

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Medição de impedância para monitoramento  
da vazão multifásica pela técnica da correlação**

**Fabiano Gabriel da Silva**

Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Medição de impedância para monitoramento  
da vazão multifásica pela técnica da  
correlação

Por

**Fabiano Gabriel da Silva**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador: Edval José Pinheiro Santos, Ph.D.**

Recife, Fevereiro de 2012.

©Fabiano Gabriel da Silva, 2012

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S586m Silva, Fabiano Gabriel da .  
Medição de impedância para monitoramento da vazão multifásica pela técnica da correlação/ Fabiano Gabriel da Silva- Recife: O Autor, 2012.  
85folhas.; il. e tab.

Orientador: Ph.D Edval José Pinheiro Santos.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2012.  
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Elétrica. 2. Sensores. 3. Vazão. 4. escoamento Multifásico. 5. LabVIEW®. 6. Lock-in. I. Santos, Edval José Pinheiro (Orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.) BCTG/2014-056



# Universidade Federal de Pernambuco

## *Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

# FABIANO GABRIEL DA SILVA

TÍTULO

**“MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA PARA MONITORAMENTO DA VAZÃO  
MULTIFÁSICA PELA TÉCNICA DA CORRELAÇÃO”**

A comissão examinadora composta pelos professores: EDVAL JOSÉ PINHEIRO SANTOS, DES/UFPE; MARCO AURÉLIO BENEDETTI RODRIGUES, DES/UFPE e HÉLIO MAGALHÃES DE OLIVEIRA, DES/UFPE sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **FABIANO GABRIEL DA SILVA APROVADO**.

Recife, 29 de fevereiro de 2012.

---

**CECILIO JOSÉ LINS PIMENTEL**  
Coordenador do PPGEE

---

**EDVAL JOSÉ PINHEIRO SANTOS**  
Orientador e Membro Titular Externo

---

**HÉLIO MAGALHÃES DE OLIVEIRA**  
Membro Titular Externo

---

**MARCO AURÉLIO BENEDETTI  
RODRIGUES**  
Membro Titular Interno

## Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por todas as oportunidades que ele tem dado na minha vida, pela saúde e motivação para poder enfrentar os obstáculos que determinados momentos na vida temos que superar.

Um agradecimento mais que especial à minha mãe, Francisca, por todo esforço e dedicação que sempre teve para poder proporcionar o melhor para os filhos.

À minha madrinha Gildente e ao meu padrinho Carlos Alfredo que sempre me tiveram como um filho.

Ao Prof. Edval José Pinheiro Santos por todas as oportunidades, confiança e pela orientação.

A todos os professores da UFPE pela excelente qualidade de ensino proporcionada, desde o PROMINP, iniciado em 2008, até o mestrado. Graças a esse conhecimento novas oportunidades surgiram na minha vida.

Um agradecimento especial ao mestre e amigo Gílson Alves, amigo para todas as horas e sempre com uma palavra de incentivo e motivação.

Ao Eng. Rafael Bispo pela grande ajuda no desenvolvimento das aplicações em *LabVIEW*®.

Ao amigo Jacinaldo pelo apoio nas simulações, pelo fornecimento das imagens simuladas e pela amizade.

Ao técnico Rodrigo por estar sempre disponível nos momentos que precisamos.

Ao amigo de longas datas Aldysmithys, pelos ótimos momentos de estudo e aprendizado.

Aos colegas de apartamento, Márcio, Rubens e Ângelo pela torcida sempre positiva.

A todos que fazem do Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) um ambiente sempre amigável e harmonioso, em especial aos colegas de curso, Henrique Müller, Leonardo Bruno, William Guterres, Cleber Renan, Diogo Roberto, André Dantas e Talita.

Aos professores Tomaz Barros e João Paulo por sempre estarem disponíveis a ajudar todos os alunos.

À Suzily pela torcida sempre sincera e por todo apoio que presta a todos que fazem parte do LDN.

*FABIANO GABRIEL DA SILVA*

Universidade Federal de Pernambuco  
Recife, 29 de Fevereiro de 2012

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **Medição de impedância para monitoramento da vazão multifásica pela técnica da correlação**

Fabiano Gabriel da Silva

Fevereiro/2012

Orientador: Edval José Pinheiro Santos, Ph.D.

Área de Concentração: Eletrônica.

Palavras-chaves: sensores, vazão, escoamento multifásico, *LabVIEW*®, *lock-in*.

Número de páginas: 98.

Foi desenvolvido um medidor de impedância elétrica utilizando a técnica de detecção síncrona (*lock-in*). Essa técnica utiliza um sinal de referência para detectar sinais elétricos na presença de níveis altos de ruído, sendo utilizada para medir potenciais elétricos ou correntes elétricas extremamente baixas. Isso ocorre quando se deseja medir condutâncias ou capacitâncias muito pequenas ou muito grandes. Para testar o conceito, o medidor foi implementado e caracterizado utilizando a técnica de instrumentação virtual com o aplicativo *LabVIEW*®. Foram realizadas medições experimentais e caracterização do medidor com resistências e capacitâncias padrão. O objetivo do projeto é utilizar esse instrumento na implementação de um medidor de vazão multifásica pela técnica da correlação. Diversas técnicas podem ser usadas para realizar a medição da vazão. Contudo, de acordo o ambiente e o tipo de fluido a ser medido, algumas são mais eficientes que outras. Isso acaba influenciando na confiabilidade da medição. Escoamentos multifásicos são os que possuem a maior dificuldade de medição por serem compostos por mais de um tipo de fluido (água, óleo, ar etc). A medição de vazão está presente em nosso dia a dia na produção e distribuição de petróleo, postos de combustíveis, nas empresas abastecedoras de água e tratamento de esgotos, nas indústrias de bebida, entre outros. Ela é fundamental para o controle de processos e para tarifação. A exemplo da medição fiscal, para arrecadação de impostos.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **Impedance measurement for monitoring a multiphase flow with the correlation technique**

Fabiano Gabriel da Silva

February/2012

Supervisor: Edval José Pinheiro Santos, Ph.D.

Area of concentration: Electronics.

Keywords: sensors, flow rate, flow meter, *LabVIEW*® , *lock-in*.

Number of pages: 98.

An electrical impedance meter using the synchronous detection technique (lock-in) has been developed. This technique uses a reference signal to detect electrical signals in the presence of high noise levels, being utilised to measuring extremely low electric potential or electrical currents. This occurs when one wishes to measure very small or very large capacitances or conductances. To test the concept, the meter was implemented and characterized using the virtual instrumentation technique in the *LabVIEW*® software environment. Experimental measurements were performed with resistors and capacitors. To characterize the impedance meter standard resistors and capacitors were used. The project goal is to use this instrument in the implementation of a multiphase flow meter with the correlation technique. Several techniques can be used to perform flow measurement, depending on the environment and the type of fluid to be measured, some are more effective than others. This ends up influencing the reliability of the measurement. Multiphase flow are those having the greater difficulty of measuring as they are composed of more than one type of fluid (water, oil, air, etc.). Flow measurement is present in our day-to-day, in the production and distribution of oil, gas stations, in the water supply and sewage treatment companies, beverage industries, among others. It is a key measurement for process control and pricing. As in the example of fiscal measurement, for collection of taxes.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Medição de vazão</b>	<b>1</b>
1.1	Escoamento multifásico . . . . .	1
1.2	Medição de vazão . . . . .	5
1.2.1	Medidores de vazão . . . . .	6
1.2.2	Diferencial de pressão . . . . .	7
1.2.3	Correlação cruzada . . . . .	9
1.3	Medição da vazão multifásica . . . . .	10
1.4	Técnicas de medição de impedância . . . . .	15
1.4.1	Impedancímetro . . . . .	17
1.4.2	Ponte de Wheatstone . . . . .	18
1.4.3	Medição com a técnica síncrona <i>lock-in</i> . . . . .	20
1.5	Organização da dissertação . . . . .	22
<b>2</b>	<b>Implementação do medidor</b>	<b>24</b>
2.1	Proposta de medidor multifásico . . . . .	24
2.2	Processamento Paralelo . . . . .	25
2.2.1	Paralelismo de tarefas . . . . .	27
2.2.2	Paralelismo de dados . . . . .	27
2.2.3	<i>Pipelining</i> . . . . .	27
2.3	Instrumentação virtual . . . . .	29
2.3.1	Criando um instrumento virtual . . . . .	30
2.3.2	Funcionamento do programa . . . . .	34
2.4	Implementação do amplificador síncrono . . . . .	37

2.5	Implementação com vários amplificadores síncronos . . . . .	37
2.6	Considerações finais . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Caracterização do <i>lock-in</i></b>	<b>43</b>
3.1	Sistema multieletrodo e modelo . . . . .	43
3.1.1	Projeto para construção de sistema multieletrodo . . . . .	44
3.2	Caracterização do processo de paralelismo de dados . . . . .	45
3.2.1	Sistema multiprocessos . . . . .	45
3.2.2	Variação da taxa de amostragem . . . . .	48
3.2.3	Variação da frequência do sinal . . . . .	49
3.3	Planta de vazão . . . . .	50
3.4	Curvas de calibração . . . . .	51
3.4.1	Comparação . . . . .	52
3.5	Resultados da medição e análise . . . . .	54
3.5.1	Resultado da visualização do deslocamento de fase . . . . .	56
3.5.2	Resultados obtidos através do <i>LabVIEW</i> ® . . . . .	57
3.5.3	Resultados do sistema multiprocesso . . . . .	59
3.5.4	Resultados obtidos com variação de frequência . . . . .	66
3.6	Considerações finais . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>68</b>
<b>A</b>	<b>Informações adicionais</b>	<b>80</b>
A.1	Diagramas . . . . .	80
A.2	Tabelas . . . . .	80

# Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros <i>DAQ</i> - 6363. . . . .	32
3.1	Valores mínimo, máximo e médio em farads (F) - Coleta 1. . .	62
3.2	Valores mínimo, máximo e médio em farads (F)- coleta 2. . . .	62
3.3	Valores mínimo, máximo e médio em farads (F) - coleta 3. . .	62
3.4	Valores mínimo, máximo e médio em farads (F) - coleta 4. . .	63
3.5	Valores mínimo, máximo e médio em farads (F)- coleta 5. . . .	63
3.6	Valores pilha com 32 posições de armazenamento em farads (F).	63
3.7	Resumo dos valores calculados pelo sistema multiprocesso armazenados nas pilhas com 16 elementos em farads (F) com somatório dos valores armazenados nas pilhas P1 e P2, do produto entre as pilhas P1 e P2, raiz quadrada do somatório dos produtos com taxas de amostragem de 1 mil, 10 mil e 100 mil amostras/segundo (a/s). . . . .	65
3.8	Resumo dos valores calculados pelo sistema multiprocesso armazenados nas pilhas com 32 elementos em farads (F) com somatório dos valores armazenados nas pilhas P1 e P2, do produto entre as pilhas P1 e P2, raiz quadrada do somatório dos produtos com taxas de amostragem de 1 mil, 10 mil e 100 mil amostras/segundo (a/s). . . . .	66
3.9	Leituras em farads (F) variando entre 3 kHz e 7 kHz. . . . .	66
A.1	Valores teóricos das tensões de saída por capacitância. . . . .	82
A.2	Valores experimentais das tensões de saída por capacitâncias. Foi utilizado um Capacitor de precisão - <i>CS 301 Precision</i> com capacitância residual de 40 pF. . . . .	83

A.3	Comparação entre medições. Como referência foi utilizado um capacitor de precisão - <i>CS 301 Precision</i> com capacitância residual de 40 pF. . . . .	84
A.4	Comparação resultados multímetro e <i>lock-in</i> . Como referência foi utilizado um resistor de precisão - <i>RS 201 Precision</i> . . . . .	85

# Lista de Figuras

1.1	Triângulo do escoamento multifásico. . . . .	2
1.2	Escoamentos horizontais. . . . .	4
1.3	Tipos de escoamento vertical. . . . .	5
1.4	Efeitos do regime de escoamento [21]. . . . .	13
1.5	Medição de impedância automonitorado. . . . .	15
1.6	Sensor capacitivo. . . . .	16
1.7	Medição de impedância: a) método amplitude-fase b) método ponte virtual. . . . .	17
1.8	medidor ponte. . . . .	19
1.9	Diagrama amplificador <i>lock-in</i> . . . . .	21
2.1	Proposta do medidor multifásico. . . . .	25
2.2	Paralelismo no <i>LabVIEW</i> ®. . . . .	28
2.3	Técnica de paralelismo de dados. . . . .	28
2.4	Paralelismo com a técnica de <i>pipelining</i> . . . . .	29
2.5	Painel frontal e diagrama de blocos. . . . .	30
2.6	Fluxo de criação de instrumento virtual. . . . .	31
2.7	Fluxo de funcionamento do sistema. . . . .	33
2.8	Blocos de telas <i>LabVIEW</i> ®. . . . .	35
2.9	Comparação <i>LabVIEW</i> ® e <i>lock-in</i> . . . . .	36
2.10	Painel frontal do amplificador <i>lock-in</i> . . . . .	37
2.11	Aquisição dos sinais de entrada . . . . .	38
2.12	Filtragem dos sinais de entrada e cálculo da diferença de fase .	39
2.13	Identificação das cargas . . . . .	40

2.14	Cálculo dos valores das impedâncias . . . . .	40
2.15	Diagrama de blocos que ler e grava na pilha P1 . . . . .	41
2.16	Diagrama de blocos que ler e grava na pilha P2 . . . . .	41
2.17	Diagrama de blocos com a multiplicação dos vetores . . . . .	42
2.18	Painel do amplificador <i>lock-in</i> com paralelismo . . . . .	42
3.1	Relação entre os eletrodos. . . . .	44
3.2	Modelo (a) dois eletrodos e (b) quatro eletrodos. . . . .	44
3.3	Detalhe do projeto do sistema com dois eletrodos. . . . .	45
3.4	Sistema multiprocessos. . . . .	46
3.5	Tela processamento da pilha. . . . .	47
3.6	Painel frontal com resultado das impedâncias. . . . .	48
3.7	Variação da taxa de amostragem no <i>DAQmx</i> . . . . .	49
3.8	Planta para ensaio em medidores de vazão. . . . .	50
3.9	Gráfico teórico da tensão de saída do <i>lock-in</i> . . . . .	52
3.10	Resultado experimental da tensão de saída do amplificador síncrono <i>lock-in</i> . . . . .	53
3.11	Resultado da medição de capacitância lock-in × multímetro. . . . .	53
3.12	Resultado da medição da condutância. . . . .	53
3.13	Ambiente de simulação. . . . .	54
3.14	circuito de condicionamento. . . . .	55
3.15	Equipamentos utilizados no experimento. . . . .	56
3.16	Tensões de saída para 100 pF e 200 pF. . . . .	57
3.17	Tensões de saída para 500 pF e 1 nF. . . . .	57
3.18	Interface homem máquina do amplificador <i>lock-in</i> . . . . .	58
3.19	Formas de onda para capacitâncias de para 100 pF, 200 pF e 300 pF. . . . .	58
3.20	Formas de onda para capacitâncias de 500 pF, 1 nF e 1.5 nF. . . . .	58
3.21	Placa de aquisição com sinal de saída derivado com conector bnc tipo T. . . . .	59

3.22	Diagrama de ligação placa de condicionamento, <i>DAQ</i> com as entradas analógicas (ai0, ai1 e ai2), gerador de sinal e osciloscópio. . . . .	60
3.23	Interligações entre o gerador de sinal, osciloscópio, placa de aquisição e <i>DAQ</i> . . . . .	60
3.24	Paralelismo com dados armazenados em 16 posições de memória e taxa de amostragem de 1 mil amostras/segundo. Com S1 e S2 tendo o mesmo valor de referência de 4,9 pF, originado da placa de aquisição de dados. A variável n indica a posição do valor armazenado na pilha. . . . .	63
3.25	Paralelismo com dados armazenados em 32 posições de memória e taxa de amostragem de 1 mil amostras/segundo. Com S1 e S2 tendo o mesmo valor de referência de 4,9 pF, originado da placa de aquisição de dados. A variável n indica a posição do valor armazenado na pilha. . . . .	64
3.26	Paralelismo com dados armazenados em 16 posições de memória e taxa de amostragem de 10 mil amostras/segundo. Com S1 e S2 tendo o mesmo valor de referência de 4,9 pF originado da placa de aquisição de dados. A variável n indica a posição do valor armazenado na pilha. . . . .	64
3.27	Paralelismo com dados armazenados em 32 posições de memória e taxa de amostragem de 10 mil amostras/segundo. Com S1 e S2 tendo o mesmo valor de referência de 4,9 pF originado da placa de aquisição de dados. A variável n indica a posição do valor armazenado na pilha. . . . .	65
3.28	Leitura da pilha com 100 mil amostras/segundo. n indica a posição do valor armazenado na pilha. . . . .	67
A.1	Pinagem dispositivo de aquisição de dados( <i>DAQ</i> ) 6363 [86] . . .	81

# Capítulo 1

## Medição de vazão

A medição de vazão está presente em nosso dia a dia sendo fundamental para o monitoramento, controle, transferência de custódia, incluindo cobranças de impostos, na produção e distribuição de petróleo, postos de combustíveis, nas empresas abastecedoras de água, nas empresas de tratamento de esgotos, nas indústrias de bebida e alimentícia. A vazão multifásica ocorre na produção, transporte e refino de petróleo, gerenciamento de reservatórios, sistemas de detecção de vazamentos, controle de processos de produção.

### 1.1 Escoamento multifásico

O escoamento multifásico pode ter duas ou mais fases fluidas presentes simultaneamente em uma mesma tubulação. Ele é um fenômeno complexo devido a grande quantidade de regimes de escoamento. Características monofásicas, tais como perfil de velocidade, turbulência e camada limite, são portanto inadequadas para descrição da natureza do escoamento [1].

Um sistema multifásico consiste em uma fase contínua, ou meio fluído, e uma fase particulada ou dispersa com qualquer número de componentes químicos. A fase contínua pode se tratar de um meio líquido ou gasoso e a fase dispersa pode estar constituída por partículas sólidas, bolhas de gás (exceto claro, no caso da fase contínua ser gasosa) ou gotas de líquido [2].

Na vazão multifásica os fluidos estão sujeitos ao fenômeno chamado de escorregamento, que é o termo usado para descrever as condições em que o escoamento possui fases com velocidades diferentes em uma seção transversal de conduto. O escorregamento pode ser quantitativamente expressado pela diferença de velocidade entre as fases [1].

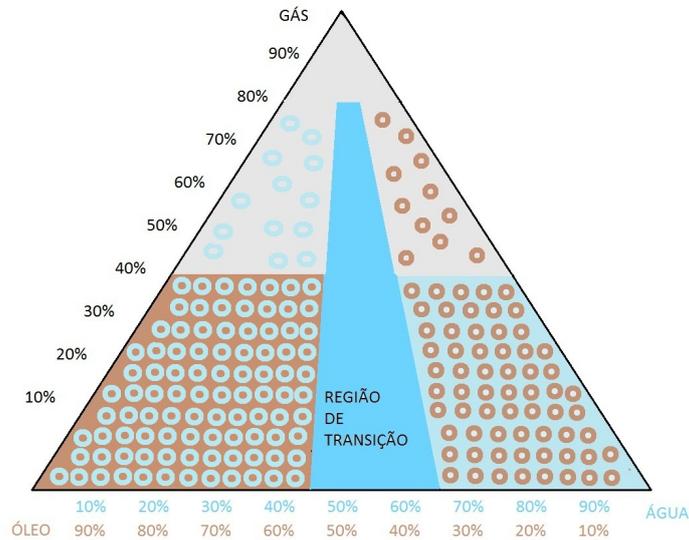


Figura 1.1: Triângulo do escoamento multifásico.

Neste contexto, o conceito de fase é generalizado no sentido de que não está se referindo a fase do ponto de vista do estado termodinâmico, em que uma mesma substância existe nas formas sólida, líquida ou gasosa. Fase não está relacionado ao estado da matéria, mas sim ao número de interfaces presentes no escoamento multifásico [3]. Considerando um escoamento com três fases em estados termodinâmicos distintos, a distribuição das fases e como elas se organizam para formar novos escoamentos é mostrada na Figura 1.1. Nas pontas do triângulo se têm as fases sólida, líquida e gasosa. De acordo com o deslocamento, o percentual de cada fase pode aumentar ou diminuir. Essa organização e deslocamento das fases dentro da tubulação dá origem aos diversos escoamentos que se classificam em horizontal e vertical [1] [6].

