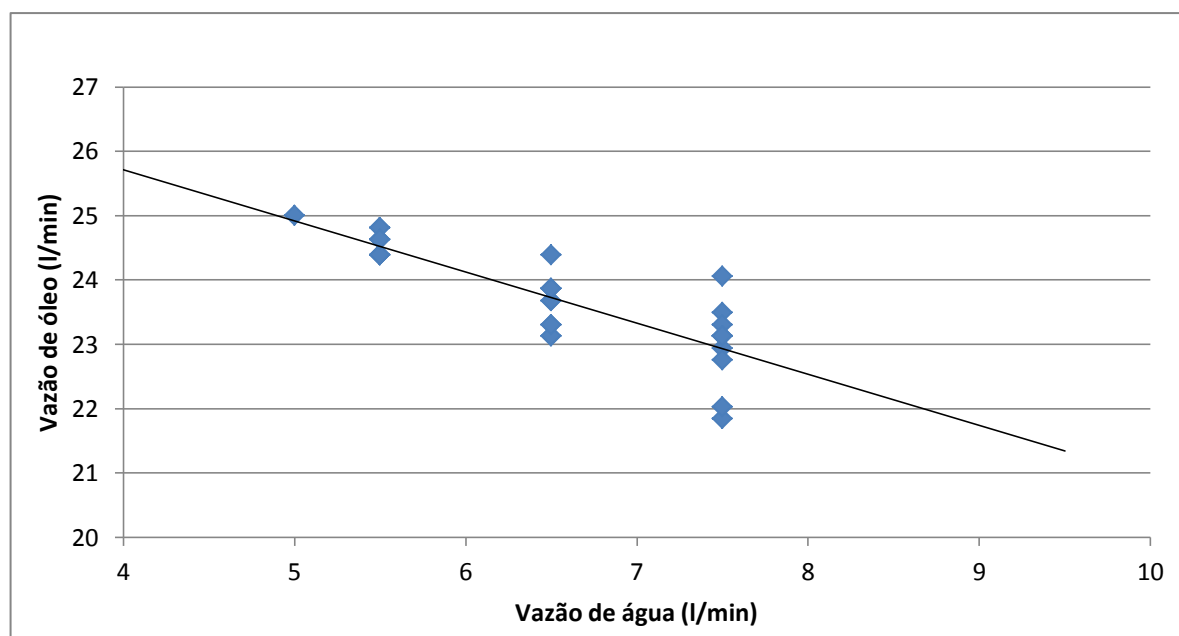


Figura 4-3 - Relação entre as vazões de óleo e água.

O fato de esta relação ser negativa mostra que com o aumento da vazão de água, mantidas as condições de fluxo, ocorre a redução na vazão de óleo.

A tabela 4-2 apresenta os valores médios das vazões para a água e o óleo, para as três combinações de frequência usadas, considerando os dez experimentos realizados.

Tabela 4-2 - Resultados obtidos durante o experimento.

Tensão (V)	Pressão de descarga da bomba de óleo (kgf/cm ²)	Frequência (Hz)		Média da Vazão (l/min)		
		Água	Óleo	Água	Óleo	Total
0,157	0,33	35,0	31,7	5,5	24,63	30,07
0,166	0,38	40,0	36,3	6,5	23,63	30,18
0,173	0,41	44,3	40,2	7,5	23,13	30,63

As médias encontradas e mostradas na tabela 4-2 estão associadas respectivamente os desvios padrão apresentados na tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Desvios padrão para as vazões de água e óleo.

Frequência Hz	Tensão do sensor (V)	Pressão do óleo kgf/cm ²	Vazão Água l/min	Vazão de óleo (l/min)	Vazão Total (l/min)
35	0,001	0,01	0,016	0,22	0,17
40	0,001	0,02	0	0,4	0,40
44,3	0,001	0,04	0	0,65	0,65

Observando os dados da tabela 4-3, nota-se o aumento do desvio padrão da vazão de óleo, com o aumento da frequência do inversor de água. Esta observação, é ratificada pelo gráfico da figura 4-3 que relaciona as vazões água e óleo.

Com as médias da tabela 4-2 e os desvios padrão da tabela 4-3, foram calculados os coeficientes de variação apresentados na tabela 4-4. O coeficiente de variação consiste na relação percentual entre o desvio padrão e a média.

Tabela 4-4 - Coeficiente de variação para os valores de pressão de óleo, vazão de água e vazão de óleo.

Frequência (Hz)	Tensão do sensor (%)	Pressão do óleo (%)	Vazão Água (%)	Vazão de óleo (%)	Vazão total (%)
35	0,62	3,19	2,87	0,90	0,57
40	0,62	5,83	0,00	1,70	1,33
44,3	0,56	8,67	0,00	2,82	2,13

Os dados da tabela 4-4 permitem traçar o gráfico da figura 4-4.

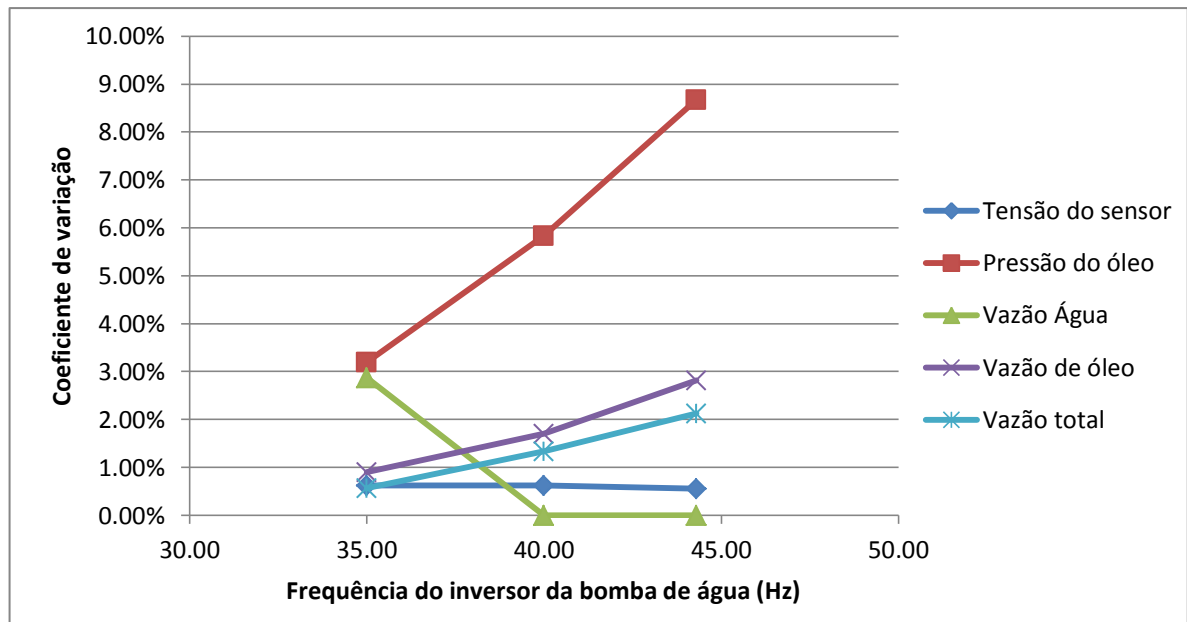


Figura 4-4 - Coeficiente de variação.

Analisando a figura 4-4, se observa um aumento do coeficiente de variação para a pressão e vazão do óleo com o aumento da frequência do inversor da bomba de água. O coeficiente de variação da vazão total acompanha o coeficiente de variação da vazão do óleo. A manutenção do coeficiente de variação para a tensão do sensor mostra que o desvio padrão acompanha a média, tornando as medidas confiáveis.

4.2. Resultados obtidos na simulação do regime turbulento

A tabela 4-5 apresenta os resultados para a transição do regime laminar ou turbulento, relacionando a tensão eficaz do elemento sensor com a frequência da bomba de óleo, lembrando que a frequência da bomba de água foi mantida 5Hz acima da de óleo, exceto para a última medição, em que ambas as frequências foram ajustadas em 60Hz com controle manual.

Tabela 4-5 - Resposta do sensor até regime turbulento.

Frequência água (Hz)	Frequência óleo (Hz)	Tensão sensor (V)
35	30	0,156
40	35	0,166
45	40	0,174
50	45	0,181
55	50	0,193
60	55	0,198
60	60	0,284

Com os dados da tabela 4-5, foi construído o gráfico da figura 4-5.