O escoamento multifásico está cada vez mais presente em diversas áreas da indústria (Elétrica, Química, Mecânica, Petrolífera). Esse tipo de escoamento dificulta a medição individual das propriedades e parâmetros dos fluidos envolvidos, fazendo com que haja um maior investimento para que a medição seja feita de forma mais eficiente [7]. A medição pode ser feita separando as fases ou sem separação. Especialistas na área de petróleo concordam que chegou o momento de analisar com mais detalhes o uso de tecnologia para medição multifásica, sem haver separação de fases [7].

A medição sem a separação de fases traz vantagens:

- Maior precisão nos resultados dos testes;

- Curto período de testes com mais resultados; e
- Ferramenta para diagnóstico e otimização de produção.

Os medidores multifásicos permitem um monitoramento contínuo. Esse tipo de tecnologia é complexo e tem limitações. Uma dessas limitações é devido a presença de amostras de outros fluidos [4] [5]. Existe a necessidade de novas tecnologias para medição de escoamentos multifásicos. O uso de medidores multifásicos pode poupar custos na instalação inicial, mas devido a incerteza nas medições deve ser feita uma análise de custos em todo projeto [4] [5].

### Escoamento horizontal

Na Figura 1.2 são apresentados os escoamentos horizontais.

- **névoa:** Caracterizado por velocidades superficiais de gás e líquido muito altas. Todo líquido encontra-se disperso no núcleo gasoso e as gotículas formadas pelo líquido viajam a mesma velocidade superficial do gás;
- **bolhas:** Tende a se dispersar no topo da tubulação com a fase líquida contínua;
- **tampão:** Com o aumento da velocidade da fase gasosa no escoamento em bolhas, há o coalescimento, formando bolhas alongadas em forma de balas, que tendem a escoar no topo da tubulação;
- **estratificado:** Caracteriza-se pela separação gravitacional total das fases líquida e gasosa com escoamento contínuo de cada fase;
- **ondulado:** Com o aumento da velocidade da fase gasosa, no escoamento estratificado, ondas são formadas na interface de separação líquido gás, gerando o regime ondulado;
- **golfada:** Aumentando ainda mais a velocidade do gás no escoamento ondulado, as ondas passam a ocupar, em alguns casos, toda a seção

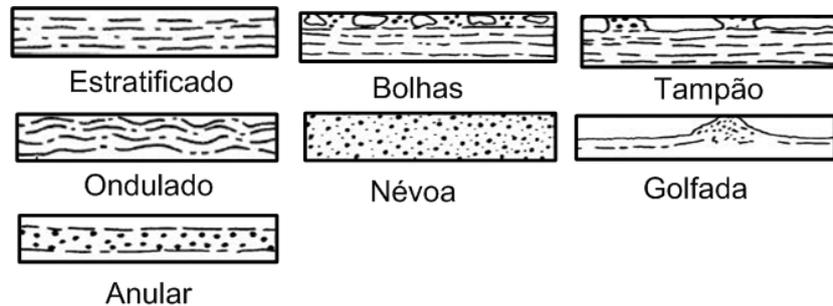


Figura 1.2: Escoamentos horizontais.

transversal da tubulação formando golfadas, que são rapidamente deslocadas dentro da tubulação; e

- **anular:** Ocorre com altas vazões de gás. O líquido escoar na superfície interna da tubulação, formando um filme com bolhas dispersas, e o gás escoar dentro da tubulação, carregando líquido atomizado.

### Escoamento vertical

Na Figura 1.3 são apresentados os escoamentos verticais.

- **bolhas:** A fase gasosa se encontra dispersa na fase líquida em forma de bolhas discretas, sendo a fase líquida contínua. Esse escoamento ocorre para baixas velocidades superficiais de gás;
- **golfadas:** aumentando a velocidade da fase gasosa, as bolhas coalescem e o diâmetro dessa nova bolha atinge dimensão similar com a da tubulação;
- **transição:** Apresenta velocidades de gás e líquido maiores do que o escoamento golfadas, a quebra das bolhas do escoamento em golfadas conduz a um padrão instável e desordenado, onde existe um movimento oscilatório de líquido para cima e para baixo na tubulação; e

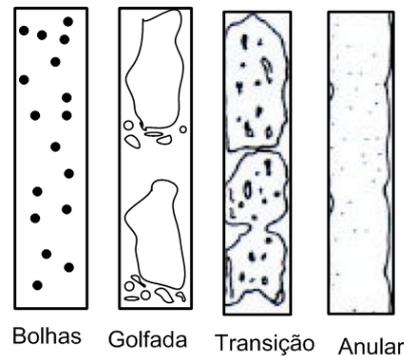


Figura 1.3: Tipos de escoamento vertical.

- **anular:** O líquido esco na periferia do duto formando um filme com bolhas dispersas e o gás esco no centro da tubulação, carreando gotículas de líquido.

Na produção de petróleo a medição de fluidos é feita constantemente com a finalidade de melhorar o gerenciamento do reservatório e otimizar a produção. É importante medir com precisão os fluidos produzidos nos poços de petróleo para termos uma eficiente exploração e produção [10]. Além de justa cobrança de impostos.

No sistema de medição convencional os fluidos são medidos individualmente através de separadores e após isso é feita a medição da vazão de cada fluido. A utilização desse processo requer uma série de exigências: infra-estrutura, qualificação profissional, medidores de vazão convencionais. Outros aspectos em relação ao separador convencional são: eficiência abaixo de 100%, erros sistemáticos devido a contaminação dos separadores, desgaste físico dos separadores devido ao tempo de utilização, alteração das condições operacionais.

## 1.2 Medição de vazão

Vazão é a quantidade de fluido que passa pela seção reta de um duto, por unidade de tempo, pode ser medida em volume (vazão volumétrica) ou em massa (vazão mássica). Quando se trata de vazão volumétrica, nos casos de fluidos compressíveis, exemplo gases, é necessário especificar a referência do volume em relação às condições de temperatura e pressão de operação, ou se é convertido às condições de referência [9].

Na Equação 1.1 se tem a definição da vazão volúmetrica e na Equação 1.2 a definição da vazão mássica.

$$\dot{Q} = Q = \frac{\text{volume}}{\text{tempo}} \quad (1.1)$$

$$\dot{W} = W = \frac{\text{massa}}{\text{tempo}} \quad (1.2)$$

Percebe-se que existe uma relação entre as vazões mássica e volúmetrica que é dada pela Equação 1.3. Essa relação é a densidade e pode ser vista na Equação 1.4.

$$W = \rho Q \quad (1.3)$$

$$\rho = \frac{W}{Q} \quad (1.4)$$

Como exemplo de unidade de vazão mássica é o kilograma por hora (kg/h) e para a vazão volúmetrica tem o metro cúbico por hora ( $m^3/h$ ). Uma unidade muito usada é barris por dia (*barrels per day* ou bpd).

### 1.2.1 Medidores de vazão

A seguir mostra-se a listagem dos principais medidores de vazão existentes no mercado:

- Diferencial de pressão:
  - Placa de orifício;
  - Bocais de vazão; e
  - Venturi.
- Tubo de pitot;
- Efeito coriolis;
- Eletromagnético;
- Térmico;
- Ultras-sônico;

- Vórtice;
- Correlação cruzada; e
- Laser.

A seguir apresenta-se detalhes adicionais das técnicas mais comumente utilizadas em aplicação de medição de petróleo, são elas: diferencial de pressão e correlação cruzada.

### 1.2.2 Diferencial de pressão

Os elementos geradores de pressão diferencial constituem-se em restrições para o fluxo quando montados em tubos. A análise do comportamento da pressão indica estabilidade na região montante do elemento primário, com pequeno aumento na região adjacente à placa. Após a passagem do fluido pelo orifício ocorre uma queda brusca na pressão, iniciando-se, posteriormente, a recuperação parcial.

#### Equação da continuidade

A Equação 1.5 é denominada equação de Bernoulli para fluidos incompressíveis. Estabelece a relação entre as velocidades e as pressões, numa tubulação, cujo diâmetro tem variação, num certo trecho, ao passar de uma seção 1 para um seção 2. É uma consequência da conservação da energia. Aplicada a líquidos incompressíveis que fluem em tubulação completamente preenchida.

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{V_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} \quad (1.5)$$

Considerando a conservação da massa, a vazão volumétrica pode ser dada num determinado instante pelo produto velocidade por seção [9], como visto na Equação 1.6, em que a seção varia de  $S_1$  para  $S_2$ .

$$S_1.V_1 = S_2.V_2 = Q_V \quad (1.6)$$

Manipulando a Equação 1.5 e empregando os símbolos  $\beta$  e  $E$ , chega-se a Equação 1.7 que calcula a vazão em função das dimensões da tubulação, sendo a expressão teórica fundamental que gera as demais equações na medição de vazão.

$$V_1 = E.\beta^2.\sqrt{\frac{2}{\rho}.(P_1 - P_2)} \quad (1.7)$$

em que,

$$E = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^4)}}$$

$$\beta = \frac{d}{D}$$

d = diâmetro da seção 1

D = diâmetro da seção 2

### **Coefficiente de descarga**

Ele permite o uso prático da equação de Bernoulli. Seu cálculo é através da relação entre as vazões real e vazão teórica, Equação 1.8

$$C = \frac{Vazao_{real}}{Vazao_{teorica}} \quad (1.8)$$

### **Número de Reynolds**

Classifica os escoamentos em relação a velocidade. É calculado como o produto da velocidade do escoamento pelo diâmetro da tubulação dividido pela viscosidade.

$$Re = V \cdot \frac{D}{\nu} \quad (1.9)$$

em que, V = velocidade (m/s), D = diâmetro (m),  $\nu$  = viscosidade ( $m^2/s$ ).

De acordo com o número de Reynolds, os escoamentos podem ser classificados em:

- $Re < 2000$ , regime laminar;
- $2000 \leq Re \leq 4000$ , regime transitório; e
- $Re \geq 4000$ , regime turbulento.

Os medidores de pressão diferencial são bastante citados por autores, devido sua robustez, confiabilidade e baixo custo de construção e manutenção. Os medidores por diferencial de pressão são classificados em: orifício, bocal e venturi.

- **As placas de orifício:** São indicadas para medição de líquidos, gases e vapores. A relação entre a vazão e o diferencial de pressão segue a Equação 1.7.
- **Bocal de vazão:** Seu princípio de operação é idêntico ao das placas de orifício, constituindo-se em elemento primário gerador de pressão diferencial.  
Pode operar com: líquidos limpos, sujos, viscosos ou corrosivos, gases limpos ou sujos e vapor.  
A aplicação principal dos Bocais é a medição de vapor em regime severo de pressão, temperatura e velocidade; pela sua rigidez é dimensionalmente mais estável que as placas de orifício em velocidade e temperatura elevadas; é o caso típico do vapor superaquecido em saídas de caldeira.
- **Venturi:** Pode operar com líquidos, gases e vapor. São instalados em série com a tubulação e a passagem do fluido pela garganta gera aumento da velocidade e redução da pressão estática do fluido. Dentre as aplicações do Venturi destaca-se a medição de ar de combustão de caldeiras, gases de baixa pressão onde se requer perda de carga permanente reduzida e, pelo mesmo motivo, medição de água em grandes dutos.

Dentre os medidores baseados em diferencial de pressão, destaca-se o venturi [5]. Placas de orifício e bocais podem ser utilizados, mas podem causar turbulências a jusante dos mesmos, favorecendo a emulsificação da mistura, fenômeno não desejado [3].

### 1.2.3 Correlação cruzada

A correlação é uma técnica bastante utilizada em medições. Ela pode ser usada para identificar características dinâmicas de sistemas de telecomunicações, estruturais e de processo. A correlação cruzada pode ser usada para desenvolver medidores de vazão para solucionar problemas industriais e ambientais, que vão desde o fluxo de líquidos altamente poluídos em tubos para o fluxo de gás a partir de jatos vulcânicos. Medidores de vazão por correlação cruzada tornaram-se uma proposta realista por causa da redução do custo de circuitos integrados VLSI (*Very Large Scale Integration*) e microprocessadores a partir do qual o dispositivo de correlação podem ser realizados.

A correlação cruzada pode ser utilizada em sistemas de radares, sonares e uma de suas vantagens é poder descartar sinais de ruído [45]. É definido como apresentado a seguir.

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t - \tau)y(t)dt. \quad (1.10)$$

em que,

$x(t)$  e  $y(t)$  - são os sinais

$\tau$  - Tempo de atraso

$T$  - período de integração

A função de correlação cruzada,  $R_{xy}$  é calculada para diferentes valores do tempo de atraso,  $\tau$ . Ela apresenta um valor máximo quando o tempo de atraso é igual ao tempo de propagação,  $\tau^*$ . Assim a velocidade do escoamento pode ser calculada, como mostrado a seguir.

$$V = \frac{L}{\tau^*} \quad (1.11)$$

em que  $L$  é o espaço entre os pontos que estão sendo medidos.

Entre os sinais que podem ser usados para aplicação da técnica de Correlação cruzada pode-se citar:

1. Microondas;
2. Raios gama;
3. Diferencial de pressão; e
4. Impedância elétrica.

### 1.3 Medição da vazão multifásica

É a medição da vazão de um escoamento de duas ou mais fases sem a separação prévia das mesmas antes de entrar no medidor. Por outro lado, a medição sem perturbação do escoamento pode-se tornar complexa, dependendo do padrão de escoamento encontrado [11] [12] [14].

A medição multifásica em substituição a medição convencional, na indústria do petróleo, pode trazer benefícios para o sistema de produção [19]. As alternativas existentes para medição de vazão em escoamentos multifásicos podem ser enquadradas dentro de três conceitos fundamentais [26]:

1. Realização das medições sem perturbação do escoamento, independentemente do padrão em que este se encontre;
2. Assumindo que não há escorregamento de fase, criando um escoamento disperso e medição da vazão da mistura mais medição da fase; e
3. Separação das fases e medição da vazão de cada uma, utilizando medidores monofásicos.

Existem duas formas básicas de medir vazão em sistemas trifásicos (óleo-água-gás): a primeira, é medir parâmetros de escoamento que são funções das três vazões e correlacionar estes através de relações pré-estabelecidas para determinar as vazões de cada fase. A segunda opção é a medição direta de todas as variáveis necessárias, ou seja, a velocidade de cada fase e duas frações volumétricas, onde a terceira pode ser estabelecida pela conservação do volume [5].

Os medidores multifásicos podem ser separados em duas categorias [22]:

- **Medição por técnica de separação:** Devido a dificuldade na medição direta de componentes trifásicos, técnicas de separação são usadas para segregar óleo, água e gás. Em seguida cada fluxo é medido individualmente.

Em sistemas de medição sem separação, existem três métodos bastante utilizados em campo [3]:

- Medidor venturi acompanhado de um medidor de fração volumétrica de gás baseado em raios gama;
- Diferentes sensores de fluxo para medir a taxa de gás e componentes líquidos[12]. Na medição de gás úmido utiliza-se um vortex para medição volumétrica e dois venturis de diferentes tamanhos para determinação de líquido/gás [13]; e
- Capacitâncias múltiplas. Este método, bastante utilizado em campo, se baseia na medição de capacitância do fluido através de duas placas com eletrodos inseridas no escoamento. O sinal de saída é a medida da capacitância entre as placas, que depende das propriedades dielétricas do fluido que esta passando entre estas. Assim, colocando-se diferentes sensores, a uma distância conhecida, pode-se estimar a partir de uma correlação, a velocidade das grandes bolhas de gás (*slugs*), que é considerada como a velocidade média do gás.

- **Medição online:** A nova geração de medidores multifásicos usa a medição direta para reduzir o espaço exigido pelas plataformas e poços de petróleo. Eles são compactos e tem sensores não intrusivos.
  - maior rapidez na leituras;
  - possibilidade de medições feitas em tempo real;
  - possibilidade de exploração de reservatórios que eram inviáveis economicamente; e
  - melhor controle de vazão de gás das válvulas de *gás lift*.

A vazão é dada pelo produto velocidade, área e fração volumétrica, Equação 1.12. A vazão multifásica total é dada pelo somatório da vazão de cada fluido, Equação 1.13. Na Equação 1.14 tem-se a vazão detalhada com todos os fluidos multifásicos.

$$\dot{Q} = \nu A f \quad (1.12)$$

em que,

$\dot{Q}$  - vazão

$\nu$  - velocidade do fluido

$A$  - área da tubulação

$f$  - fração volumétrica

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{gas} + \dot{Q}_{oleo} + \dot{Q}_{agua} \quad (1.13)$$

$$\dot{Q} = \nu_{gas} A f_{gas} + \nu_{oleo} A f_{oleo} + \nu_{agua} A f_{agua} \quad (1.14)$$

A medição de escoamentos multifásicos é um processo complexo no qual existe dificuldade de medir o escoamento por causa da diferença de velocidade entre os diversos materiais em diferentes fases que compõem o escoamento.

Um dos principais problemas enfrentados pelos medidores multifásicos é que existe uma dependência com o regime de escoamento. Na Figura 1.4 são mostrados três casos de escoamento petróleo-gás com a fração de volume de petróleo a 25%, mas com três tipos de regime de escoamento: (a) homogêneo, (b) estratificado e (c) anular. A leitura da fração volumétrica medida nas figuras foi obtida por um medidor comercial calibrado para regime homogêneo.

Sendo assim, se o regime de escoamento muda, erros consideráveis ocorrerão. Portanto eles só podem ser usados com uma gama limitada de padrões de escoamento (preferencialmente homogêneos ou quase homogêneos). Fluxos de regime independente são de particular importância para medição de vazão em poços inclinados, horizontais ou multilaterais (cada vez mais comuns), porque os regimes de escoamento tendem a ser estratificados ou outros tipos que são difíceis de medir com os medidores multifásicos atuais [21]

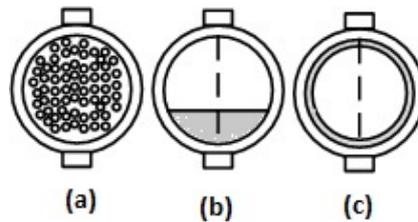


Figura 1.4: Efeitos do regime de escoamento [21].

### Especificações desejadas

- Sem perda de carga; e
- Separar medição da vazão total e medição do percentual da fase.

Existem algumas dificuldades para medições de gás-sólido, são elas: regime de escoamento, velocidade e aceleração [27]. Considerando os fundamentos básicos do escoamento multifásico, existem duas dificuldades principais [4] e [5]:

- a) Quantificar o total de óleo, gás e água presente em cada instante na seção cruzada
- b) Achar a velocidade de cada componente

Foi utilizado um estudo para determinar a influência de parâmetros (viscosidade, pressão e temperatura) na medição do volume de petróleo. O medidor utilizado é o tipo turbina que utiliza a própria energia extraída da vazão medida para seu funcionamento [28].

Outra forma de medição das velocidades de óleo, água e gás é através da equalização com um misturador.

Pode-se construir um medidor de vazão mássica multifásico, já que a vazão mássica é função da densidade, velocidade e da fração volumétrica de cada fase. O medidor seria dividido em três partes:

- a) Medidor de fração volumétrica;
- b) Medidor de velocidade; e
- c) Medidor de densidade.

A eliminação de testes com separadores de fase resulta na redução de custos. Os sistemas com medição multifásica possuem uma série de vantagens em relação aos sistemas de medição convencionais:

#### **Incerteza e erro**

A incerteza e o erro expressam a variação de um dado coletado ou lido em relação a um valor de referência. Eles estão diretamente ligados durante a realização da medição. Eles podem ocorrer devido a diversos fatores: técnicos do equipamento, humanos, ambientais [30].

- sensibilidade estática;
- deslocamento do zero;
- deslocamento da sensibilidade;
- linearidade;
- histerese;
- faixa de operação;
- limiar (*threshold*);
- resolução;
- repetibilidade;
- calibração;
- exatidão; e
- precisão.

#### **Exatidão na medição**

A exatidão na medição é consequência de alguns efeitos. Destacam-se entre eles:

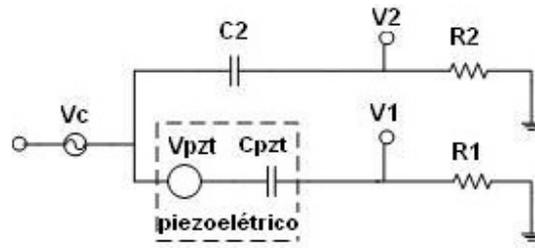


Figura 1.5: Medição de impedância automonitorado.

- regime de escoamento;
- dependência da velocidade;
- dependência com sensor;
- emulsão; e
- salinidade.