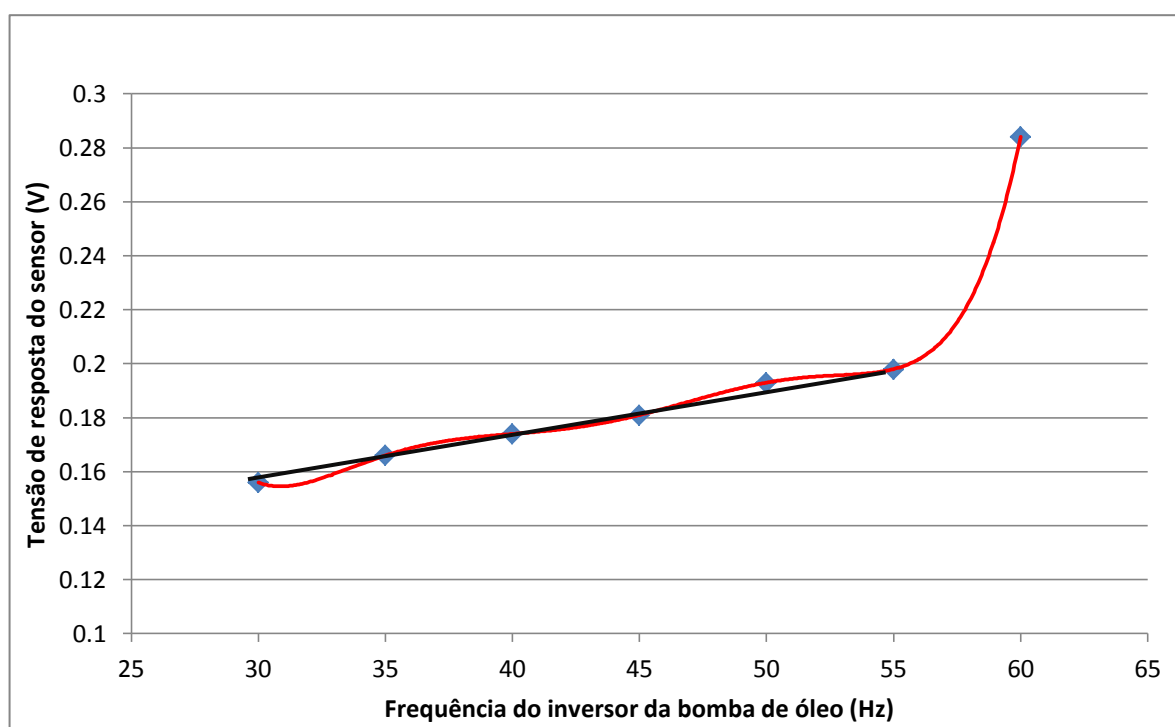


Figura 4-5 - Resposta do sensor até regime turbulento.

A análise dos dados da tabela 4-5 e do gráfico 4-5 permite inferir que o comportamento do escoamento entre as frequências de 30 e 55Hz é laminar, pois a relação entre a tensão de resposta do sensor e a frequência do inversor da bomba de óleo é aproximadamente uma reta de coeficiente angular $1,7 \times 10^{-3}$ V/Hz. Esta relação está graficamente representada pela reta traçada entre as frequências de 30 e 55Hz da figura 4-5.

O gráfico da figura 4-5 mostra um aumento significativo da derivada da tensão em relação à frequência do inversor para a variação entre 55Hz e 60Hz, o que indica mudança no regime de escoamento, de laminar para turbulento. A existência do regime turbulento foi confirmada pela emulsão fotografada conforme figura 3-21 da página 65.

5. CONCLUSÃO

Foi estudado o controle de vazão no escoamento bifásico de óleo pesado com água. A partir dos resultados obtidos nos experimentos é possível concluir que, mantendo-se a tensão de controle da bomba de óleo 9/10 daquela da bomba de água, com o aumento destas frequências, a vazão de água aumenta de modo aproximadamente proporcional à frequência do inversor, entretanto a vazão de óleo varia de modo inverso com a vazão de água. Deve-se observar que a vazão total permanece aproximadamente constante.

Os desvios padrão associados às médias permitiram calcular os coeficientes de variação, no qual se percebe o desvio padrão de todas as grandezas variam proporcionalmente a vazão de água, caracterizando a relação de maior vazão de água com maior dispersão dos resultados medidos, todos os parâmetros com exceção do elemento sensor.

A análise dos resultados permite concluir que o sistema eletrônico desenvolvido para a realização dos experimentos funciona de acordo com o proposto e se mostrou válido para a aplicação com sensores de vibração.

Através da análise do gráfico da resposta do sensor até regime turbulento, o sensor se mostrou capaz de detectar a transição de regime de fluxo, pois entre 30 e 55Hz a resposta do sensor foi linearmente dependente da frequência do inversor de água e em 60Hz apareceu uma mudança da derivada do sinal do sensor em relação à frequência, o que permite concluir uma mudança de regime, também registrada visualmente.

O elemento piezoelétrico foi utilizado para produzir um sistema sensor da vazão de água, que foi instalado e testado em um ponto adequado da tubulação, confirmando sua validade para este caso específico.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através das observações realizadas durante os experimentos, sugere-se:

- a) Instalação de sensores em mais pontos no circuito para um controle mais refinado das condições de fluxo;
- b) Substituição do circuito eletrônico de controle criado por um CLP (controlador lógico programável), pois assim será possível a interligação com um computador e a instalação de um sistema supervisão e controle;
- c) Instalação de um medidor de vazão com conexão eletrônica na descarga da bomba regenerativa de óleo para que seja possível a coleta de dados efetivamente medidos do fluxo de óleo;
- d) Instalação de um medidor de vazão com conexão eletrônica na descarga da bomba regenerativa de água para aquisição de dados, substituindo o indicador visual existente;
- e) Substituição das válvulas manuais por válvulas automatizadas a serem operadas por meio do sistema supervisório citado no item b);
- f) Implementação de sensores de temperatura para água e óleo com a finalidade de se estudar o efeito destes no escoamento;
- g) Estudo teórico e prático, no sentido de ajustar a relação entre a frequência dos inversores de água e óleo com a intenção de maximizar a vazão de óleo sem entrar em regime turbulento;
- h) Instalação de sensores de vazão, para a regulação da vazão e medição com o tipo de sensor desenvolvido com elemento piezoelétrico, para validação do mesmo. Tal estudo para ser conclusivo necessitaria ser feito em diferentes pontos da tubulação do fluxo bifásico, com diferentes diâmetros e materiais de tubulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AERZEM, **Sopradores de Deslocamento Positivo.** Disponível em < [http://www.aerzen.com.br/Produtos2/Sopradores-de-Deslocamento-Positivo/Sopradores-de-Deslocamento-Positivo-tipo-GM/\(language\)/por-PT](http://www.aerzen.com.br/Produtos2/Sopradores-de-Deslocamento-Positivo/Sopradores-de-Deslocamento-Positivo-tipo-GM/(language)/por-PT) > Acesso em 06 abr. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. **Produção de Gás Natural no Brasil Aumenta 10,6% em Relação a Jul/12.** Disponível em < <http://www.anp.gov.br/?pg=67800&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1378408027372> > Acesso em: 05 set. 2013.

BAI, R; JOSEPH, D; **Steady flow and interfacial shapes of a highly viscous dispersed phase.** Int. J. Of Multiphase Flow, v. 26, p.1469-1491, 2000.

BANWART, A; RODRIGUEZ, O; CARVALHO, C; **Flow patterns in oil-water flow.** Journal of Energy Resources Technology, ASME, v. 136, pág.184-189, 2004.

BERTHOLD, **Process control - Bulk flow.** Disponível em < <https://www.berthold.com/en/pc/bulk-flow> > Acesso em 02 abr. 2014.

BROWN, K. K.; STONIER, R. T.; TAYLOR, B. **MEASUREMENT AND INSTRUMENTS.** ROBERT A. PARSONS. Ashrae (Comp.). ASHRAE Fundamentals Handbook (SI). 1997. ed. Englewood: Ashrae, 1997. Cap. 14, p. 1-31.

BIAZUSSI, J. **Desenvolvimento de Uma Técnica de Medida de Vazão de Óleo em Escoamento Bifásico do Tipo Core-Flow.** Campinas: Unicamp, 2010. 134 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de de Campinas, Campinas, 2010.

CARLSON, J. **Ultrasonic Characterization of materials and multiphase flows**. Luleå: Luleå University of Technology, 2002. 161 p. Dissertação (PhD) – Deptment of Computer Science and Eletrical Engineering, Luleå University of Technology, Luleå:, 2002.

CALVERT, S.; WILLIAMS, B.; **Upward concurrent annular flow on air and water in smooth tubes**. AIChE Journal, 1955.

CIRCUITOS NA PRÁTICA, **Transformadores piezoeletricos**. Disponível < http://circuitosnapratica.blogspot.com.br/2012_09_01_archive.html > Acesso em 09 mar. 2014.

COSTA, E; SASSIM, N; FRANÇA, F. **Caracterização do escoamento intermitente vertical com sonda condutiva intrusiva**. 2007. Disponível em <<http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/index.htm> > Acesso em: 22 nov. 2013.

CHARLES, M; GOVIER, G; HODGSON, G; **The horizontal pipeline flow of equal density oil-water mixtures**. Can. J. Chem. Engng., v.39, nº.1, pág.27-36,1961. Mensal.

CROWE, C. T.; **Multiphase Flow Handbook**. IN: **Intenational Journal of Multiphase Flow**, 1st ed. Boca Raton: Taylor and Francis, 2006.

DURCON, **Válvulas de Recirculação para Proteção de Bombas Centrífugas**. Disponível < <http://www.durcon-vice.com.br/download/cat/60> > Acesso em 19 mar. 2014.

EMERSON, **Sensores de Micro Motion**. Disponível < http://www3.emersonprocess.com/micromotion/tutor/spanish/11_sensorptscurvtubecoreproc.html > Acesso em 04 mar. 2014.

FERNANDES Jr., F; **Metodologia para re-sintonia de controladores PID industriais**. Natal: UFRN, 2006. 85 p. Dissertação (Mestrado). – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

FRANÇA, F; **Instrumentação e medidas: grandezas mecânicas**. Disponível em < http://www.fem.unicamp.br/~instmed/Instrumentacao_Medidas_Grandezas_Mecanicas.pdf > Acesso em 25 fev. 2016.

GALDIANO, E; **Contribuição ao Estudo de um Medidor Não-Invasivo da Espessura da Camada de Água em um Escoamento Anular Óleo – Água**. Campinas: UNICAMP, 2010. 142p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 2010.

GALVIS, R.; MARTÍNEZ, A., **Simulação Numérica do Comportamento do Sensor de Capacitância para Monitoramento de Escoamento Multifásico do Tipo Core-Flow**. Campinas: UNICAMP, 2009. 168p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

JOSEPH, R; CHEN, K; RENARDY, Y; **Core Annular-Flows**. Annual Reviews. J Fluid Mechanics, v. 29, pág.27-36, 1997.