## 1.4 Técnicas de medição de impedância

A impedância elétrica é definida como a razão entre a voltagem de entrada e corrente resultante. A impedância mecânica é definida como a razão da força aplicada e a velocidade resultante [63]. O transdutor eletromecânico, como um piezoelétrico, fornece uma maneira de se acoplar as impedâncias elétrica e mecânica. Sendo mais fácil medir a impedância elétrica do que a mecânica, esta característica pode ser utilizada com vantagens para muitas aplicações, onde a função de resposta em frequência poderia ser de difícil obtenção [64].

O método da impedância se coloca como uma técnica de auto-monitoramento [64]. Outro método de auto-monitoramento usando ponte com circuito RC (resistor-capacitor) com um gerador de sinal e um sensor de aceleração é apresentado no trabalho para detecção de danos utilizando sensores piezoelétricos [65]). Como mostrado na figura 1.5

No diagrama,  $V_c$  representa o controle de voltagem e a voltagem de saída é dada pela diferença entre  $V_1$  e  $V_2$ . É necessário realizar o balanceamento preciso do circuito ( $R_1 \text{ CPZT} = R_2 \text{ CPZT}$ ) para prevenir uma contaminação no sinal de saída. Uma tentativa inicial de balanceamento é utilizar o PZT com dimensões similares ao do sensor já fixado na estrutura. Desta maneira é possível obter a real impedância em função da frequência.



Figura 1.6: Sensor capacitivo.

A impedância elétrica de um PZT vinculado a estrutura é igual a tensão elétrica aplicada no PZT dividido pela corrente elétrica que atravessa o mesmo. Na Figura 1.6 exibe-se a voltagem  $V_0$  com o resistor  $R_s$  em série com o PZT.

$$I = \frac{V_0}{R_s} \quad (1.15)$$

A impedância elétrica ( $Z$ ) aproximada é:

$$Z = \frac{V_i}{I} = \frac{V_i \cdot R_s}{V_0} \quad (1.16)$$

Entre os sinais que podem ser utilizados na medição da vazão pela técnica da correlação, pode-se citar a impedância elétrica. Instrumentos para medição de impedância podem ser analógicos, digitais ou podem ser uma combinação dos dois tipos de tecnologia. Instrumentos de medição analógicos são caracterizados por sinais contínuos no tempo. Um sistema de medição puramente analógico mede, transmite, mostra e armazena informações de modo analógico. O condicionamento de sinais é usualmente realizado através da integração de vários blocos funcionais como amplificadores, filtros, osciladores, moduladores, *buffers* entre outros. Um tipo de medidor de impedância analógico bastante comum são os circuitos em ponte. Estes circuitos são basicamente sistemas com dois terminais sendo que a impedância a ser medida é conectada ao circuito e seu valor é calculado através do balanceamento do circuito [57].

Diversas técnicas podem ser usadas para medir impedância, dentre elas:

- Ohmímetro;
- Impedancímetro: amplitude-fase, ponte virtual;
- Ponte de Wheatstone; e

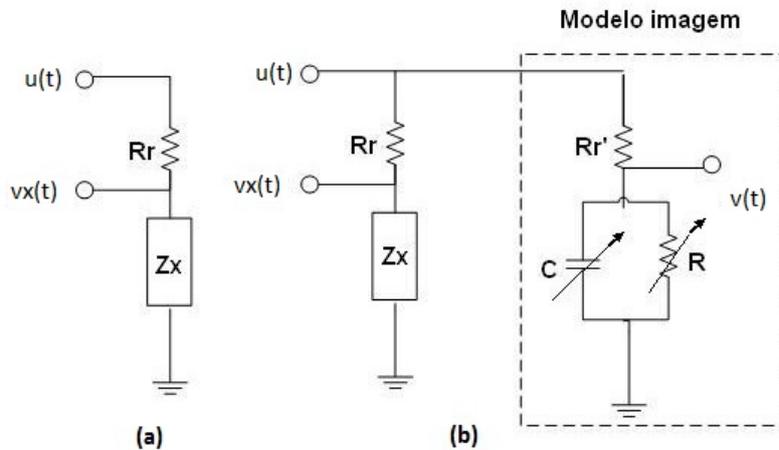


Figura 1.7: Medição de impedância: a) método amplitude-fase b) método ponte virtual.

- Técnica síncrona ou (*Lock-in*).

As técnicas amplitude fase, ponte virtual, método ponte e algoritmo *sine-fitting* possuem limitações no que diz respeito aos valores das impedâncias de referência, os quais sempre precisam ser da mesma ordem de grandeza da impedância desconhecida para minimização dos erros durante o processo de medição. Isso ocorre porque os valores das tensões nas duas impedâncias precisam possuir valores aproximadamente iguais para diminuir erros de quantização durante o processo de conversão analógico/digital [57].

### 1.4.1 Impedancímetro

Considerando que a impedância desconhecida seja da forma  $Z_x = R_x + jX_x$ , são feitas duas considerações:

- 1) A componente  $X_x$  deve ser interpretado de acordo com o tipo de reatância a ser medida; e
- 2) A parte real ( $R_x$ ) indica as perdas.

O sinal senoidal  $u(t)$  e a queda de tensão  $v_x(t)$ , ilustrado na Figura 1.7, são medidos, podendo ser convertidos para o domínio digital.

#### Técnica amplitude-fase

Na técnica Amplitude-fase, Figura 1.7 (a), as partes real e imaginária da impedância desconhecida podem ser determinadas através da medição da

amplitude,  $|Z_x|$ , da impedância e da fase,  $\phi$ .

Definindo  $U$  e  $V_x$  como os valores RMS das tensões  $u(t)$  e  $v_x(t)$ , o módulo de  $Z_x$  pode ser obtido através de

$$|Z_x| = \frac{V_x}{U - V_x} R_r \quad (1.17)$$

A fase  $\phi$  da impedância é o deslocamento entre a tensão  $v_x(t)$  e a corrente  $i(t)$  que flui na impedância  $Z_x$  que é dada por

$$i(t) = \frac{u(t) - v_x(t)}{R_r} \quad (1.18)$$

Assim,

$$R_x = |Z_x| \cos(\phi) \quad (1.19)$$

$$X_x = |Z_x| \sin(\phi) \quad (1.20)$$

### Técnica ponte virtual

A outra técnica é a ponte virtual que consiste em fazer o balanceamento de um ramo virtual implementado através de *software*. como mostrado na Figura 1.7 (b). O balanceamento da ponte é feito através da variação dos parâmetros da ponte virtual até que a diferença entre a tensão medida  $v_x(t)$  e a tensão calculada  $v(t)$  seja a mínima possível. A tensão  $v(t)$  no ramo virtual é caracterizada por uma equação de diferença e o valor RMS da diferença entre as tensões  $v_x(t)$  e  $v(t)$  é minimizado através do ajuste dos parâmetros variáveis  $C$  e  $R$  do ramo virtual a cada instante de tempo.

### 1.4.2 Ponte de Wheatstone

É um método que permite o controle de uma ponte AC através de um microprocessador 8085 [67]. Uma reavaliação da ponte foi feita utilizando DSP, conversores de 12 bits, para obter equações adequadas para uma rápida convergência. o desempenho da ponte, Figura 1.8, foi avaliado para medir longas faixas de impedância [66].

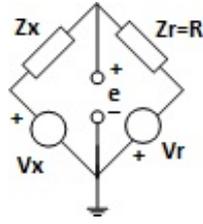


Figura 1.8: medidor ponte.

Nesta ponte  $V_r$  e  $V_x$  são duas fontes de tensão senoidal, com mesma frequência  $\omega_0$ , amplitudes diferentes e fases deslocadas. A tensão de referência  $V_r$  tem amplitude constante  $A$  e fase zero.  $V_x$  tem amplitude e fases deslocadas.

$$V_r = A \text{sen}(\omega_0.t) \quad (1.21)$$

$$V_x = B \text{sen}(\omega_0.t + \phi) \quad (1.22)$$

em que  $B$  e  $\phi$  podem ser controlados pelo balanceamento da ponte. Os outros dois elementos da ponte são a impedância desconhecida  $Z_x$  e a impedância de referência  $Z_r$ . Para simplificar,  $Z_r$  é escolhido ser resistivo,  $Z_r=R$ . Quando a ponte é balanceada (a tensão  $e=0$ ), a impedância desconhecida é dada por:

$$Z_x = R \frac{B}{A} \angle \phi \quad (1.23)$$

$V_x$  pode ser expresso em função das componentes de fase e quadratura.

$$V_x = W_1 A \text{sen}(\omega_0.t) + W_2 A \cos(\omega_0.t) \quad (1.24)$$

$W_1$  e  $W_2$  são os pesos da fase e quadratura, respectivamente. Com  $B$  e  $\phi$  expressos em termos de  $W_1$  e  $W_2$ , pode-se reescrever

$$Z_x = W_1 R + j W_2 R \quad (1.25)$$

$W_1.R$  e  $W_2.R$  são parte real e parte imaginária de  $Z_x$

Para balancear a ponte, os valores iniciais de  $W_1$  e  $W_2$  são escolhidos e o algoritmo iterativo modifica esses valores a cada intervalo de amostragem para forçar a tensão  $e(t)$  a zero e a ponte ao estado de equilíbrio. Neste método, a tensão erro  $e(t)$  a ser minimizada (além de ser função de  $W_1$  e  $W_2$ , é também função de outros parâmetros conhecidos do circuito) é amostrada

periodicamente com período  $T$  através de um conversor analógico/digital. A cada intervalo de amostragem, os valores de  $W_1$  e  $W_2$  são ajustados de modo a minimizar o valor do erro quadrático  $e^2(t)$ .

As duas tensões senoidais  $V_x$  a  $V_r$  são produzidas internamente e convertidas para a forma analógica por meio de dois DACs que são controlados pelo DSP

Um tipo de *Sine-Fitting Algorithm* é usado para determinar as amplitudes, fases, níveis DC e a frequência comum de dois sinais analógicos que são convertidos para a forma digital. Estes sinais são as quedas de tensão através de uma impedância de referência e de uma impedância desconhecida. Uma vez que este algoritmo determina sete parâmetros desconhecidos este é denominado *Seven-Parameter Sine-Fitting Algorithm* [59]. O grande diferencial dessa técnica é o ajuste do ganho programável dos conversores de acordo com o nível de tensão de entrada [57]

A *sine-fitting* é um algoritmo digital que foi utilizado para medição de impedância. Essa técnica foi implementada utilizando computador pessoal, dois conversores analógico/digital e aplica o *Four-Parameter Sine-Fitting Algorithm* para estimar a amplitude, fase, nível DC e frequência dos sinais de tensão em uma impedância de referência e em uma impedância desconhecida [60].

### 1.4.3 Medição com a técnica síncrona *lock-in*

Em algumas aplicações, o sinal a ser medido é muito pequeno e as vezes está abaixo do nível de ruído. Nesses casos, filtros lineares não são suficientes para extrair o sinal com a informação, portanto técnicas especiais tem que ser adotadas. Entre as técnicas pode-se ter: amplificador *lock-in* (analógico ou digital), autocorrelação e correlação cruzada. Todas essas soluções, mesmo se operando com diferentes estratégias, aplicam o mesmo princípio fundamental, que consiste em reduzir, o máximo possível, o ruído de largura de banda [50].

O amplificador *lock-in* permite aumentar o nível dos sinais que estão abaixo do nível de ruído. Para isso, é feito o estreitamento da banda de frequência até que o sinal fique acima do ruído [69].

O amplificador *lock-in* é um instrumento capaz de recuperar o sinal, utilizado principalmente em ótica, mas também em aplicações onde o sinal ruidoso, gerado pelo sensor, tem uma frequência fixa conhecida [71].

Comercialmente os amplificadores *lock-in* são muito caros e não adequados para aplicações portáteis que utilizam uma única célula de bateria [72].

Sendo assim, o amplificador *lock-in* possui diversas aplicações

Na Figura 1.9 apresenta-se o diagrama simplificado do amplificador *lock-in*. O diagrama é formado pelo oscilador externo que é um gerador de sinal, modelo *PM 5190 LF Synthesizer* 1 mHz - 2 MHz. Também tem dois grandes blocos o primeiro formado pelo bloco de condicionamento do sinal e o segundo pelo *LabVIEW*®.

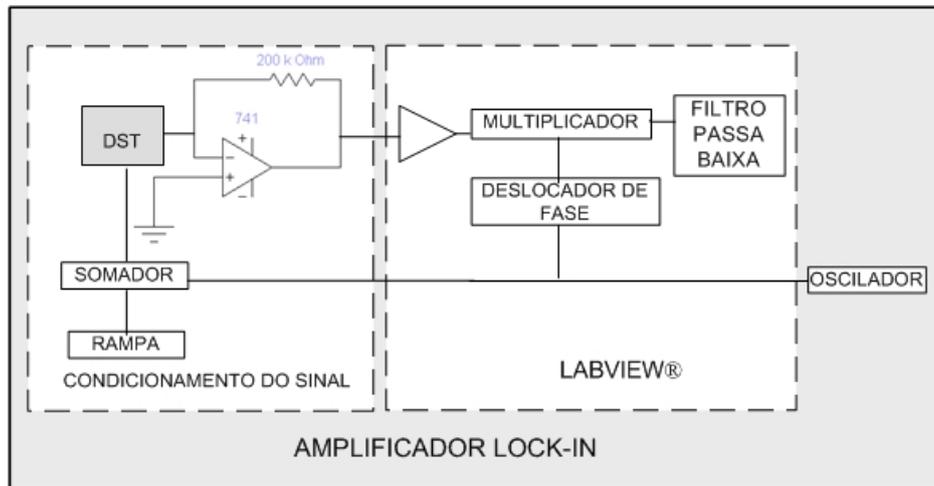


Figura 1.9: Diagrama amplificador *lock-in*.

**oscilador:** O sinal produzido é utilizado para isolar a frequência que se pretende amplificar em meio a uma gama de frequências produzidas pelo ruído.

**filtro passa-baixa:** Tem a função de eliminar a frequência dobro do sinal de saída do multiplicador porque são multiplicados dois sinais de mesma frequência e de fases diferentes, restando assim os termos das fases que terão o papel de regulador de amplitude do sinal de saída do *lock-in*.

**deslocador de fase:** Tem como finalidade deslocar a fase para saber qual elemento está sendo analisado, resistor ou capacitor.

$$V_{osc}(t) = V_g e^{j\omega.t} \quad (1.26)$$

$$V_{teste}(t) = -R_r.V_g.[G.\cos(\omega.t + \theta) - \omega.C.\text{sen}(\omega.t + \theta)] \quad (1.27)$$

$$V_{mult}(t) = -R_r.V_g^2.[G.\cos(\omega.t + \theta) - \omega.C.\text{sen}(\omega.t + \theta)]\cos(\omega.t - \phi) \quad (1.28)$$

$$V_{saiada}(t) = -\frac{R.V_g^2.A_v}{2.\sqrt{1+\omega^2.R^2.C^2}}[G.\cos(\phi+\theta) - \omega.C\text{sen}(\phi+\theta)] \quad (1.29)$$

### Detecção de banda estreita

Supondo que o *lock-in* recebe um sinal mais um ruído, no lugar da senoide pura. O multiplicador e o filtro passa-baixa apenas detectam sinais cujas frequências são muito próximas da frequência de referência do *lock-in*. O ruído, em frequências distantes da de referência, é atenuado na saída do multiplicador pelo filtro passa-baixa. O ruído, nas frequências muito próximas da frequência de referência, irá resultar num sinal AC de frequência muito baixa na saída do multiplicador. A atenuação desse ruído irá depender da banda do filtro passa-baixa. Uma banda estreita irá remover as fontes de ruído muito próximas à frequência de referência. Uma banda muito larga deixará esse ruído passar. A largura de banda do filtro determina a precisão da detecção. Apenas o sinal na frequência de referência irá resultar no verdadeiro sinal DC de saída e ele não será afetado pelo filtro. Esse é o sinal que deseja-se medir.

## 1.5 Organização da dissertação

A motivação do trabalho é desenvolver técnica de medição da vazão de escoamento multifásicos (fluidos com mistura água + ar, água + óleo, etc.) numa planta de testes através da aplicação da técnica de impedância elétrica para posteriormente aplicar a tecnologia em ambientes de poços e tubulações de petróleo.

A dissertação tem como objetivos:

- Desenvolver um medidor de impedância elétrica (resistências e capacitâncias) utilizando a técnica *lock-in*;
- Comparar os resultados obtidos na medição com valores padrão de referência;
- Medir simultaneamente a impedância elétrica de dois tomógrafos instalados na planta; e
- Armazenar a leitura da impedância elétrica dos tomógrafos em pilhas.

Atividades a serem realizadas para atingir esses objetivos:

- Participar no desenvolvimento de um transdutor capacitivo;
- Realizar a medição com a técnica síncrona ou *lock-in*;
- Implementar interface no *LabVIEW*®;
- Calibrar o medidor implementado; e
- Implementar rotina concorrente de medição e armazenamento dos dados coletados.

A dissertação está organizada em quatro capítulos.

- No Capítulo 1, tem-se a introdução à vazão multifásica, incluindo algumas das suas peculiaridades, técnicas de medição de vazão, dando destaque para medição por diferencial de pressão e medição por correlação. Finaliza-se o capítulo falando sobre a medição de impedância com a técnica *lock-in*;
- No Capítulo 2, apresenta-se o uso do *LabVIEW*® na realização das medições, as técnicas de paralelismo utilizadas pelo *LabVIEW*® e a implementação do medidor de impedância desenvolvido no *LabVIEW*®;
- No Capítulo 3, apresenta-se o modelo de sistema multieletrodo, o processo de paralelismo de dados, a planta de vazão, os resultados da medições através das curvas de calibração, os resultados e análise da implementação do transdutor capacitivo e mostra-se; e
- No Capítulo 4, são feitas as conclusões sobre a medição de impedância com a técnica *lock-in* e sugestões de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Implementação do medidor

Neste capítulo é apresentada a implementação do medidor utilizando o aplicativo *LabVIEW*<sup>®</sup> e um dispositivo de aquisição de dados (DAQ). Nessa implementação são utilizados recursos de processamento paralelo. Também são apresentados o roteiro de implementação, o diagrama do sistema implementado e sua caracterização. O medidor implementado é do tipo amplificador síncrono (*lock-in*), que foi caracterizado utilizando resistor e capacitor padrão.

### 2.1 Proposta de medidor multifásico

O objetivo do medidor proposto é medir a vazão por correlação do sinal da impedância e obter o volume da fase pela técnica tomográfica.

O medidor proposto tem que atingir as seguintes necessidades:

- não ser invasivo para eliminar a perda de carga;
- ser seguro para o trabalhador, não utilizando componentes radiativos;
- ser robusto para uso em ambientes agressivos; e
- não precisar de separador, embora assuma que não ocorra escorregamento entre fases.

Na Figura 2.1 mostra-se a proposta do medidor multifásico usando as técnicas da correlação cruzada e tomografia.

Para esse medidor as condições abaixo devem ser atendidas:

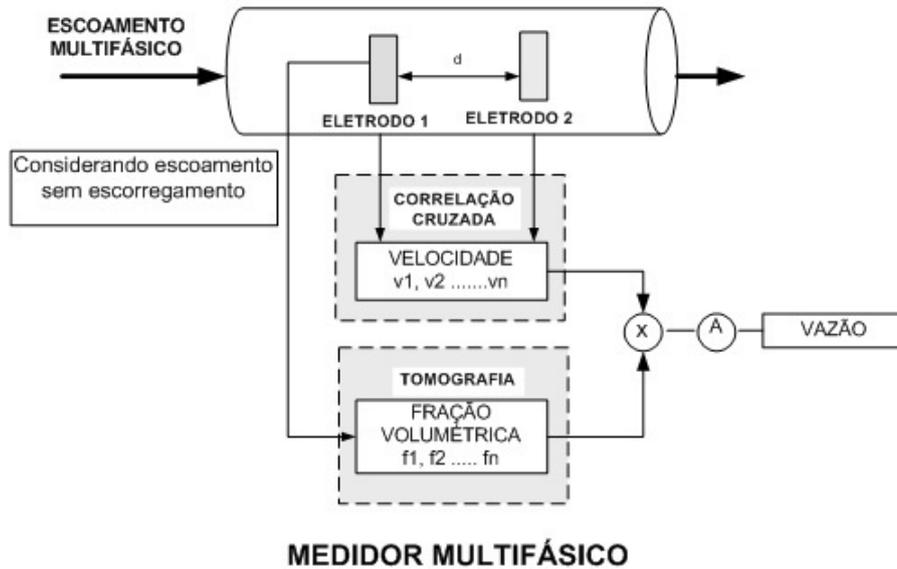


Figura 2.1: Proposta do medidor multifásico.