KENDOUSH, A. A.; SARKIS, Z. A. **Void Fraction Measurement**. **ExperimentL Thermal and Fluid Science**. V. 25. 2002.

KIEL, O. M.; **U.S.Patent** 3.378.047, 1968.

KIM, J; SHERIF, A; MCDONALD, A; **Flow Measurement**. IN: KREITH, F; GOSWAMI, Y. **The CRC Handbook of Mechanical Engineering**, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2004 Cap 3, p.2-101.

KREITH, F.; GOSWAMI, D. Y. (Ed.). **The CRC handbook of mechanical engineering: Flow Measurement**. 2. ed. Colorado: Llc, 2005.

LAMB, M; SIMPSON, W.C.; **World petroleum congress 6th**. Frankfurt/Main, 1973.

LEONARDI,F; MAYA, P; **CONTROLE ESSENCIAL**, Sistemas de Controle por Realimentação. São Paulo, 2011.

LIBERT, N; **Sistema de medição capacitivo para determinação de fração de vazio em escoamentos bifásicos**. Curitiba: UTFPR, 2013 117p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MELLO, L; **Desenvolvimento de uma unidade experimental para estudo de transporte por bombeamento da mistura bifásica água-óleo.** Santos: UNISANTA, 2013 82p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Santa Cecília, Santos, 2013.

OLIMANS, R.; OOMS; **Core-Annular Flow of Oil and Water Through a Pipeline.** Multiphase Science and Technology., v.2, pág. 427-479. 1986.

OPAZO, R; **Diseño de un banco para ensayos de perdidas de carga.** 2007. Disponível em < <http://html.rincondelvago.com/disenho-de-un-modulo-de-perdidas-de-presio-n-em-fluidos.html> > Acesso em 05 out. 2014.

PEREIRA, A; **Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades.** 2010. Disponível em < <http://www.atcp.com.br/images/stories/products/ceramicas/RTATCP-01.pdf> > Acesso em: 23 nov. 2013.

RADAR INDUSTRIAL, **Cerâmicas piezoelétricas.** Disponível em < <http://www.radarindustrial.com.br/produto/137445/ceramicas-piezoelétricas.aspx> > Acesso em 05 mar. 2014.

ROCHA, A; **A Práxis da Tecnologia na Educação de Engenharia: Experiência de Reynolds.** Disponível em: < <http://www.abenge.org.br/cobenge-2014/Artigos/129267.pdf> > Acesso em: 22 mar. 2015.

RONANMEASURE, **Density** . Disponível em < http://www.ronanmeasure.com/pages/default2.asp?active_page_id=85 > Acesso em 06 abr. 2014.

RUSSEL, T; CHARLES, M; **The Effect of the less viscous liquid in the laminar flow of two-immiscible liquids.** Can. J. Chem. Engng., v.37, nº.1, pág. 18-24. fevereiro de 1959.

RUSSEL, T; HODGSON, G; GOVIER, G. **Horizontal pipeline flow of mixtures of oil and water**. Can. J. Chem. Engng., v.37, nº.1, pág. 9-17.1959. fevereiro de 1959.

SILVA, C; **Critério Para Seleção De Medidores Multifásicos Na Petrobras**. 1999. Disponível em < http://www2.petrobras.com.br/tecnologia/port/boletimtecnico/v42_n1-4_jan-dez-1999/pdf/6criterio.PDF > Acesso em: 23 nov. 2013.

SOARES, F; **Hidráulica, Aquecimento e Pressurização**. Disponível em < http://hidraulicosp.blogspot.com.br/2013_06_01_archive.html> Acesso em: 22 mar. 2015.

SILVA, C; **Medição de Vazão e Propriedades em Escoamento Multifásico: Solução Econômica para Diferentes Atividades Industriais**. Disponível em: < http://www2.petrobras.com.br/tecnologia2/ing/boletim_tecnico/v43_n1_jan-mar-2000/pdf/6amedicao.pdf > Acesso em: 23 nov. 2013.

VAPORTEC, **Válvulas de controle**. Disponível em < <http://www.vaportec.com.br/valvulas/valvula-de-controle/> > Acesso em 19 mar. 2014.

VARA, R. M. O. **Hidrodinâmica do Escoamento Bifásico Óleo Pesado-Água em um Tubo Horizontal**. Campinas: UNICAMP, 2001. 140 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Petróleo, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001

VIGINOSKI, C; **Sistema Utilizando Vibração de um Transdutor Piezoelétrico para Medir Densidade de um Líquido**. Curitiba, UFPR, 2013: 2013. 214p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

VILLAJUCA, J. **Flujo: Medidores de Area Variable, Magnético, Turbina, Vórtice e Flujo Total**. 2009. Disponível em < <http://www.instrumentacionycontrol.net/politica-privacidad-y-reembolso/item/92-flujo-medidores-de-area-variable-gn%C3%A9ti-cos-turbina-vortice-y-flujo-total.html> > Acesso em 6 de abr. 2014.

WALDSCHIMIDT, D. R.; **Desenvolvimento de um medidor de fração de água utilizando tecnologia de micro-ondas**. Florianópolis: UFSC, 2008 142p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2008.

WEG S.A., **Drives - inversores de frequência**. Disponível em < <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Inversores-de-Frequencia/CFW08> > Acesso em 15 mar. 2015.

ANEXO A – Data sheet

仕様書番号
Drawing No. JGB45-0419

P. 1/8



納入仕様書

Specification of Piezoelectric Diaphragm

7BB-15-6L0

決定年月日 Date	April 20, 2005	承認 Approved by	確認 Checked by	担当 Issued by
---------------	----------------	-------------------	------------------	-----------------

1. 適用 Scope

当納入仕様書は、確認音等の発生回路に使用する圧電振動板について規定します。この用途以外にご使用の場合には事前に当社へご連絡ください。
This product specification is applied to the piezoelectric diaphragm used for sounder in alarm systems. Please contact us when using this product for any other applications than described in the above.

2. 品番 及び 貴社関連事項 Part Number

2-1	当社品番 Murata Part Number	:7BB-15-6L0
2-2	貴社部品番号 Customer's Part Number	:
2-3	貴社仕様書番号 Customer's Drawing Number	:

3. 最大定格 Maximum Rating

	項目 Item	規格 Specification
3-1	動作温度範囲 Operating Temperature Range	-20 ~+70℃ -20 to +70℃
3-2	保存温度範囲 Storage Temperature Range	-30 ~+80℃ -30 to +80℃

株式会社 村田製作所 Murata Manufacturing Co.,Ltd.

4. 電気的性能 Electrical Characteristics

	項 目 Item	規 格 Specification
4-1	共振周波数 Resonant Frequency	$6.0 \pm 1.0 \text{ kHz}$
4-2	共振抵抗 Resonant Impedance	$1.2 \text{ k}\Omega$ 以下/max.
4-3	静電容量 (1kHzにて) Electrostatic Capacity (at 1kHz)	$9.5 \text{ nF} \pm 30\%$
4-4	絶縁抵抗 (10VD.C.にて) Insulation Resistance (at 10VD.C.)	$100 \text{ M}\Omega$ 以上 $100 \text{ M}\Omega \text{ min.}$

測定条件は次項を参照して下さい。
Refer to next item for measuring method.

5. 測定方法 Measuring Method

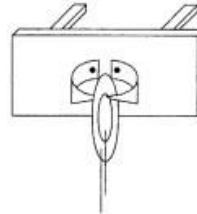
5-1 共振周波数/共振抵抗について Resonant Frequency / Resonant Impedance

ベクトルインピーダンスメータ(又は同等品)を用いて、下図の様に振動板を節部にて保持します。(空中 宙吊り状態)

周波数4~8kHzを変化させた時、インピーダンスが最小となる周波数を、共振周波数とし、その時のインピーダンスを共振抵抗とします。

Component shall be clamped at a node point as shown in following figure to be free from any mechanical stress, and measured its resonant frequency and resonant impedance by using vector impedance analyzer or equivalent.

When the input frequency is swept within 4 to 8 kHz, the resonant frequency is defined the frequency where the impedance shows minimum value, and this impedance shall be the resonant impedance.



5-2 静電容量について Electrostatic Capacity

1kHzにてL.C.R.メータ(HP:4192A又は同等品)にて測定します。

振動板の保持方法は共振周波数/共振抵抗の測定方法に準じます。

A electrostatic capacity shall be measured at 1kHz by using L.C.R.meter, ex. HP4192A(H.P.), or equivalent. The component shall be clamped in the same way as the measurement of resonant frequency / resonant impedance mentioned in the above.

5-3 絶縁抵抗について Insulation Resistance

絶縁抵抗メータを用いて測定します。

An insulation resistance shall be measured by using an insulation resistance meter.

5-4 測定条件 Measuring Condition

温度 $+25\pm3^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\pm10\%\text{R.H.}$ を標準測定状態とし、特に疑義を生じない場合は、温度 $+5\sim+35^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $45\sim85\%\text{R.H.}$ の範囲内で測定します。
Standard conditions for the measurement shall be $+25\pm3^{\circ}\text{C}$ temperature and $60\pm10\%\text{R.H.}$ humidity. The measurement shall be performed at the temperature of $+5$ to $+35^{\circ}\text{C}$ and the humidity of 45 to 85%R.H. unless otherwise the result is doubtful.