1. Considerar o fluido sem escorregamento, ou seja todas as fases estão na mesma velocidade;
2. Medir a fração volumétrica de cada fase. Para isso utilizar a técnica da tomografia;
3. Medir a velocidade de cada fase. Utilizar a técnica da correlação cruzada. Essa técnica foi escolhida por causar menos perdas de carga no fluido; e
4. Calcular a vazão de cada fase multiplicando fração volumétrica, velocidade e área. A vazão total será o somatório da vazão de cada fase.

## 2.2 Processamento Paralelo

A comunicação entre processos (IPC - *Inter-Process Communication*) ocorre quando dois ou mais processos necessitam compartilhar ou trocar informações entre si. Ela é um mecanismo de comunicação que usa sistemas de mensagens que permitem aos processos se comunicarem entre si e sincronizarem as suas ações sem a necessidade de compartilhar o mesmo espaço de endereçamento [31]

A frequente necessidade de comunicação entre processos faz com que essa comunicação ocorra de maneira estruturada e sem interrupção.

Para que isso ocorra, três tópicos devem ser analisados [32].

- como um processo passa informação para outro;
- como garantir que dois ou mais processos não invadam uns aos outros quando envolvidos em atividades críticas; e
- dependência entre processos.

O *LabVIEW*® é uma linguagem de programação gráfica baseada em fluxo de dados, em que não há necessidade de escrever o código especificamente para ser executado em paralelo. Em termos computacionais, isto é chamado **paralelismo implícito**. A linguagem gráfica *LabVIEW*® gerencia um certo grau de paralelismo de maneira transparente, embora existam recursos na linguagem para ajudar o compilador na realização do paralelismo [35].

Na linguagem de programação C, cabe ao programador gerenciar o sincronismo através de técnicas comunicação entre processos, tais como: *locks*, *mutexes* e *atomic action*. Quando são gerador muitos encadeamentos de instruções (*threads*), esse gerenciamento da sincronização torna-se muito difícil, podendo resultar em diversos tipos de travamentos, suspendendo a execução do programa. Exemplos de travamentos são apresentados a seguir [35]:

- *Deadlock* - os encadeamentos de instruções (*threads*) ficam esperando em suspenso alguma ação e não podem prosseguir com o processamento;
- *Livelock* - os (*threads*) são colocados em execução, mas não prosseguem pois aguardam alguma ação;
- *Race Conditions* - o tempo de execução do código não é corretamente gerenciado e dados não estão disponíveis no momento certo ou o dato correto foi sobrescrito; e
- Contenção de memória - múltiplos *threads* tentam acessar a memória ao mesmo tempo.

O aplicativo *LabVIEW*® foi desenvolvido para facilitar a implementação de processos concorrentes, tornando mais transparente a comunicação entre processos. No entanto, existem estratégias adicionais para otimização do código. Algumas delas estão relacionadas a seguir [35]:

- Paralelismo de tarefas - dividir o programa em tarefas que podem ter execução paralela;
- Paralelismo de dados - dividir grandes quantidades de dados em sub-grupos e operá-los em paralelo; e
- *Pipelining* - dividir algoritmos sequenciais em estágios iguais que são distribuídos em múltiplos núcleos.

Essas estratégias são discutidas a seguir.

### 2.2.1 Paralelismo de tarefas

Paralelismo de tarefas é simplesmente a execução concorrente de tarefas independentes. Considere-se um processador de apenas um núcleo de processamento que executa um navegador de internet e um editor de texto ao mesmo tempo. Embora esses aplicativos sejam executados em *threads* separados, eles compartilham o mesmo núcleo de processamento. O sistema operacional irá atribuir tempos de uso do núcleo de processamento de maneira alternada para as duas tarefas em execução.

Agora considerando um processador de dois núcleos para o processamento dos mesmos dois programas, os dois aplicativos podem ser executadas independentes um do outro. Embora essa independência pode não ser completa, eles podem necessitar de compartilhar recursos, tais como impressora e rede, que as impede de executar completamente independente e é necessário realizar comunicação entre processos, mesmo nesse caso [36]. Na Figura 2.2 é mostrado um exemplo aplicação com paralelismo de tarefas no *LabVIEW*®.

### 2.2.2 Paralelismo de dados

O paralelismo de dados é uma técnica de programação que divide uma grande quantidade de dados em partes menores que podem ser operadas em paralelo. Após os dados serem processados, eles são combinados novamente em um único conjunto [37]. Na Figura 2.3 é mostrado o diagrama com o funcionamento do paralelismo de dados.

### 2.2.3 *Pepilining*

*Pipelining* é o processo que divide tarefas sequenciais em estágios distintos que podem ser executados no modelo de linha de produção paralela [38]. Por

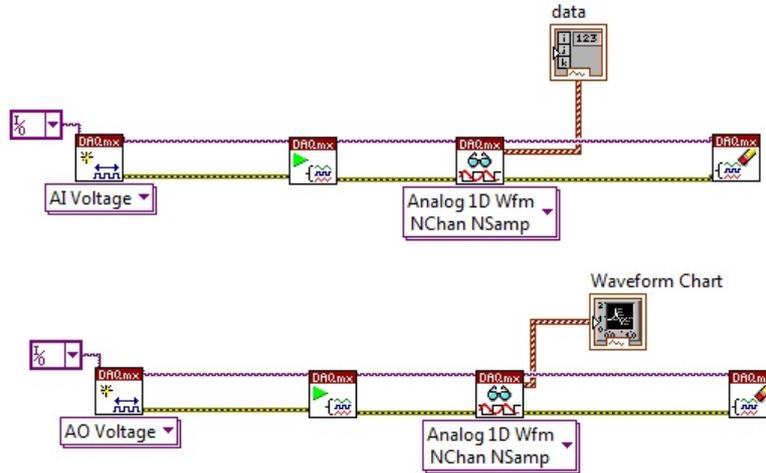


Figura 2.2: Paralelismo no *LabVIEW*®.

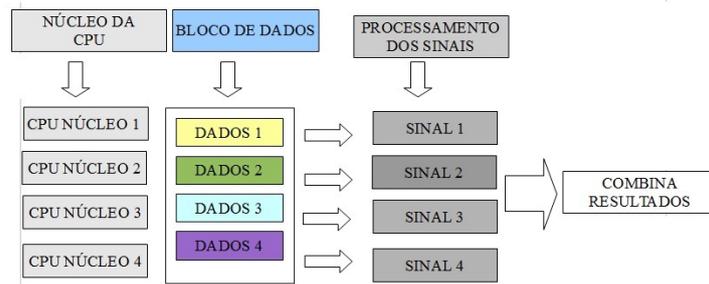


Figura 2.3: Técnica de paralelismo de dados.

exemplo, numa linha de produção automatizada são produzidas bicicletas em três estágios sequenciais distintos: construção do quadro, montagem das peças e pintura. Se individualmente cada processo dure 1 hora, a produção de uma bicicleta completa irá durar 3 horas. O processo pode ser melhorado criando estações independentes para cada estágio da montagem: construção, instalação e pintura. Nessa condição, algumas das sequências de fabricação da bicicleta podem ser executadas em paralelo. Na Figura 2.4 é apresentado o diagrama de produção desse processo utilizando a técnica de *pipelining*.

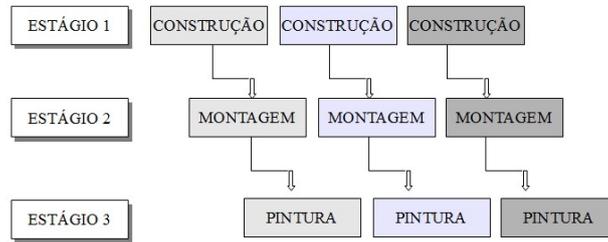


Figura 2.4: Paralelismo com a técnica de *pipelining*.

## 2.3 Instrumentação virtual

Com o barateamento dos sistemas computacionais, tornou-se viável a realização de instrumentos utilizando computadores. Esses instrumentos são denominados de virtuais. O instrumento virtual pode ser uma emulação de um instrumento real, isto é, ele é completamente virtual, ou apenas a interface é virtual, pois ele é capaz de interagir com o mundo externo através alguma interface de entrada e saída de dados. O aplicativo *LabVIEW*® é um ambiente de programação gráfica com módulos pré-configurados. Assim, ele possui condições de criar soluções definidas pelo usuário. Podendo ser usado na implementação de instrumentos virtuais para uso na indústria, pesquisa, educação [29].

Os programas desenvolvidos em *LabVIEW*® são chamados de VIs, *virtual instruments* ou instrumentos virtuais. Isto é porque eles se assemelham ao comportamento de instrumentos reais, tais como: osciloscópios, multímetros e outros. Cada instrumento virtual no *LabVIEW*® é composto de duas descrições apresentadas em duas janelas separadas: painel frontal e diagrama de blocos. A janela do painel frontal é apresentado normalmente com fundo cinza e a janela do diagrama de blocos é apresentada com fundo branco, como ilustrado na Figura 2.5.

O painel frontal é usado para implementar a interface humano máquina (IHM). A IHM realiza a comunicação com o usuário. Esse painel é o que é visto durante a execução. A maioria dos elementos do painel frontal são chamados de controles ou indicadores. Controles são usados para inserir dados pelo usuário e indicadores são usados para exibir dados para o usuário. Eles podem ser: *Leds*, *pusbuttons*, *switches*, *checkboxes*, entre outros.

A segunda janela é chamada de diagrama de blocos e ela define o comportamento do VI através de um código gráfico.

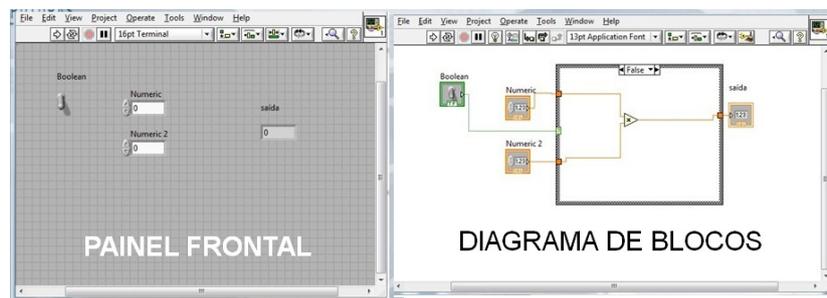


Figura 2.5: Painel frontal e diagrama de blocos.

### 2.3.1 Criando um instrumento virtual

A criação de um instrumento virtual é de acordo com os itens abaixo e com fluxo apresentado na Figura 2.6.

1. Abrir o painel frontal do *LabVIEW*®. Nele existe a barra de ferramentas para incluir todos componentes;
2. A partir da barra de ferramentas, inserir os controles (entradas) e indicadores (saídas);
3. Formatar os componentes, conforme necessidade da aplicação;
4. Abrir o diagrama de blocos. Nele pode-se realizar a programação de todos os componentes do sistema;
5. Interligar os controles aos indicadores;
6. Inserir operadores matemáticos e outros componentes necessários à lógica;
7. Interligar todos os elementos e finalizar a programação virtual;
8. Executar o programa e verificar possíveis erros. Na barra de ferramentas é possível depurar o programa vendo o fluxo de execução das rotinas; e
9. Testar o funcionamento do programa.

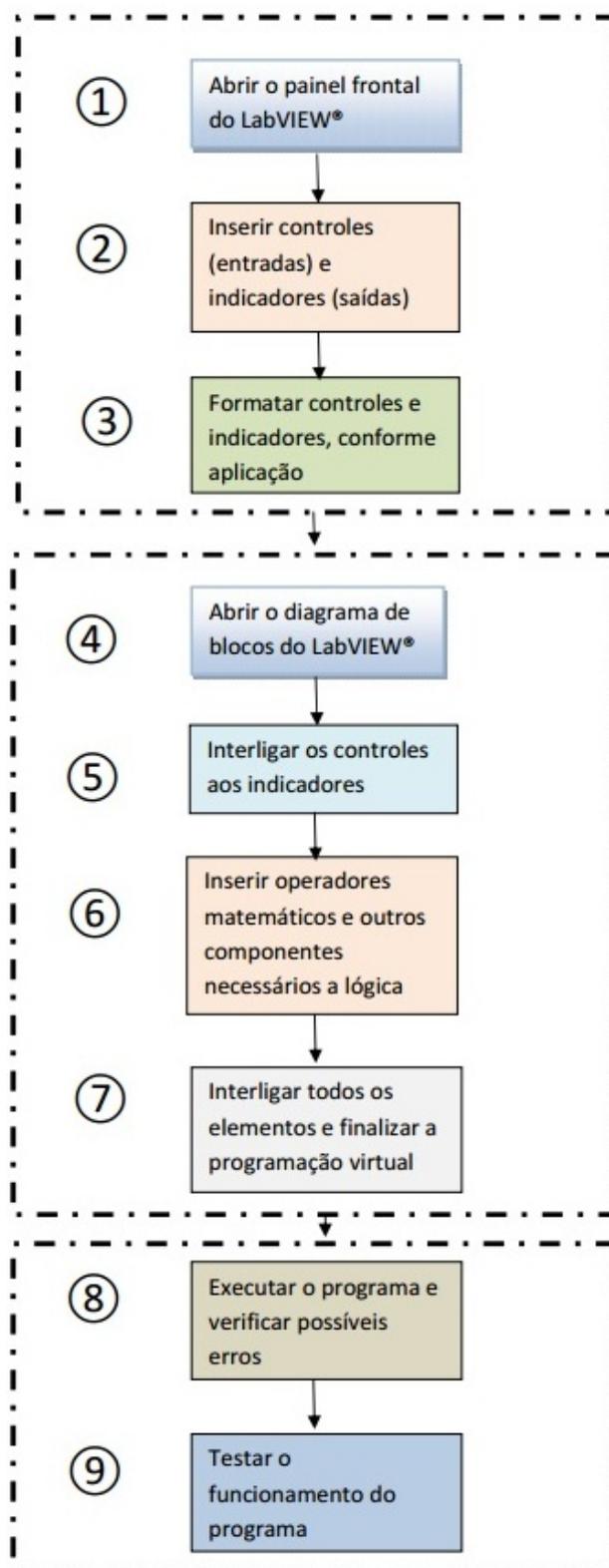


Figura 2.6: Fluxo de criação de instrumento virtual.

## Fluxo de dados

Em linguagens de programação baseadas em textos, a ordem de execução do código é determinada pela ordem dos comandos no código. Este não é o caso do *LabVIEW*® que tem sua ordem de execução determinada pelo fluxo de dados. Isto implica em duas regras básicas: Cada elemento pode executar apenas quando recebe todos os dados de suas entradas e cada elemento somente irá gerar as saídas quando estiver completamente finalizado.

## Aquisição de dados

O *LabVIEW*® permite a aquisição e geração de dados externos que são feitas utilizando o *DAQ* (Dispositivo de Aquisição). A aquisição é feita seguindo o fluxo exibido na Figura 2.7. Na Tabela 2.1 são mostrados os parâmetros do *DAQ* 6363, de acordo com especificações técnicas [86].

Tabela 2.1: Parâmetros *DAQ* - 6363.

Parâmetros <i>DAQ</i>	Valor
Entradas analógicas ( <i>AI</i> )	32
Saídas analógicas ( <i>AO</i> )	6
Entradas/Saídas digitais	48
Núm. max amostras por canal <i>AI</i>	2 MS/s
Capacidade máxima de saída	2 MS/s
Taxa máxima de atual. saída analógica	2,86 MS/s
Taxa máxima de entrada/saída digital	10 MHz

Utilizando o *DAQ* 6363, foi criado um gerador de onda para a implementação do amplificador *lock-in*. A saída do amplificador é levada para o osciloscópio e para a entrada do *DAQ*. O sinal de entrada do *DAQ* é utilizado no processamento do *LabVIEW*®. No circuito final, optou-se por usar um gerador senoidal externo.

O fluxo apresentado na Figura 2.7 demonstra todo o processo de funcionamento do amplificador *lock-in*.

- O fluxo se inicia pelo gerador de sinas que tem o papel de oscilador externo gerando um sinal senoidal para a placa de condicionamento. O gerador permite a variação da frequência e amplitude;
- O segundo bloco é o condicionamento do sinal. Ele é responsável pelo tratamento e amplificação do sinal vindo do gerador de onda. O sinal

gerado é enviado para o *DAQ*. É nele que liga-se o dispositivo sob teste. Utiliza-se um capacitor padrão, porém esse capacitor possui capacitâncias residuais que são devido a própria construção. O valor dessa capacitância é de aproximadamente 40 pF;

- Outro bloco é o dispositivo de aquisição de dados (*DAQ*). Para essa aplicação ele teve duas entradas configuradas,  $ai_0$  e  $ai_1$ . Na entrada  $ai_0$  existe o sinal vindo do oscilador externo e na entrada  $ai_1$  o sinal condicionado originado do circuito de condicionamento;
- O bloco *LabVIEW*® representa toda a instrumentação virtual. Ele é responsável pela filtragem dos sinais do oscilador e da placa, produto e cálculo da defasagem entre esses sinais, identificação do tipo de DST. O resultado de todo processamento é exibido nos indicadores e gráficos;
- O osciloscópio exibe as formas de onda dos sinais.

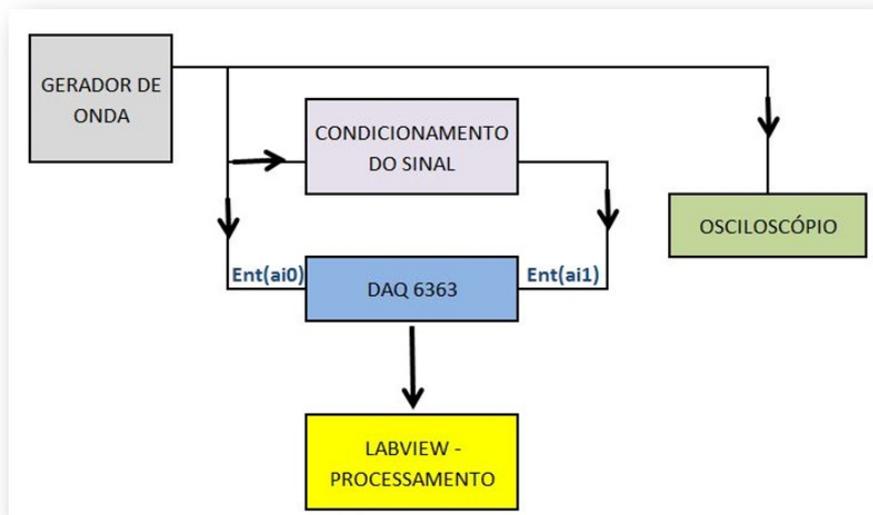


Figura 2.7: Fluxo de funcionamento do sistema.

### 2.3.2 Funcionamento do programa

- Dois sinais são recebidos pelo *DAQ*, um originado pelo gerador de onda e outro pela placa de condicionamento de dados do amplificador *lock-in* e filtrados individualmente, conforme Figura 2.8 (A). Foram configuradas duas entradas no *DAQ*.  $a_{i0}$  - oscilador externo e  $a_{i1}$  - entrada do *lock-in*. Detalhes sobre a pinagem do DAQ podem ser vistos na figura A.1 do anexo 1;
- Realiza-se a leitura da frequência, amplitude e fase de cada sinal originados do oscilador externo e da placa de condicionamento, Figura 2.8 (B). A frequência e amplitude são usados no cálculo do dispositivo sobre teste (DST) e no deslocamento de fase. A fase é utilizada no deslocamento de fase e identificação do tipo de DST;
- O sinal do oscilador externo é coletado e sofre o deslocamento de fase, Figura 2.8 (D). Após isso, o sinal é reconstruído e exibido no gráfico junto com o sinal original, Figura 2.10;
- Na Figura 2.8 (C) tem-se a identificação do tipo de carga do dispositivo sobre teste (DST);
- O cálculo do DST é mostrado na Figura 2.8 (E);
- Após os cálculos, os resultados são exibidos em indicadores, Figura 2.10 (C); e
- Na Figura 2.10 são exibidos os gráficos com as formas de onda dos sinais de entrada, oscilador externo e o sinal filtrado da tensão de saída do amplificador *lock-in*.

Na Figura 2.8 são exibidos os principais blocos utilizados na aplicação em *LabVIEW*® e na Figura 2.9 mostra-se a comparação entre o bloco de funcionamento do amplificador *lock-in* e o diagrama de blocos do *LabVIEW*®.

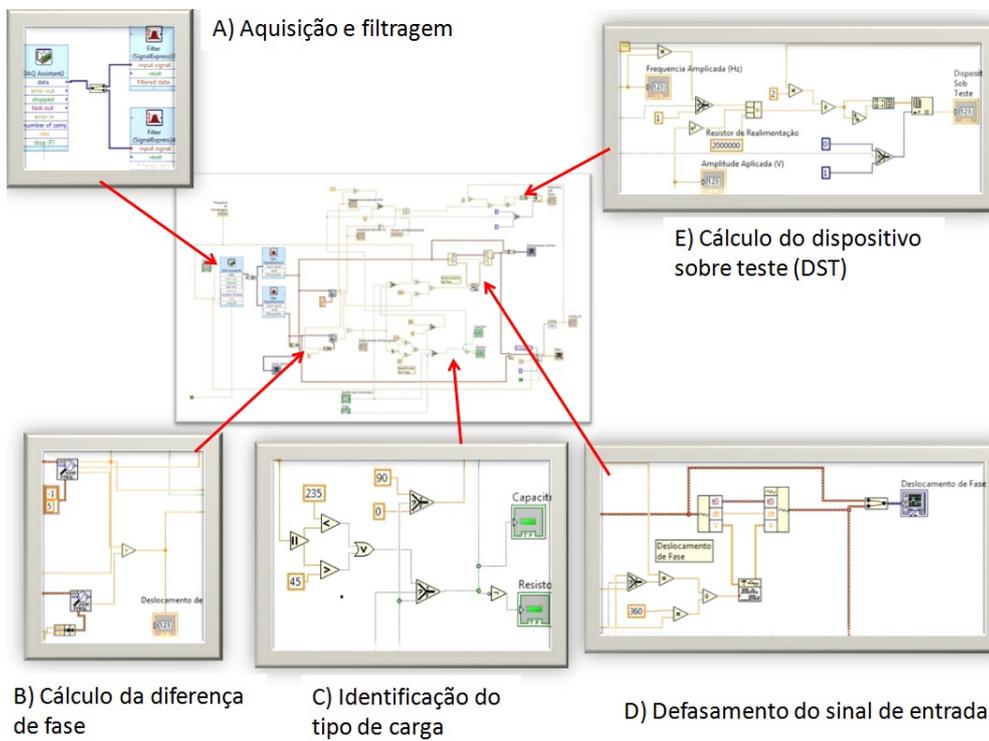


Figura 2.8: Blocos de telas *LabVIEW*®.

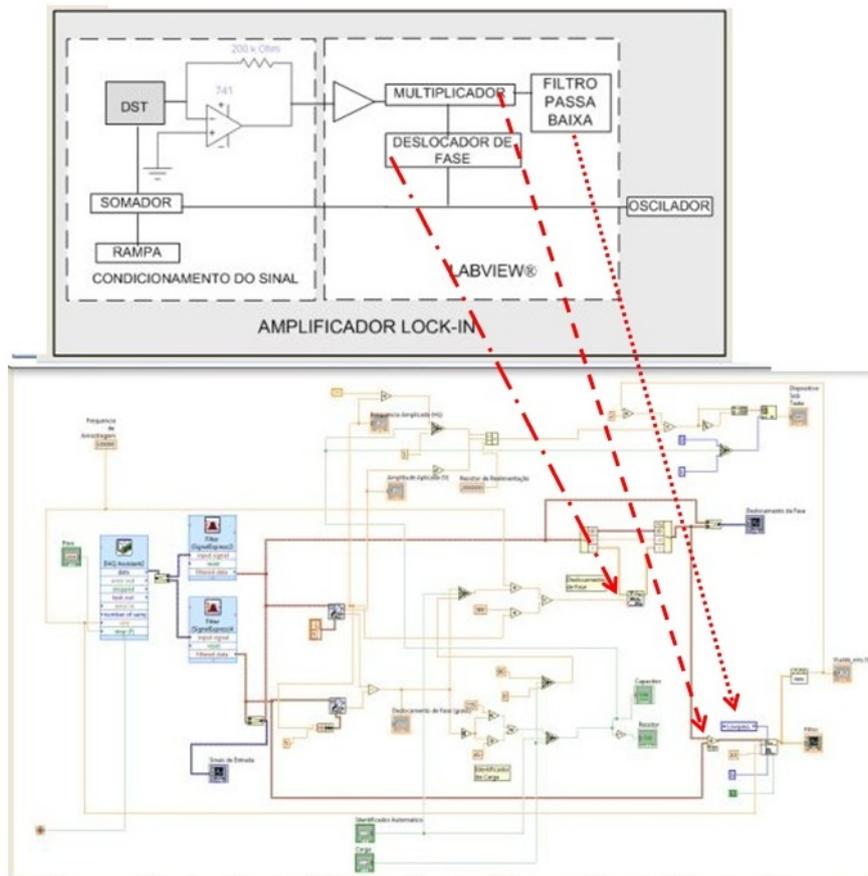
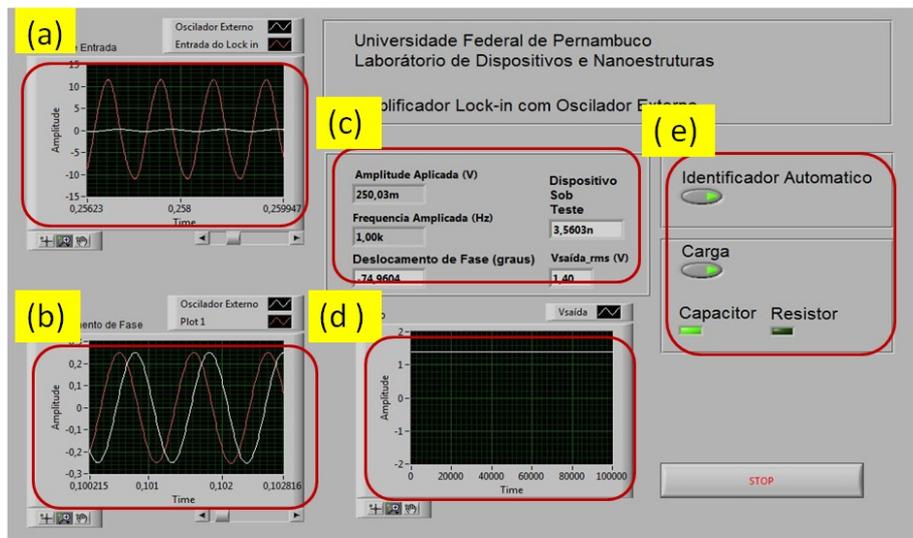


Figura 2.9: Comparação *LabVIEW*® e *lock-in*.

## 2.4 Implementação do amplificador síncrono

O programa em *LabVIEW*® foi desenvolvido para realizar a aquisição dos sinais vindo da placa de condicionamento. Após a aquisição o programa realiza o tratamento do sinal de entrada para fazer a identificação do tipo de grandeza que está sendo medida: resistência ou capacitância.



- (a) - Sinal de entrada
- (b) - Sinal com deslocamento de fase
- (c) - Indicadores de tensão, amplitude, frequência, fase e DST
- (d) - Sinal de saída filtrado
- (e) - Identificação do tipo da carga

Figura 2.10: Painel frontal do amplificador *lock-in*.

## 2.5 Implementação com vários amplificadores síncronos

Para implementação com vários amplificadores síncronos (*lock-in*) em paralelo foi escolhido o *DAQmx* do *LabVIEW*®, devido ser mais flexível, possuir mais funções e ter desempenho melhor que o *DAQ* [39].

Em uma arquitetura paralela, todas as tarefas *DAQmx* são configuradas ao mesmo tempo e todas as tarefas são lidas ou escritas simultaneamente em

um único ciclo. Isso pode fornecer uma vantagem de desempenho, uma vez que o *LabVIEW®* irá realizar múltiplas leituras paralelas em segmentos com vários processadores. Além disso, os dados podem ser lidos em cada tarefa de forma independente, logo que estiver pronto, o que maximiza a eficiência de cada interação do loop [40].

Na Figura 2.11 é mostrada a rotina de inicialização das tarefas de aquisição com *DAQmx* que consistem em:

1. Criar múltiplos canais virtuais. Na implementação foram criados os canais de entrada analógica ai0 (sinal do oscilador externo), ai1 (sinal AQ1 a ser tratado pelo *lock-in* 1) e ai2 (sinal AQ2 a ser tratado pelo *lock-in* 2);
2. Configurar a temporização para aquisição das operações de dados;
3. Iniciar a execução da tarefas; e
4. Ler as amostras das tarefas de aquisição.

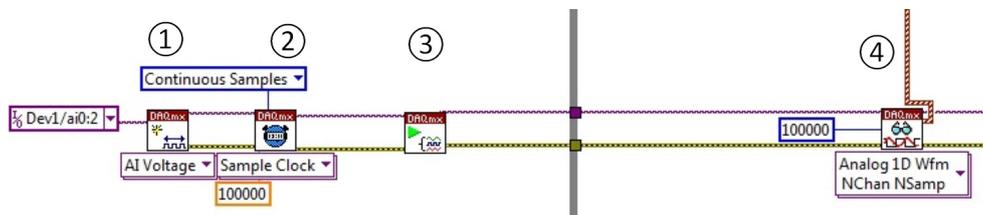


Figura 2.11: Aquisição dos sinais de entrada

Na Figura 2.12 é mostrada a filtragem e cálculo da diferença de fases

Na Figura 2.13 é feita a identificação das cargas

Na Figura 2.14 é feito o cálculo dos valores das impedâncias

Nas Figuras 2.15 e 2.16 são apresentados os diagramas de blocos da rotina para leitura da aquisição de dados e gravação nas pilhas P1 e P2.

Na Figura 2.17 é mostrada multiplicação dos vetores.

Na Figura 2.18 (a) indicadores com a amplitude e frequência do oscilador externo, diferença entre as fases, valores das cargas lidas (DST1 e DST2) e tensão de saída; (b) identificação das cargas S1 e S2; (C) Sinal filtrado

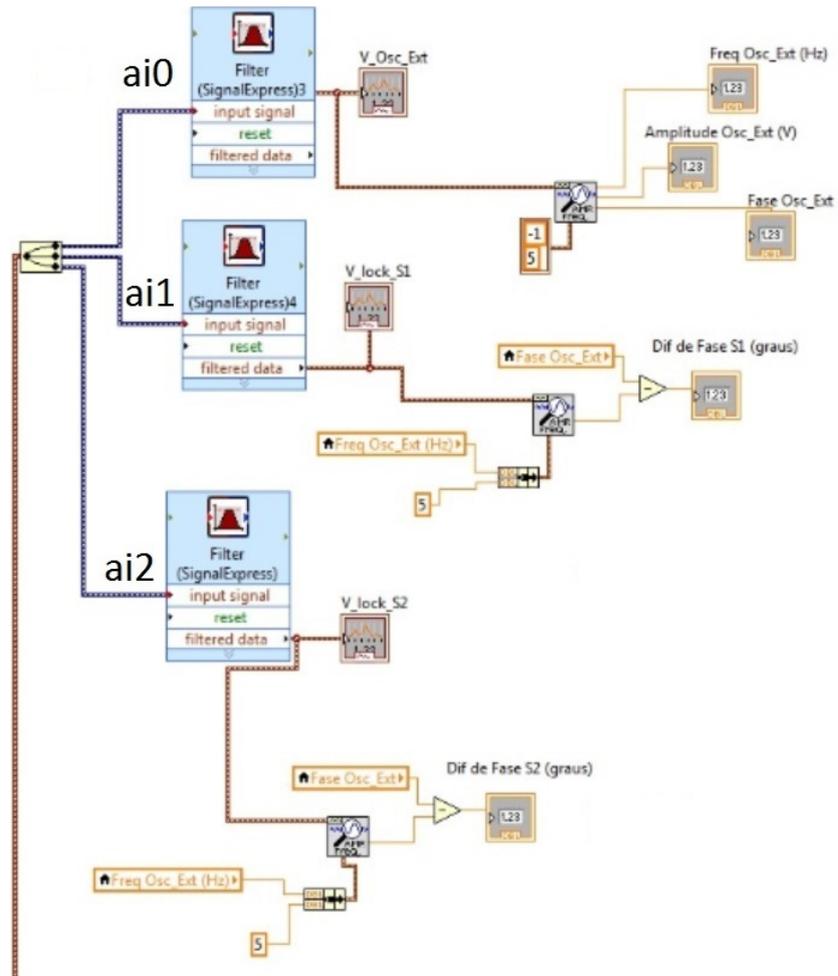


Figura 2.12: Filtragem dos sinais de entrada e cálculo da diferença de fase

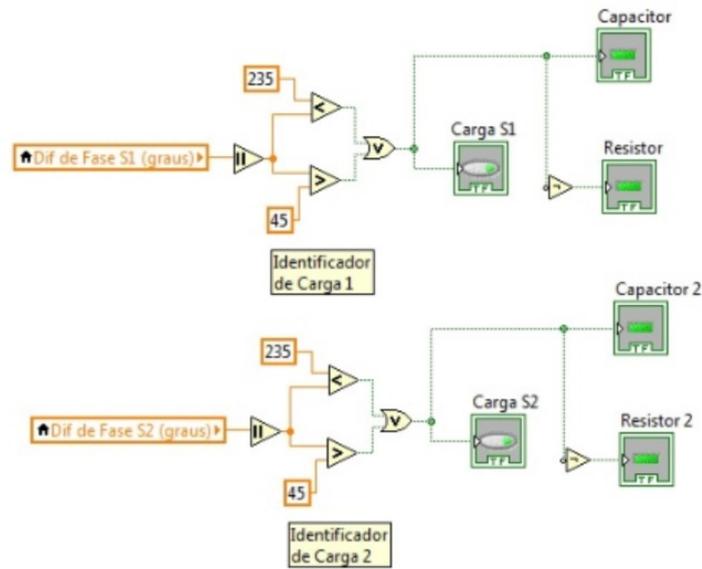


Figura 2.13: Identificação das cargas

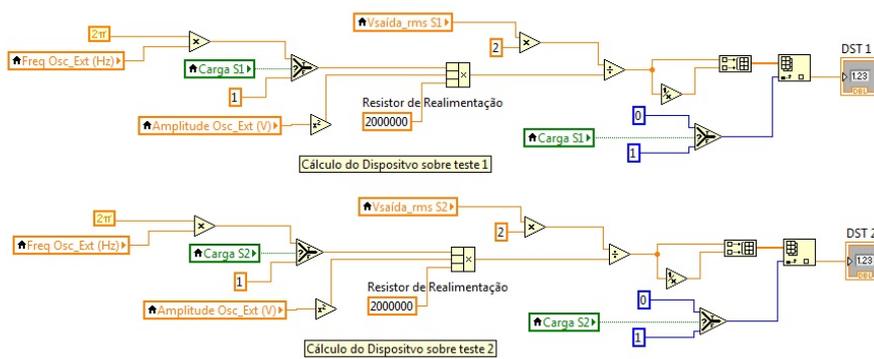


Figura 2.14: Cálculo dos valores das impedâncias

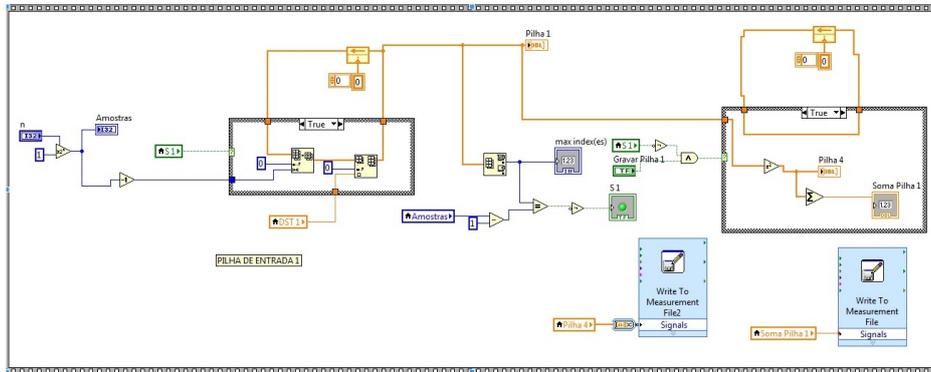


Figura 2.15: Diagrama de blocos que ler e grava na pilha P1

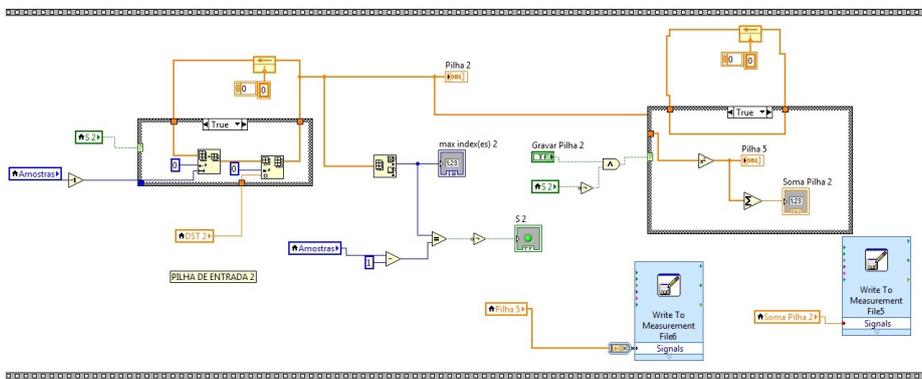


Figura 2.16: Diagrama de blocos que ler e grava na pilha P2

## 2.6 Considerações finais

Nesse capítulo foi apresentada a proposta do medidor multifásico; apresentado as técnicas de paralelismo de dados e descrito a implementação do amplificador síncrono (*lock-in*) utilizando blocos virtuais da ferramenta *LabVIEW*®.

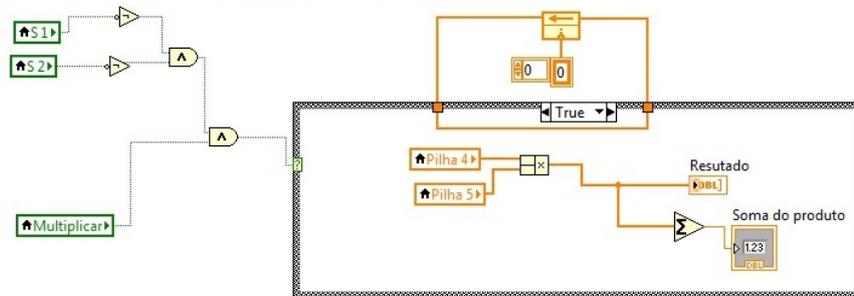


Figura 2.17: Diagrama de blocos com a multiplicação dos vetores

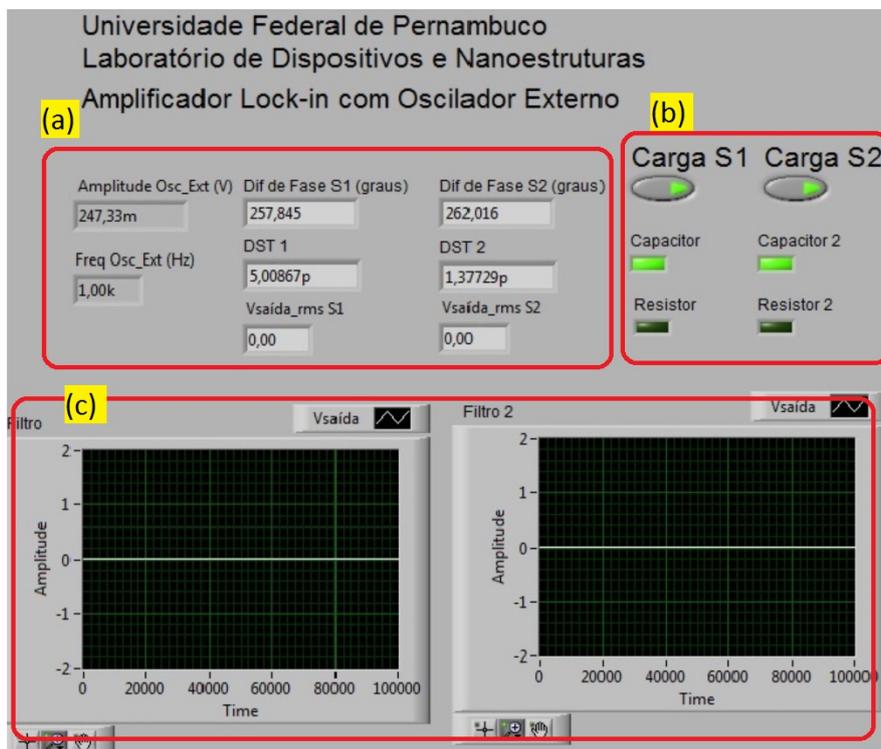


Figura 2.18: Painel do amplificador *lock-in* com paralelismo

# Capítulo 3

## Caracterização do *lock-in*

### 3.1 Sistema multieletrodo e modelo

Na literatura existem diversos trabalhos que utilizam sistemas com multieletrodos. Dentre esses, um sistema de computação em tempo real usado para medição de escoamento bifásico em campos de petróleo. O sistema utiliza uma matriz de ultrassom com sensores capacitivos e de condutância. A taxa do escoamento é medida usando técnicas de *venturi* e pressão diferencial [49].