6. 機械的性能 Physical Characteristics

	試験項目 Item	試験条件 Test Condition	試験後の規格 Specification
6-1	耐衝撃性 Shock	加速度 980m/s^2 、半波正弦波の衝撃を XYZ の 3 方向に各 3 回印加後、測定します。 Components shall be measured after being applied shock(980m/s^2) for each three mutually perpendicular directions to each of 3 times by half sine wave.	第 1 表を満足します。 The measured value shall meet Table 1.
6-2	耐振動性 Vibration Resistant	振動周波数 10~55Hz、全振幅 1.5mm の振動を XYZ の 3 方向に各 2 時間印加後、測定します。 Applying the vibration of amplitude 1.5mm and vibration frequency 10 to 55 Hz in each of 3 perpendicular directions for 2 hours.	
6-3	リード線 引っ張り強度 Lead Wire Strength Pulling	リード線の引き出し方向に 3.0N、引き出し方向に対し垂直に 2.0N の静荷重を加えます。 The pull force shall be applied to lead wire : Horizontal 3.0N Vertical 2.0N	リード線の断線がありません。 No visible damage and cutting off.

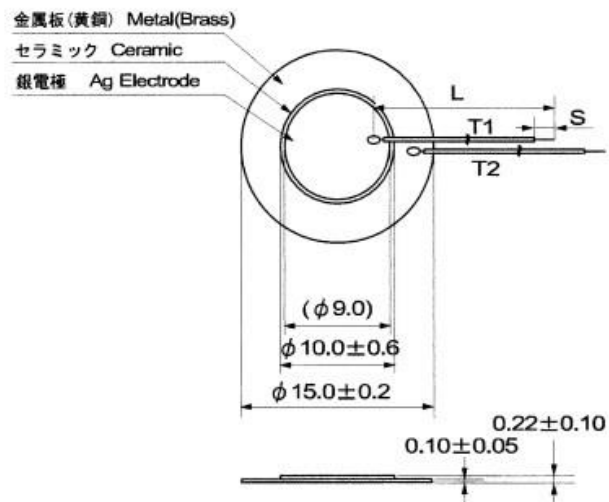
7. 耐候性能 Environmental Characteristics

	試験項目 Item	試験条件 Test Condition	試験後の規格 Specification
7-1	高温放置 Dry Heat Test (Storage)	温度 $+85\pm 2^{\circ}\text{C}$ に 240 時間保持し、常温に取出し 4 時間放置後測定します。 Components shall be left in a chamber (Temperature: $+85\pm 2^{\circ}\text{C}$) for 240 hours, then measured after leaving in natural condition for 4 hours.	第 1 表を満足します。 The measured value shall meet Table 1.
7-2	低温放置 Cold Test (Storage)	温度 $-40\pm 2^{\circ}\text{C}$ に 240 時間保持し、常温に取出し 4 時間放置後測定します。 Components shall be left in a chamber (Temperature: $-40\pm 2^{\circ}\text{C}$) for 240 hours, then measured after leaving in natural condition for 4 hours.	
7-3	耐湿性 Humidity	温度 $+40\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 90~95% R.H.の恒温恒湿槽中に 240 時間保持し、常温に取り出し 4 時間放置後測定します。 Components shall be left in a chamber (90 to 95% R.H. at $+40\pm 2^{\circ}\text{C}$) for 240 hours, then measured after leaving in natural condition for 4 hours.	
7-4	温度サイクル Temperature Cycle	温度 $-40\pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温槽中に 30 分間保持後室温($+20^{\circ}\text{C}$)に 15 分間保持し、更に温度 $+85\pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温槽中に 30 分保持後、室温($+20^{\circ}\text{C}$)に 15 分間保持します。これを 1 サイクルとして 5 サイクル行い、常温に 4 時間放置後測定します。 After being placed in a chamber at $-40\pm 2^{\circ}\text{C}$ for 30 minutes, components shall be placed at room temperature($+20^{\circ}\text{C}$). After 15 minutes at this temperature, components shall be placed in a chamber at $+85\pm 2^{\circ}\text{C}$. After 30 minutes at this temperature, components shall be returned to room temperature($+20^{\circ}\text{C}$) for 15 minutes. After 5 above cycles, components shall be measured after being placed in natural condition for 4 hours.	

表 1 Table 1.

項目 Item	試験後の変化量 Specification after test
共振周波数 Resonant Frequency	初期値 $\pm 10\%$ Initial Value $\pm 10\%$
共振抵抗 Resonant Impedance	2.4k Ω 以下 2.4k Ω max.
静電容量 Electrostatic Capacity	初期値 $\pm 20\%$ Initial Value $\pm 20\%$

8. 外形寸法図 Dimensions



8-1 リード線 Lead Wire

	リード線線番 Lead Wire	UL 番号 UL No.	色 Color	長さ(L) Length (L)	Δネジロ(S) Strip(S)
T1	AWG32	UL-1685	赤・Red	110 ± 5	5 ± 2
T2	AWG32	UL-1685	黒・Black	110 ± 5	5 ± 2

先端部はんだ処理済
Top of the lead wire is soldered

単位 : mm
in mm

() : 参考値
Reference

9. 包装規格 Packaging Standard

最小包装単位毎に品番、数量及びロット番号を表示します。

Each minimum package unit of components shall be in a carton box and it shall be clearly marked with Part Number, quantity and outgoing inspection number.