Abaixo se tem as relações de equações obtidas a partir do circuito da Figura 3.1. Fazendo as manipulações e considerações adequadas, chega-se a conclusão que para  $C_0 \gg C$ ,  $Y \approx j\omega C_0$ .

$$I = j\omega C V_+ + j\omega C_0 V \quad (3.1)$$

$$j\omega C_0 V = j\omega C V_- + I \quad (3.2)$$

$$V = V_+ + V_- \quad (3.3)$$

$$V = \left( \frac{I - j\omega C_0 V}{j\omega C} \right) - \left( \frac{j\omega C_0 V - I}{j\omega C} \right) \quad (3.4)$$

$$V + \frac{j\omega C_0}{j\omega C} V + \frac{j\omega C_0}{j\omega C} V = I \left( \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{j\omega C} \right) \quad (3.5)$$

$$\frac{V}{I} = \frac{\frac{2}{j\omega C}}{1 + \frac{2C_0}{C}} \quad (3.6)$$

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \frac{2C}{C + 2C_0} \quad (3.7)$$

$$Y = j\omega \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2C_0}{C}\right) \quad (3.8)$$

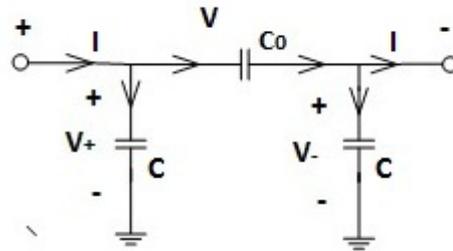


Figura 3.1: Relação entre os eletrodos.

Na Figura 3.2 (a) é mostrado o modelo com dois eletrodos e na Figura 3.2 (b) o modelo para quatro eletrodos.

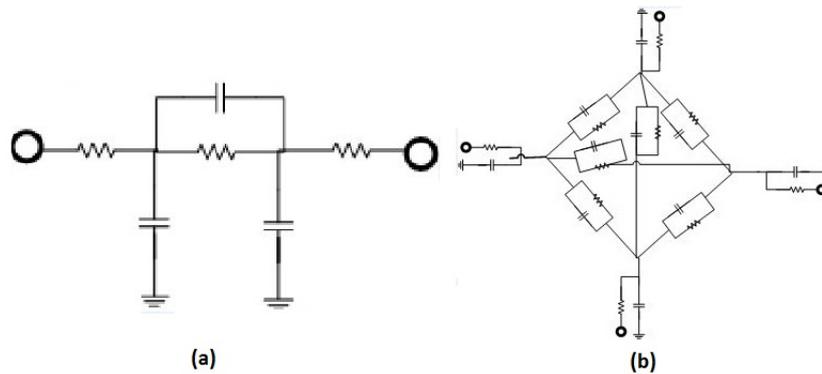


Figura 3.2: Modelo (a) dois eletrodos e (b) quatro eletrodos.

### 3.1.1 Projeto para construção de sistema multieletrodo

Na figura 3.3 são apresentados os detalhes de construção do sistema com dois eletrodos. Uma parte do projeto do medidor multifásico é a construção do

tomógrafo que será utilizado em conjunto com a técnica da correlação para realizar a medição da vazão.

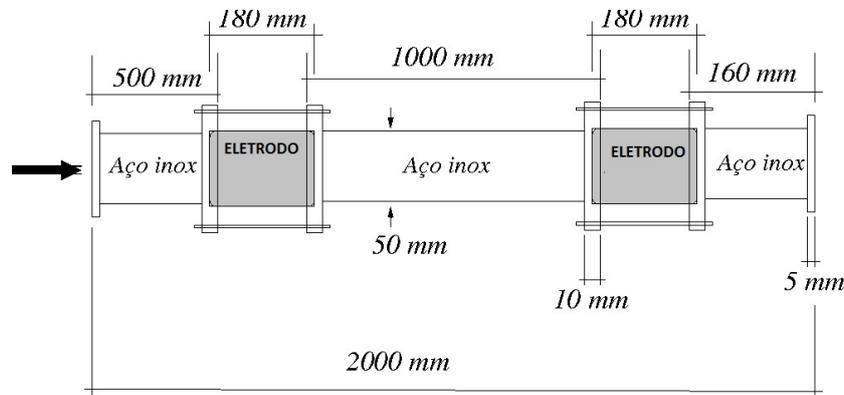


Figura 3.3: Detalhe do projeto do sistema com dois eletrodos.

## 3.2 Caracterização do processo de paralelismo de dados

Nas próximas seções serão descritos o diagrama do sistema multiprocessado desenvolvido usando a técnica de paralelismo e armazenamento de dados, as formas de aquisição dos dados por variação da taxa de amostragem e frequência do sinal.

### 3.2.1 Sistema multiprocessos

Na figura 3.4 é apresentado o diagrama do sistema multiprocessado desenvolvido utilizando técnica de paralelismo e armazenamento dos dados em pilhas. O sistema é dividido em seis partes:

1. O bloco de aquisição de dados possui duas variáveis AQ1 e AQ2 que representam a aquisição de impedâncias elétricas distintas;
2. Os blocos *lock-in 1* e *lock-in 2* fazem o tratamento dos sinais AQ1 e AQ2;
3. Após o tratamento do sinal pelos blocos *lock-in 1* e *lock-in 2*, os resultados são transferidos para os blocos de leitura das pilhas. Nesse bloco

a pilha 1 armazena os resultados do *lock-in 1* e a pilha 2 armazena os blocos do *lock-in 2*. Cada pilha possui uma variável semáforo que indica que a pilha está cheia ou não. Na pilha 1 o semáforo é S1 na pilha 2 o semáforo é S2;

4. A partir do momento que as pilhas estão completamente preenchidas os semáforos iniciam o processo de gravação das pilhas ao mesmo tempo. Cada pilha possui um somatório dos valores. Os valores armazenados na pilha são elevados ao quadrado;
5. Os quadrados dos valores armazenados na pilha são multiplicados um a um, sendo feito o somatório dessas multiplicações; e
6. Por fim se extrai a raiz quadrada do somatório entre os produtos das pilhas, que é um valor constante.

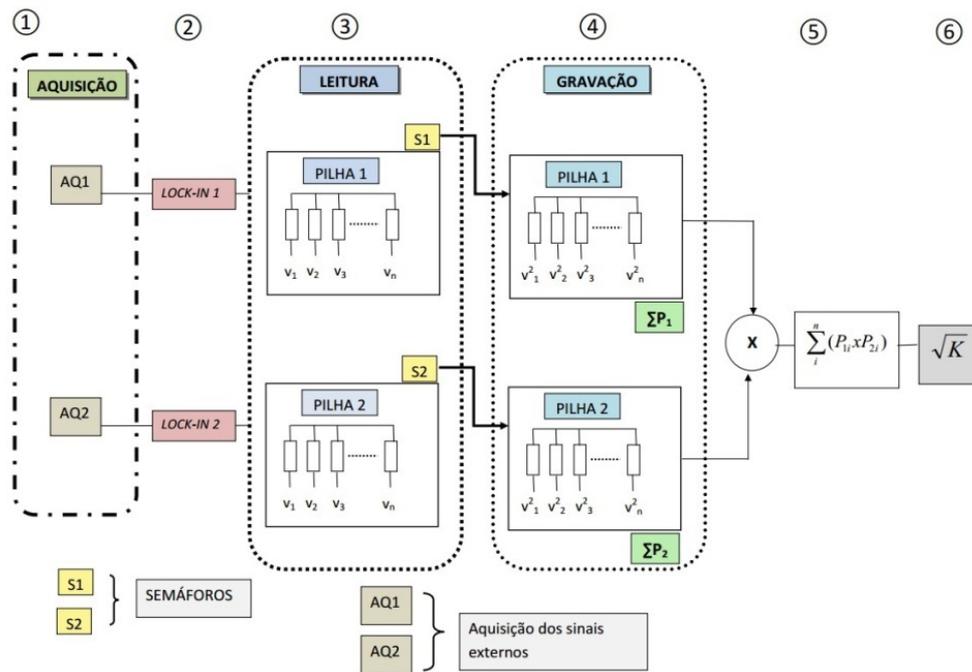


Figura 3.4: Sistema multiprocessos.

O painel frontal do Sistema Multiprocessado é exibido na Figura 3.5. Abaixo a descrição de todas as variáveis.

Abaixo a descrição de todas as variáveis:

- n - indica o tamanho da pilha;

- S1 e S2 - são os semáforos dos vetores Pilha 1 e Pilha 2. Quando os vetores estão completamente preenchidos os semáforos são setados para indicar a pilha está cheia;
- A pilha estando cheia os vetores Grava Pilha 1 e Grava Pilha 2 são preenchidos automaticamente com o quadrado de Pilha 1 e Pilha 2, respectivamente;
- O vetor resultado armazena a multiplicação entre os vetores Grava Pilha 1 e Grava Pilha 2;
- Soma Pilha 1 - realiza o somatório do vetor Pilha 1;
- Soma Pilha 2 - realiza o somatório do vetor Pilha 2;
- Soma produto - realiza o somatório do produto entre Grava Pilha 1 e Grava Pilha 2; e
- Raiz soma produto - é o resultado da raiz quadrada de Soma Produto.

O resultado do cálculo das impedâncias dos dispositivos sobre teste (DST) é exibido na Figura 3.6.

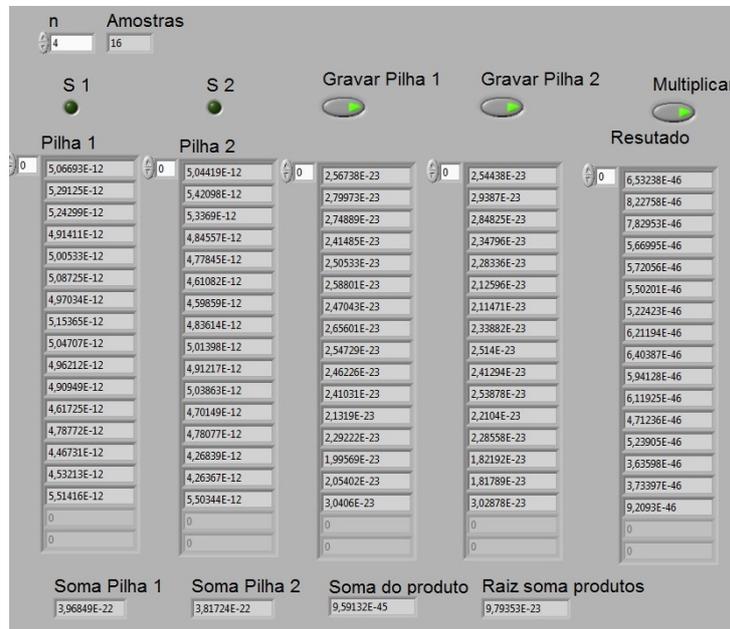


Figura 3.5: Tela processamento da pilha.

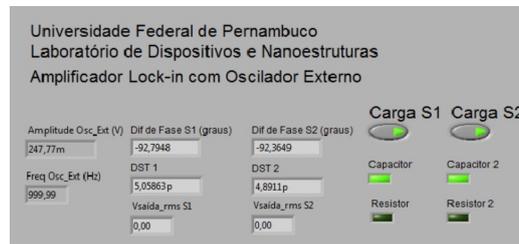


Figura 3.6: Painel frontal com resultado das impedâncias.

### 3.2.2 Variação da taxa de amostragem

Na aquisição de dados variando a taxa de amostragem procurou-se alterar as características abaixo para avaliar o desempenho do sistema:

1. Definição dos sensores S1 e S2 como sendo os valores recebidos nas entradas analógicas  $a_{i1}$  e  $a_{i2}$ ;
2. Definida da configuração do *DAQmx* em *Continuous Samples* e *Sample Clock*;
3. Variação do parâmetro *Sample Clock* do *DAQmx* em 1 mil, 10 mil e 100 mil amostras/segundo para leitura dos sensores, conforme Figura 3.7;
4. Definição do tamanho de armazenamento das pilhas P1 e P2 como  $2^n$ , onde n é um valor numérico definido pelo usuário;
5. Leitura dos dados coletados dos sensores e armazenados nas pilhas P1 e P2;
6. Gravação dos dados lidos nas pilhas P1 e P2. A partir do momento que a leitura dos dados atingiu o tamanho da pilha, os dados são gravados;
7. Multiplicação entre as pilhas P1 e P2;
8. Soma dos valores lidos nas pilhas P1 e P2;
9. Soma do resultado do produto entre as pilhas P1 e P2;
10. Cálculo da raiz quadrada da soma dos produtos das pilhas P1 e P2; e
11. Exportação de todos os dados para arquivo texto.

### 3.2.3 Variação da frequência do sinal

Na aquisição de dados com variação da frequência procurou-se alterar as frequências do gerador de sinal e avaliar o comportamento do sistema, conforme características abaixo:

1. Definição dos sensores S1 e S2 como sendo os valores recebidos nas entradas analógicas  $a_{i1}$  e  $a_{i2}$ ;
2. Variação da frequência do gerador de funções em 400 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 1,5 kHz e 2 kHz para leitura dos sensores;
3. Definição do tamanho de armazenamento das pilhas P1 e P2 como  $2^n$ , onde n é um valor numérico definido pelo usuário;
4. Leitura dos dados coletados dos sensores e armazenados nas pilhas P1 e P2;
5. Gravação dos dados lidos nas pilhas P1 e P2. A partir do momento que a leitura dos dados atingiu o tamanho da pilha, os dados são gravados;
6. Multiplicação entre as pilhas P1 e P2;
7. Soma dos valores lidos nas pilhas P1 e P2;
8. Soma do resultado do produto entre as pilhas P1 e P2;
9. Cálculo da raiz quadrada da soma dos produtos das pilhas P1 e P2; e
10. Exportação de todos os dados para arquivo texto.

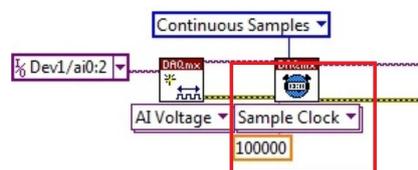


Figura 3.7: Variação da taxa de amostragem no *DAQmx*.

### 3.3 Planta de vazão

O sistema de medição construído está acoplado a uma planta para ensaio em medidores de vazão existente no Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas, Figura 3.8.



Figura 3.8: Planta para ensaio em medidores de vazão.

Essa planta é composta de:

- Tanque com separador;
- Inversor *WEG CFW 09*: O inversor recebe do *CLP* o comando para alteração da velocidade. O comando do *CLP* para ajuste de velocidade é através de linguagem *ladder*;
- *CLP ALTUS PO3042* com módulos de entrada/saída;
- Interface homem máquina *IHM CIMREX 12*: é o meio de comunicação entre o *CLP* e o inversor. Ela altera os parâmetros de funcionamento da planta;
- Tubo *venturi*;
- Densímetro;

- **Sensores de pressão:** Modelo PCB série 1503, tem seu princípio de funcionamento através da piezoresistividade. Gera um sinal de saída na faixa de 4 a 20 mA proporcional a variação da resistência;
- **Sensor acelerômetro:** Modelo *ENDEVCO* 7703-1000, possui um elemento de cristal e tem seu princípio de funcionamento através da piezoelectricidade. É projetado para medição de vibração em estruturas e objetos, sendo extremamente estável e resistente às condições ambientais. Eles são capazes de trabalhar com temperaturas até 288 graus;
- **Sensor microfone:** Modelo 106B tem seu princípio de funcionamento baseado na piezoelectricidade. Tem em seu interior um cristal de quartzo que gera uma tensão proporcional a vibração monitorada; e
- **Bomba de vazão:** A bomba de vazão modelo *DANCOR*, é utilizada para gerar a circulação do fluido pelas tubulações da planta. Possui dois pólos de rotação, 3450 rpm, 60 Hz, monofásico e trifásico.

### 3.4 Curvas de calibração

O amplificador síncrono (*lock-in*) tem como entrada um sinal amplificado e defasado em relação ao sinal do oscilador e que carrega a informação da admitância do dispositivo sob teste. Nesta seção são apresentados os gráficos comparando a teoria com os resultados experimentais das tensões de saída. Além disso, também são apresentadas as comparações da medição direta das grandezas. Utilizou-se um multímetro comercial e comparou-se o resultado desse multímetro com o valor nominal e o resultado da medição com amplificador *lock-in*.

Na Figura 3.9 é apresentado o gráfico dos valores teóricos das tensões elétricas calculados usando a Equação 1.29, para valores de frequência de 100 Hz, 500 Hz, 1 kHz e 10 kHz. Na Tabela A.1, do Apêndice A, são apresentados os dados de referência para geração do gráfico. O gráfico é formado pela relação tensão e capacitância para os valores de frequência de 100 Hz, 500 Hz, 1 kHz e 10 kHz.

Na Figura 3.10 é mostrado o gráfico com os resultados experimentais obtidos na saída do amplificador *lock-in* para os valores de frequência de 100 Hz, 500 Hz, 1 kHz e 10 kHz. Percebe-se que a tensão de saída satura na frequência de 500 Hz para capacitâncias acima de 7,5 pF e na frequência de 1 kHz para

capacitâncias acima de 3,5 pF. Na Tabela A.2, do Apêndice A, são apresentados os dados do gráfico que é formado pela relação tensão e capacitância para os valores de frequência de 100 Hz, 500 Hz, 1 kHz e 10 kHz.

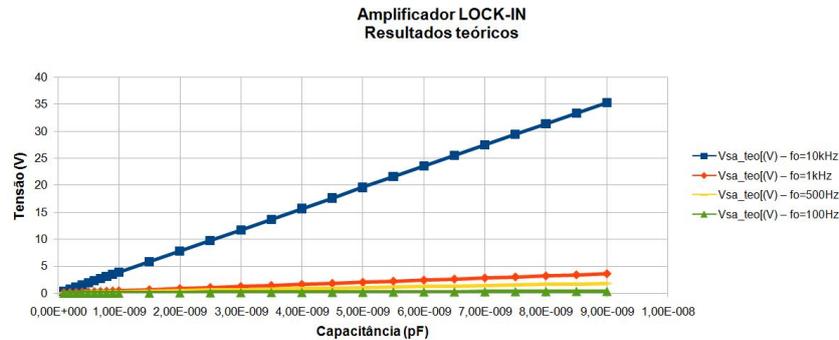


Figura 3.9: Gráfico teórico da tensão de saída do *lock-in*.

### 3.4.1 Comparação

O objetivo dessas medições foi verificar o quanto o resultado do amplificador *lock-in* se aproximou do valor nominal.

Na Figura 3.11 são apresentados os valores nominais das capacitâncias, os valores medidos com o multímetro MINIPA ET-2053 DMM e os valores medidos pelo *lock-in*. Na Figura 3.11 (a) são apresentados os valores de capacitância até 1200 pF e na Figura 3.11 (b) os valores maiores que 1200 pF e menores que 10000 pF. Os valores nominais e os valores medidos são bem próximos, porém percebe-se que a leitura do *lock-in* satura a partir 3500 pF, como pode ser visto na Figura 3.11 (b).

Na Figura 3.12 são mostrados os valores nominais das condutâncias, com base nos valores padrão *RS 201 Precision*, e os valores medidos através do multímetro MINIPA ET-2053 DMM e *lock-in*.

As medições são muito próximas dos valores nominais, mas percebe-se que quando se aproxima de 5 uS ocorre a saturação do valor medido pelo *lock-in*.

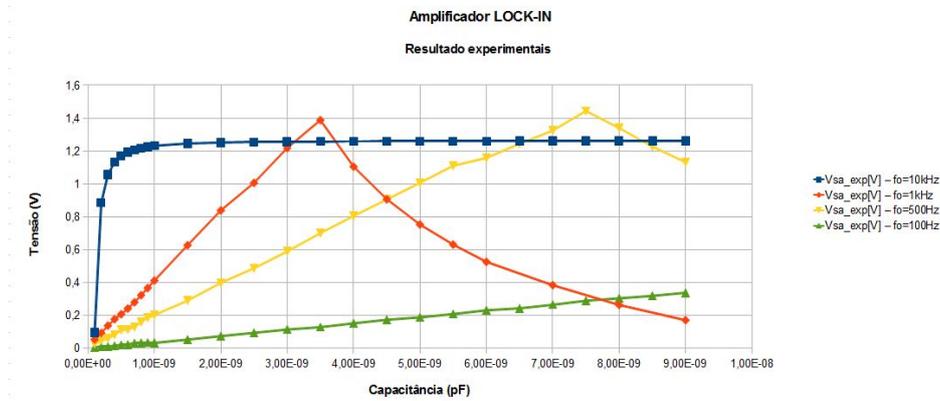


Figura 3.10: Resultado experimental da tensão de saída do amplificador síncrono *lock-in*.

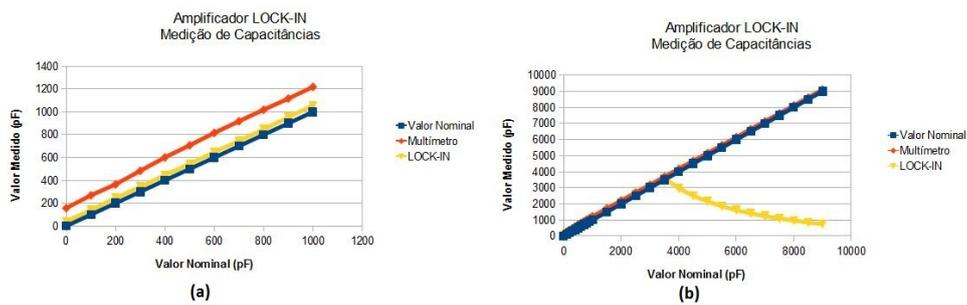


Figura 3.11: Resultado da medição de capacitância lock-in × multímetro.

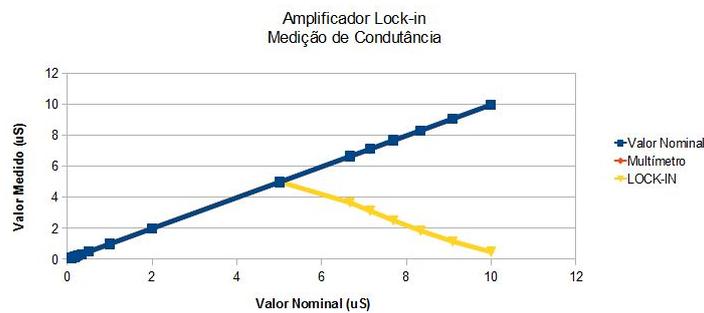


Figura 3.12: Resultado da medição da condutância.

### 3.5 Resultados da medição e análise

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos durante as simulações. Na Figura 3.13 são apresentados o ambiente e os equipamentos utilizados no experimento, conforme relação abaixo:

- Computador PC (Sistema Operacional *Microsoft Windows 7 Ultimate*, Processador *Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q9300 2.50GHz*, 4 Núcleo(s), 4 Processadores Lógicos, *BIOS Phoenix Technologies, LTD 6.00 PG*, 19/02/2009, Memória *RAM 2 GB* );
- *DAQ 6363*;
- Placa de condicionamento;
- Fonte Minipa MPC - 303DI;
- Osciloscópio - Minipa MO 1222;
- Gerador de sinal PM 5190 *LF Synthesizer 1 mHz - 2 MHz*;
- Capacitor de precisão - *CS 301 Precision*; e
- Resistor de precisão - *RS 201 Precision*.



Figura 3.13: Ambiente de simulação.

Os equipamentos utilizados no experimento são apresentados na Figura 3.15: (a) osciloscópio; (b) gerador de sinal; (c) componente de precisão (resistor ou capacitor ); (d) placa de condicionamento; (e) *DAQ*.

### Circuito de condicionamento

O circuito de condicionamento é composto por uma placa de circuito impresso na qual tem dois conectores BNC que são utilizados para entrada e saída do sinal. A placa recebe o sinal do gerador de onda, que é aplicado no dispositivo sob teste (DST). Em seguida, um bloco de conversão de corrente em tensão elétrica condiciona o sinal e o devolve para o *DAQ* para que esse sinal seja processado no *LabVIEW*®. O dispositivo sobre teste é conectado à placa através de terminais específicos.

Como carga de entrada, para representar o dispositivo sob teste, foi utilizado o capacitor padrão modelo *CS-301 Precision Capacitance Substituter - IET LAB INC*. Ele possui dois conectores de saída nos quais são ligados dois fios até a placa de condicionamento do sinal de entrada, Figura 3.14 (a), que permite variações de valores na faixa de 1  $\mu\text{F}$  até 900 pF, como apresentado no diagrama do amplificador *lock-in*. Na Figura 3.14 pode-se ver a placa de condicionamento do sinal tendo um capacitor simples como dispositivo sobre teste.

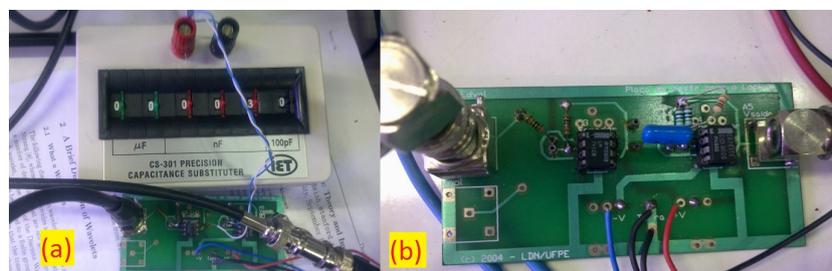


Figura 3.14: circuito de condicionamento.

Realizou-se o experimento com o amplificador *lock-in* gerando sinal para o *DAQ*, Figura 3.15 (e). Havia duas possibilidades de simular o amplificador *lock-in*: Uma internamente no *LabVIEW*®, utilizando os blocos e a outra externamente, utilizando circuitos integrados. Optou-se por utilizar a placa externa para obter resultados mais próximos das condições reais, como pode ser visto na Figura 3.15 (d). A placa é composta por dois amplificadores operacionais. No experimento utilizou-se o amplificador operacional 741.

### PROCEDIMENTO

O procedimento consistiu em anotar para cada faixa de frequência o valor

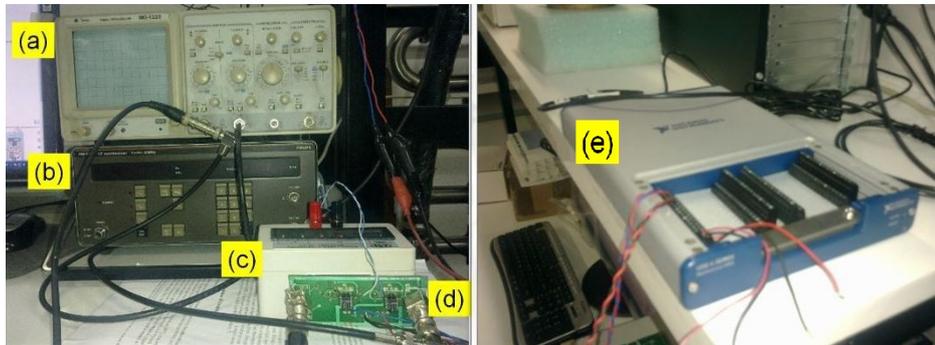


Figura 3.15: Equipamentos utilizados no experimento.

do sinal de saída, conforme fosse modificado os valores de resistência ou capacitância. Inicialmente foram feitas medições com resistência e depois com capacitâncias.

Os seguintes parâmetros foram utilizados para melhor visualização do sinais:

- Resistor de realimentação:  $2\text{ M}\Omega$ ;
- Frequência do gerador:  $1\text{ kHz}$ ;
- Tensão de pico:  $5\text{ Vpp}$ ;
- Frequência de amostragem:  $100\text{ kHz}$ ;
- Filtro utilizado: Butterworth; e
- Ordem do filtro: 5.

Com esses parâmetros os resultados obtidos foram mais aproximados dos resultados teóricos.

### 3.5.1 Resultado da visualização do deslocamento de fase

Nesta seção são apresentados no osciloscópio as formas de onda das tensões de saída da placa de condicionamento e do oscilador externo.

Esses resultados, visualizados através de formas de onda no osciloscópio, foram obtidos fazendo a medição das capacitâncias padrão com valores de  $100\text{ pF}$ ,  $200\text{ pF}$ ,  $500\text{ pF}$  e  $1\text{ nF}$ .

Na Figura 3.16 são apresentadas as formas de onda obtidas para a leitura

das capacitâncias de 100 pF e 200 pF.

Na Figura 3.17 são apresentadas as formas de onda obtidas para a leitura das capacitâncias de 200 pF e 500 pF.

Percebe-se que a medida que se aumenta a capacitância, o forma de onda do sinal de saída do *lock-in* fica mais distorcido até atingir a saturação.

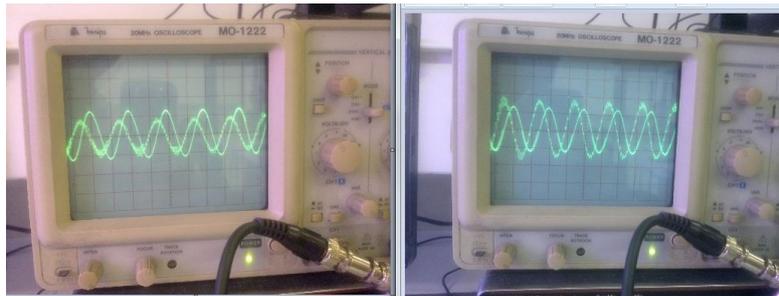


Figura 3.16: Tensões de saída para 100 pF e 200 pF.

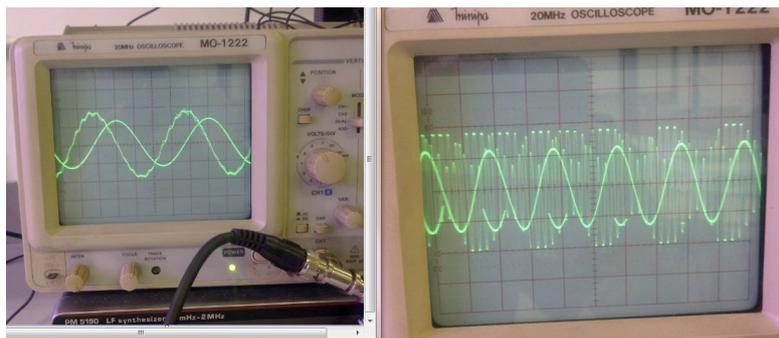


Figura 3.17: Tensões de saída para 500 pF e 1 nF.

### 3.5.2 Resultados obtidos através do *LabVIEW*®

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através do *LabVIEW*®.

Na Figura 3.18 são mostrados os indicadores para a leitura de um dispositivo com valor de 500 pF. Os indicadores numéricos mostram os valores de amplitude, frequência, o deslocamento e tensão de saída.

Na Figura 3.19 são exibidas as formas de onda do oscilador externo e do *lock-in* para capacitâncias de 100 pF, 200 pF e 300 pF. Na Figura 3.20 exibe-se as formas de onda do oscilador externo e do *lock-in* para capacitâncias de 500 pF, 1 nF e 1.5 nF. A medida que se aumenta o valor da capacitância, mais distorcido fica o sinal do *lock-in*.

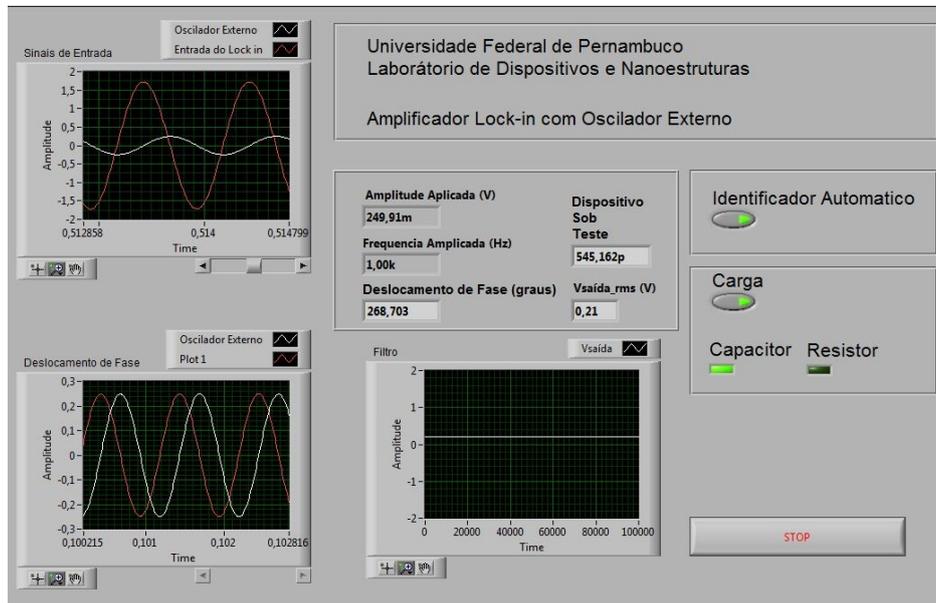


Figura 3.18: Interface homem máquina do amplificador *lock-in*.

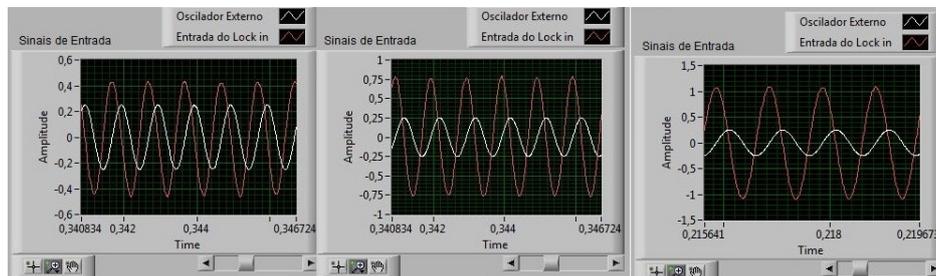


Figura 3.19: Formas de onda para capacitâncias de para 100 pF, 200 pF e 300 pF.

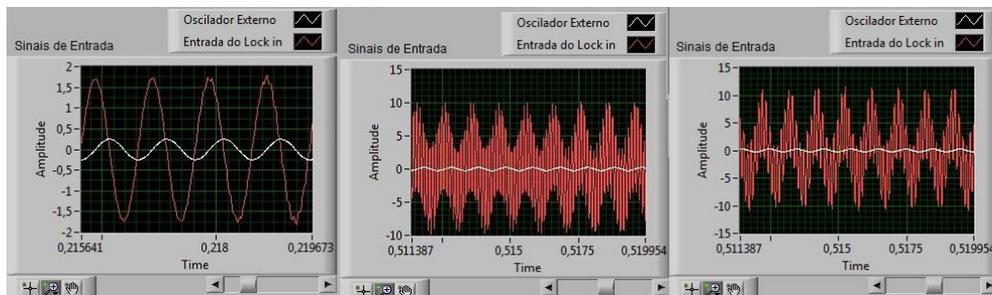


Figura 3.20: Formas de onda para capacitâncias de 500 pF, 1 nF e 1.5 nF.

### 3.5.3 Resultados do sistema multiprocesso

Nesta seção serão apresentados os resultados da medição do sistema multiprocesso trabalhando com frequência de 1 kHz. Para isso foi utilizada técnica de paralelismo, armazenamento dos dados nas pilhas P1 e P2 com tamanhos de 16 e 32, taxa de amostragem de 1 mil, 10 mil e 100 mil amostras/segundo. A pilha P1 é composta pelas leituras da capacitância S1 e a pilha P2 pelas leituras da capacitância S2. As capacitâncias S1 e S2 tem como origem o mesmo capacitor da placa de aquisição de dados. Nesse caso foi utilizado um conector *BNC* tipo T para derivação do sinal de saída da placa de condicionamento, Figura 3.21. Também são apresentados resultados das medições do sistema na forma de tabelas e gráficos.



Figura 3.21: Placa de aquisição com sinal de saída derivado com conector bnc tipo T.

#### Montagem do experimento

1. Configurar o gerador de sinal para uma senoide com 5 Vpp;
2. Conectar o gerador de sinal às entradas da placa de condicionamento, do osciloscópio e da entrada analógica *ai0* do *DAQ*;
3. Inserir um conector *BNC* tipo T à saída da placa de condicionamento. Com esse conector o sinal de saída da placa foi conectado a mais de uma entrada; e
4. Conectar as saídas da placa de condicionamento às entradas *ai1* e *ai2* do *DAQ* que terão o mesmo sinal de referência, conforme pode ser visto no diagrama de conexão Figura 3.22 e na montagem real do experimento Figura 3.23.

#### Procedimento utilizado para medição

- Tomou-se como referência para os sensores S1 e S2 a mesma capacitância ligada à placa de condicionamento, ou seja, S1 e S2 tem o

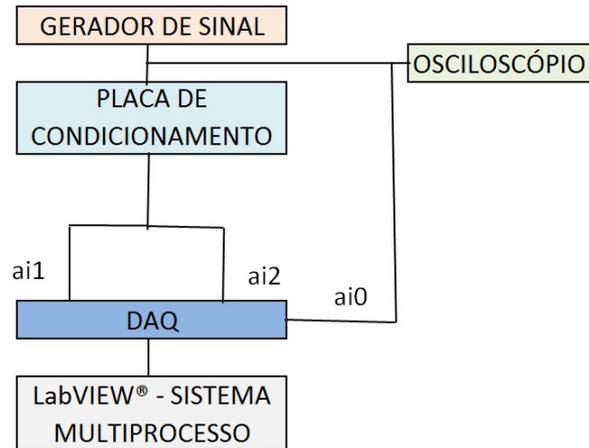


Figura 3.22: Diagrama de ligação placa de condicionamento, *DAQ* com as entradas analógicas (ai0, ai1 e ai2), gerador de sinal e osciloscópio.

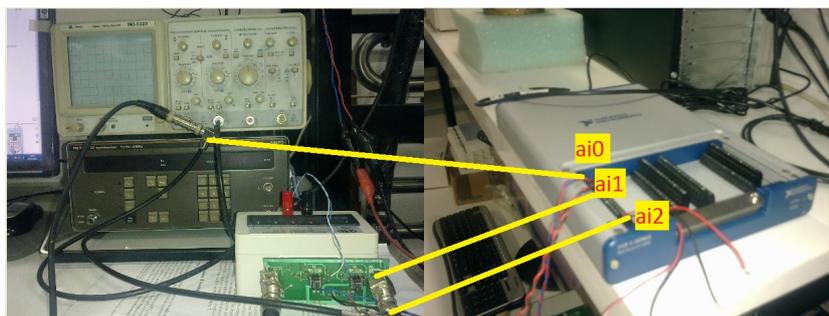


Figura 3.23: Interligações entre o gerador de sinal, osciloscópio, placa de aquisição e *DAQ*.

mesmo sinal vindo da placa de condicionamento, 4,9 pF. Os sinais existentes nas entradas ai1, referente ao sensor S1, e ai2, referente ao sensor S2, são tratados individualmente pelo *LabVIEW*®;

- Ajuste do parâmetro *Sample Clock* do *DAQmx* para 1 mil, 10 mil e 100 amostras/segundo;
- Execução do programa para leitura das capacitâncias S1 e S2;
- Armazenamento das leituras das capacitâncias S1 e S2 nas pilhas P1 e P2;
- Gravação das leituras das pilhas em arquivo texto; e
- Geração de tabelas e gráficos com os resultados. O eixo x dos gráficos foi representado pela variável n que indica a posição do valor armazenado em cada pilha.

Foram realizadas cinco coletas de dados para pilhas com 16 posições, taxas de amostragem 1 mil, 10 mil e 100 mil amostras/segundo.

Para pilhas com 32 posições, taxas de amostragem 1 mil, 10 mil e 100 mil amostras/segundo foram realizadas duas coletas de dados. O tamanho da pilha foi modificado para ter um número maior de dados coletados ao mesmo tempo e para ver o quanto o valor lido se aproxima do valor de referência. No experimento foi utilizada uma capacitância como dispositivo sobre teste no valor de 4,9 pF.

Durante o processamento do sistema multiprocesso as pilhas P1 e P2 são preenchidas simultaneamente com os dados dos cálculos das capacitâncias. Observou-se que em alguns momentos houve perda de sincronismo nesse preenchimento. Com isso, uma pilha é preenchida mais rápido que a outra.

Nas tabelas 3.1 a 3.5 são apresentados os valores mínimo, máximo e médio para taxas de amostragem de 1 mil, 10 mil e 100 mil amostras/segundo e pilha com 16 posições de armazenamento para coletas de 1 a 5. A Tabela 3.6 apresenta os valores mínimo, máximo e médio para taxas de amostragem de 1 mil, 10 mil e 100 mil amostras/segundo para a pilha com 32 posições de armazenamento.