10. 注意 Cautions

10-1 用途の限定 Limitation of Applications

当製品について、その故障や誤動作が人命または財産に危害を及ぼす恐れがある等の理由により、高信頼性が要求される以下の用途でのご使用をご検討の場合は、必ず事前に当社までご連絡下さい。

- ①航空機器 ②宇宙機器 ③海底機器 ④発電所制御機器 ⑤医療機器
⑥輸送機器(自動車、列車、船舶等) ⑦交通用信号機器 ⑧防災／防犯機器
⑨情報処理機器 ⑩その他上記機器と同等の機器

Please contact us before using our products for the applications listed below which require especially high reliability for the prevention of defects which might directly cause damage to the third party's life, body or property .

- ①Aircraft equipment
②Aerospace equipment
③Undersea equipment
④Power plant control equipment
⑤Medical equipment
⑥Transportation equipment(vehicles, trains, ships, etc.)
⑦Traffic signal equipment
⑧Disaster prevention / crime prevention equipment
⑨Data-processing equipment
⑩Applications of similar complexity and /or with reliability requirements to the applications listed in the above.

10-2 フェールセーフ機能の付加 Fail-safe

当製品に万が一異常や不具合が生じた場合でも、二次災害防止のために完成品に適切なフェールセーフ機能を必ず付加して下さい。

Be sure to provide an appropriate fail-safe function on your product to prevent a second damage that may be caused by the abnormal function or the failure of product.

11. 使用上の注意 Caution for Use

- 11-1 本体を素手で扱わないで下さい。本体を素手で扱うと、短期間で錆が生じます。
Please do not touch the component with bare hand because electrode may be corroded.
- 11-2 本体中央部に荷重をかけると、セラミックにクラックを生じることがあります。周辺支持にて使用する際は、支持部のみに荷重をかけて取り扱って下さい。
Applying load on the center area of the component may cause crack in the ceramic element. When the component is supported by edge, the load should be only applied around edge.
- 11-3 本体に規格以上の衝撃が印加された場合、不具合を生じることがありますので、取扱いには十分にご注意下さい。
The component may be damaged if mechanical stress over this specification is applied.
- 11-4 落下衝撃、熱衝撃によりサージ電圧が発生しますので、回路設計には十分ご注意下さい。
Please pay attention to protect operating circuit from surge voltage provided by something of force such as falling, shock and temperature changing.
- 11-5 本体に直流電圧を印加された場合、不具合を生じることがありますので、回路設計には十分注意して下さい。
Please pay attention never to be applied DC voltage to component.
- 11-6 圧電振動板にはんだ付される場合は必ずご相談下さい。
Please consult with Murata or Murata representative, in case of soldering on component.
- 11-7 IC等により駆動する際、安定鳴動及びIC保護用にIC出力端と本体に直列抵抗約1~2kΩを挿入するか、本体と並列にダイオードを挿入して、ご使用下さい。
The resistor should be used as shown in Fig. A. A suitable resistance value should be chosen, preferably 1kΩ to 2kΩ. Instead of this measure, a diode may also be applied as shown in Fig. B.

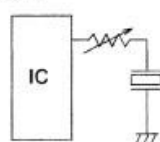


Fig.A

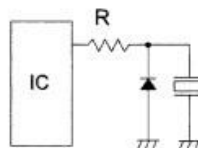


Fig.B

- 11-8 リード線に必要以上の力を加えると、断線・はんだ点取れの原因となります。取り扱いには十分ご注意下さい。
Please pay enough attention not to pull lead wire too much because wire may be broken or soldering point may come off.

12. お願い Note

- 12-1 ご使用に際しましては、貴社製品に実装された状態で必ず評価して下さい。
Please make sure that your product has been evaluated in view of your specifications with our product being mounted to your product.
- 12-2 当製品を当納入仕様書の記載内容を逸脱して使用しないで下さい。
You are requested not to use our product deviating from this product specification.
- 12-3 お手数ですが、当納入仕様書に貴社受領印を押印の上、1部を弊社へご返却下さい。
3ヶ月以内にご返却いただけない場合、又は、当納入仕様書をご返却いただく前にご注文をいただいた場合は、当納入仕様書は、その時点で受領されたものとさせていただきます。
Please return one duplicate of this product specification to us with your signature to acknowledge your receipt. In case of no return within three months from submission date, or if we receive order before the duplicate is returned, this product specification will be deemed to have been received by you.
- 12-4 弊社は、仕様書、図面その他の技術資料には、取引に関する契約事項を記載することは適切ではないものと存じております。従って、もし、貴社が作成されたこれら技術資料に、品質保証、P L、工業所有権等にかかる弊社の責任の範囲に関する記載がある場合は、当該記載は無効とさせていただきます。これらの事項につきましては、別途取引基本契約書等においてお申し越しいただきたくお願いします。
We consider it not appropriate to include any terms and conditions with regard to the business transaction in the product specifications, drawings or other technical documents. Therefore, if your technical documents as above include such terms and conditions such as warranty clause, product liability clause, or intellectual property infringement liability clause, they will be deemed to be invalid.