A Figura 3.24 apresenta o gráfico dos valores relacionados na tabela 3.1 para as leituras das capacitâncias S1 e S2. Percebe-se que mesmo com a mesma referência de capacitância, 4,9 pF, S1 e S2 são diferentes. S1 tem valores entre 3,36 pF e 5,4 pF; S2 tem valores entre 3,07 pF e 5,14 pF, conforme Tabela 3.1

Nas Figuras 3.24 e 3.25 são mostradas as leituras das pilhas P1 e P2 com 16 posições e 32 posições de armazenamento e taxa de amostragem de 1 mil amostras/segundo. Percebe-se que a maior variação das leituras ocorre para a pilha com 32 posições na qual os valores máximo e mínimo são 3,01 pF e 5,2 pF, respectivamente.

Nas Figuras 3.26 e 3.27 são mostradas as leituras das pilhas P1 e P2 com 16 e 32 posições de armazenamento e taxa de amostragem de 10 mil amostras/segundo. Em relação a Figura 3.24, a Figura 3.26 apresenta os valores de capacitâncias mais constantes com variações de S1 entre 4,87 pF e 5,17, S2 entre 4,75 pF e 5,04 pF para a pilha com tamanho de 16 posições. Para pilha com tamanho de 32 posições a variação ocorre para S1 entre 4,85 pF e 5,18 pF, S2 entre 4,57 pF e 5,07 pF. A menor diferença acontece para a pilha com 32 posições.

Tabela 3.1: Valores mínimo, máximo e médio em farads (F) - Coleta 1.

	Leitura capacitância					
	Leitura P1 - 16 posições			Leitura P2 - 16 posições		
	1 mil	10 mil	100 mil	1 mil	10 mil	100 mil
Mín	3,36E-12	4,87E-12	4,99E-12	3,07E-12	4,75E-12	4,85E-12
Máx	5,40E-12	5,17E-12	5,06E-12	5,16E-12	5,04E-12	4,91E-12
Médio	4,47E-12	5,02E-12	5,04E-12	4,27E-12	4,89E-12	4,88E-12

Tabela 3.2: Valores mínimo, máximo e médio em farads (F)- coleta 2.

	Leitura capacitância					
	Leitura P1 - 16 posições			Leitura P2 - 16 posições		
	1 mil	10 mil	100 mil	1 mil	10 mil	100 mil
Mín	4,36E-12	4,87E-12	4,98E-12	4,65E-12	4,71E-12	4,84E-12
Máx	5,10E-12	5,18E-12	5,06E-12	4,92E-12	5,03E-12	4,92E-12
Média	4,73E-12	5,01E-12	5,03E-12	4,74E-12	4,86E-12	4,89E-12

Tabela 3.3: Valores mínimo, máximo e médio em farads (F) - coleta 3.

	Leitura capacitância					
	Leitura P1 - 16 posições			Leitura P2 - 16 posições		
	1 mil	10 mil	100 mil	1 mil	10 mil	100 mil
Mín	4,78E-12	4,83E-12	4,98E-12	4,90E-12	4,68E-12	4,82E-12
Máx	4,99E-12	5,11E-12	5,07E-12	5,01E-12	5,04E-12	4,92E-12
Média	4,90E-12	5,00E-12	5,03E-12	4,94E-12	4,86E-12	4,88E-12

Tabela 3.4: Valores mínimo, máximo e médio em farads (F) - coleta 4.

	Leitura capacitância					
	Leitura P1 - 16 posições			Leitura P2 - 16 posições		
	1 mil	10 mil	100 mil	1 mil	10 mil	100 mil
Mín	4,73E-12	4,89E-12	4,99E-12	3,60E-12	4,72E-12	4,85E-12
Máx	5,16E-12	5,17E-12	5,06E-12	4,73E-12	5,05E-12	4,91E-12
Média	4,94E-12	5,02E-12	5,03E-12	4,30E-12	4,85E-12	4,88E-12

Tabela 3.5: Valores mínimo, máximo e médio em farads (F)- coleta 5.

	Leitura capacitância					
	Leitura P1 - 16 posições			Leitura P2 - 16 posições		
	1 mil	10 mil	100 mil	1 mil	10 mil	100 mil
Mín	4,44E-12	3,40E-12	4,99E-12	4,42E-12	4,68E-12	4,56E-12
Máx	5,12E-12	5,16E-12	5,06E-12	4,86E-12	5,03E-12	4,91E-12
Média	4,67E-12	4,80E-12	5,04E-12	4,61E-12	4,86E-12	4,86E-12

Tabela 3.6: Valores pilha com 32 posições de armazenamento em farads (F).

	Leitura capacitância					
	Leitura P1 - 32 posições			Leitura P2 - 32 posições		
	1 mil	10 mil	100 mil	1 mil	10 mil	100 mil
Mín	3,01E-12	4,85E-12	4,98E-12	2,87E-12	4,57E-12	4,86E-12
Máx	5,20E-12	5,18E-12	5,07E-12	4,89E-12	5,07E-12	4,93E-12
Média	4,61E-12	5,02E-12	5,03E-12	4,26E-12	4,87E-12	4,89E-12

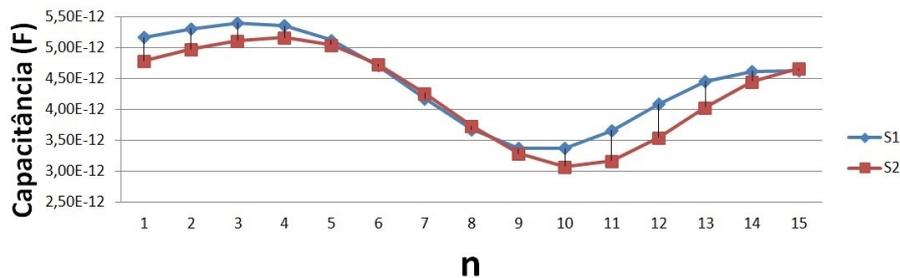


Figura 3.24: Paralelismo com dados armazenados em 16 posições de memória e taxa de amostragem de 1 mil amostras/segundo. Com S1 e S2 tendo o mesmo valor de referência de 4,9 pF, originado da placa de aquisição de dados. A variável n indica a posição do valor armazenado na pilha.

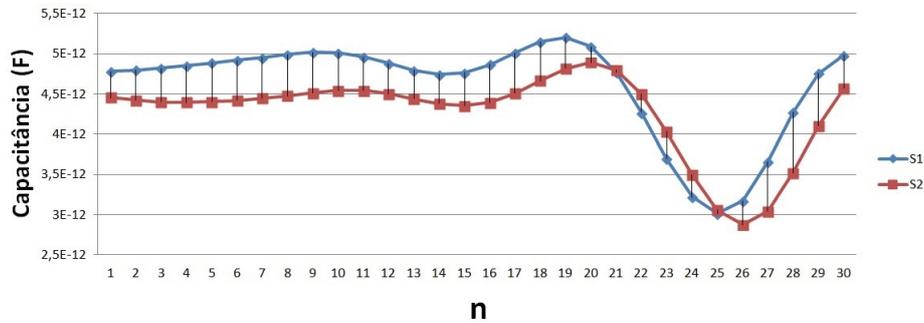


Figura 3.25: Paralelismo com dados armazenados em 32 posições de memória e taxa de amostragem de 1 mil amostras/segundo. Com S1 e S2 tendo o mesmo valor de referência de 4,9 pF, originado da placa de aquisição de dados. A variável n indica a posição do valor armazenado na pilha.

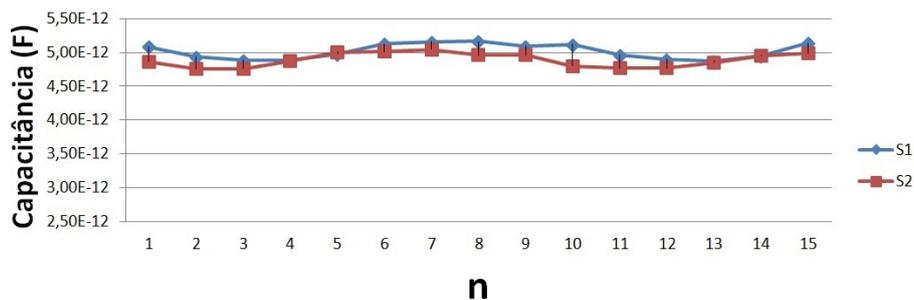


Figura 3.26: Paralelismo com dados armazenados em 16 posições de memória e taxa de amostragem de 10 mil amostras/segundo. Com S1 e S2 tendo o mesmo valor de referência de 4,9 pF originado da placa de aquisição de dados. A variável n indica a posição do valor armazenado na pilha.

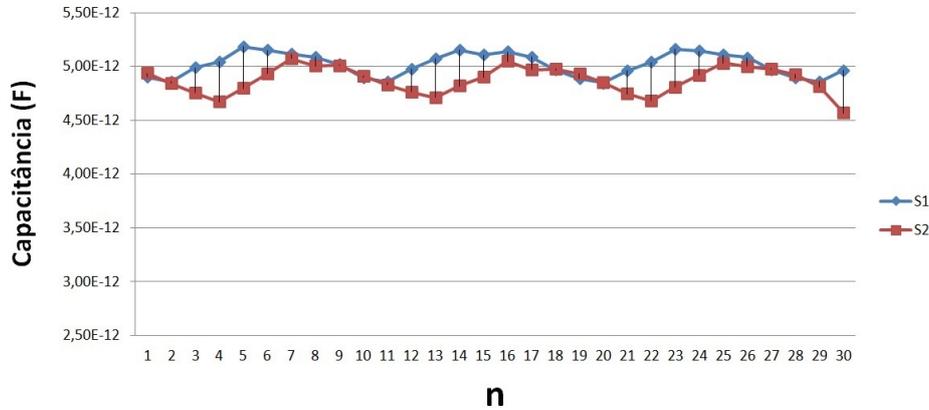


Figura 3.27: Paralelismo com dados armazenados em 32 posições de memória e taxa de amostragem de 10 mil amostras/segundo. Com S1 e S2 tendo o mesmo valor de referência de 4,9 pF originado da placa de aquisição de dados. A variável n indica a posição do valor armazenado na pilha.

Tabela 3.7: Resumo dos valores calculados pelo sistema multiprocessado armazenados nas pilhas com 16 elementos em farads (F) com somatório dos valores armazenados nas pilhas P1 e P2, do produto entre as pilhas P1 e P2, raiz quadrada do somatório dos produtos com taxas de amostragem de 1 mil, 10 mil e 100 mil amostras/segundo (a/s).

Resumo coleta de dados					
Taxa	Coleta	$\Sigma P1$	$\Sigma P2$	$\Sigma Prod P1 P2$	Raiz pilha
1 mil a/s	1	1,19E+015	1,14E+015	1,36E+030	1,16E+015
	2	3,62E-022	3,63E-022	8,19E-045	9,05E-023
	3	3,86E-022	3,92E-022	9,46E-045	9,72E-023
	4	3,94E-022	3,02E-022	7,48E-045	8,65E-023
	5	3,55E-022	3,43E-022	7,63E-045	8,73E-023
10 mil a/s	1	4,05E-022	3,84E-022	9,73E-045	9,86E-023
	2	4,03E-022	3,79E-022	9,57E-045	9,78E-023
	3	4,01E-022	3,79E-022	9,51E-045	9,75E-023
	4	4,06E-022	3,79E-022	9,63E-045	9,81E-023
	5	3,76E-022	3,80E-022	8,96E-045	9,47E-023
100 mil a/s	1	4,06E-22	3,82E-22	9,70E-45	6,97E+15
	2	4,06E-22	3,82E-22	9,69E-45	9,85E-23
	3	4,06E-22	3,82E-22	9,71E-45	9,86E-23
	4	4,06E-22	3,82E-22	9,68E-45	9,84E-23
	5	4,06E-22	3,78E-22	9,60E-45	9,80E-23

Tabela 3.8: Resumo dos valores calculados pelo sistema multiprocessado armazenados nas pilhas com 32 elementos em farads (F) com somatório dos valores armazenados nas pilhas P1 e P2, do produto entre as pilhas P1 e P2, raiz quadrada do somatório dos produtos com taxas de amostragem de 1 mil, 10 mil e 100 mil amostras/segundo (a/s).

Resumo coleta de dados					
Taxa	Coleta	$\sum P1$	$\sum P2$	$\sum ProdP_1P_2$	Raizpilha
1 mil a/s	1	1,05E+015	1,09E+015	1,15E+030	1,07E+015
	2	7,59E-022	7,34E-022	1,75E-044	1,32E-022
10 mil a/s	1	8,08E-022	7,63E-022	1,93E-044	1,39E-022
	2	8,11E-022	7,68E-022	1,95E-044	1,40E-022
100 mil a/s	1	8,10E-022	7,66E-022	1,94E-044	1,56E-004
	2	8,10E-022	7,65E-022	1,94E-044	1,39E-022

### 3.5.4 Resultados obtidos com variação de frequência

Anteriormente trabalhou-se com valor fixo de frequência de 1 kHz e variou-se a taxa de amostragem. Nas informações abaixo, conforme pode ser visto na Tabela 3.9 são exibidas as leituras para as frequências 3 kHz, 4 kHz, 5 kHz, 6 kHz e 7 kHz.

Na Figura 3.28 são exibidas as formas de onda para as frequências entre 3 kHz e 7 kHz. Percebe-se que as leituras com frequência de 5 kHz são as que mais se aproximam do valor de referência de 4,9 pF.

Tabela 3.9: Leituras em farads (F) variando entre 3 kHz e 7 kHz.

Leitura Capacitâncias com 32 amostras					
	3 kHz	4 kHz	5 kHz	6 kHz	7 kHz
Mínimo	4,76E-012	4,60E-012	4,83E-012	5,31E-012	4,00E-012
Máximo	5,01E-012	4,79E-012	4,95E-012	5,67E-012	4,40E-012
Médio	4,90E-012	4,68E-012	4,88E-012	5,51E-012	4,24E-012

Analisando as tabelas e gráficos de resultados, observou-se:

- Existe perda de dados durante o processamento, já que os valores das capacitâncias S1 e S2 divergem do valor de referência em todos os resultados;
- Existe perda de sincronismo durante o preenchimento das pilhas de armazenamento;

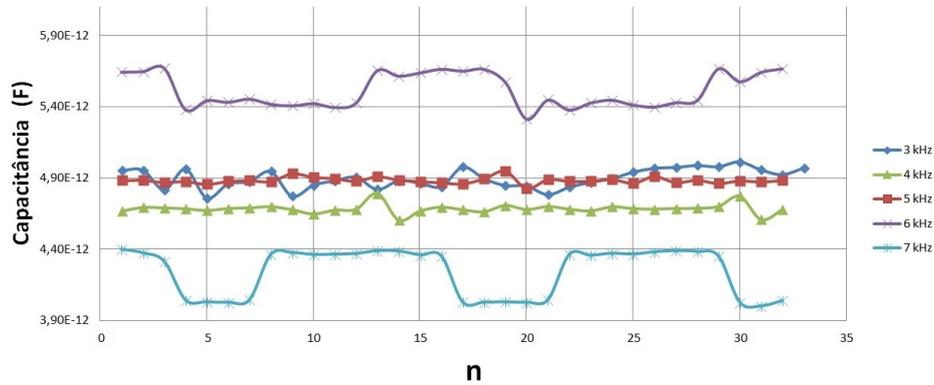


Figura 3.28: Leitura da pilha com 100 mil amostras/segundo.  $n$  indica a posição do valor armazenado na pilha.

- Quanto maior a taxa de amostragem, mais próximos os resultados chegam ao valor de referência;
- Quanto maior o tamanho da pilha de armazenamento, maior é o erro;
- Os resultados mais divergentes ocorreram para taxa de amostragem de 1 mil amostras/segundo para a pilha com tamanho de 32 posições e os melhores resultados são obtidos para uma taxa de amostragem de 10 mil amostras/segundo para uma pilha com tamanho de 16 posições; e
- Variando-se a frequência do gerador de sinal e deixando fixa a taxa de amostragem em 100 mil amostras/segundo, os melhores resultados foram obtidos para frequência de 5 kHz.

### 3.6 Considerações finais

Neste capítulo foram vistos o modelo com dois e quatro eletrodos; o sistema multiprocesso desenvolvido utilizando técnica de paralelismo e armazenamento em pilhas; a calibração do instrumento final, utilizando capacitores e resistores padrão, tendo seus resultados apresentados em gráficos; a composição da planta de vazão e os resultados das medições com o amplificador *lock-in* e com o sistema multiprocesso.

# Capítulo 4

## Conclusões e trabalhos futuros

Com base nas análises e resultados obtidos, conclui-se que:

- O sistema medidor de impedância elétrica desenvolvido no *LabVIEW*® utilizando a técnica de detecção síncrona *lock-in* possibilitou medir valores de capacitâncias de 2 pF a 3,5 nF e resistências de 200 k $\Omega$  a 9 M $\Omega$ , trabalhando na frequência de 1 kHz;
- Para valores de capacitância acima de 3,5 nF e valores de resistência abaixo de 200 k $\Omega$  é necessário substituir o resistor da realimentação do amplificador operacional;
- Para frequências acima de 10 kHz, poderá ser necessário substituir o amplificador operacional;
- Alguns fatores como: capacitâncias parasitas, ruído, temperatura e características dos componentes tem influência direta na medição e precisam ser melhor caracterizados;
- A técnica de medição utilizando amplificador *lock-in* é satisfatória e possui vantagem em relação a outras por realizar medições de sinais que estão abaixo do nível de ruído;
- O sistema de paralelismo implementado possibilitou realizar a aquisição, armazenamento e tratamento das leituras de dois sensores em pilhas que podem ter sua capacidade de armazenamento alterada em  $2^n$ , onde n é um número inteiro configurado no sistema;
- Todos os experimentos foram realizados com computador PC (Sistema Operacional *Microsoft Windows 7 Ultimate*, Processador *Intel(R)*

*Core(TM)2 Quad CPU Q9300* 2.50GHz, 4 Núcleo(s), 4 Processadores Lógicos, Memória *RAM* 2 GB. Tais características do computador influenciam na velocidade de processamento e no tempo de resposta dos cálculos realizados pelo sistema multiprocessado;

- Procurou-se variar a velocidade de aquisição dos dados alterando a taxa de amostragem no *DAQmx* e a frequência do sinal no gerador de funções;
- Com a frequência fixa em 1 kHz a taxa de amostragem foi alterada para 1 mil, 10 mil e 100 mil amostras/segundo. Observou-se que os resultados mais próximos com o valor de referência de 4,9 pF foram obtidos com 10 mil amostras/segundo. Com essa taxa de amostragem e para o tamanho de pilha de 16 posições os valores das capacitâncias tiveram variação entre 4,87 pF e 5,17 pF para o sensor S1, para S2 a variação foi entre 4,75 pF e 5,04 pF. A pilha com 32 posições os valores para S1 variaram entre 4,85 pF e 5,18 pF. Para S2 a variação foi 4,57 pF e 5,07 pF; O valor mínimo de taxa de amostragem que o sistema permitiu fazer os cálculos das capacitâncias foi 1 mil amostras/segundo.
- Existe perda de dados durante o processamento, já que os valores das capacitâncias S1 e S2 divergem do valor de referência em todos os resultados;
- Existe perda de sincronismo durante o preenchimento das pilhas de armazenamento. Com isso, uma pilha é preenchida mais rápido que a outra;
- Quanto maior a taxa de amostragem, mais próximos são os resultados do valor de referência;
- Quanto maior o tamanho da pilha de armazenamento, maior é o erro dos resultados obtidos;
- Todos os resultados tiveram divergências em relação ao valor de referência de 4,9 pF. Contudo, as maiores variações ocorreram para taxa de amostragem de 1 mil amostras/segundo para a pilha com tamanho de 32 posições e os melhores resultados são obtidos para uma taxa de amostragem de 10 mil amostras/segundo para uma pilha com tamanho de 16 posições;
- Variando-se a frequência do gerador de sinal e deixando fixa a taxa de amostragem em 100 mil amostras/segundo, os melhores resultados

foram obtidos para frequência de 5 kHz que tiveram variação entre 4,54 pF e 5,94 pF; e

- A menor frequência que o sistema conseguiu realizar os cálculos das capacitâncias foi 400 Hz.

### Trabalhos futuros

- Avaliar o comportamento do sistema para tamanhos de pilhas superiores a 32 posições de armazenamento;
- Avaliar o desempenho do sistema para frequência de 100 kHz;
- Implementar placa com circuitos contendo os blocos de processamento para ser capaz de suportar ambiente agressivos que trabalhem com temperaturas elevadas (poços de petróleo e minas);
- Implementar algoritmos em *VHDL* que possibilitem substituir funções do *LabVIEW*® e melhorarem os resultados obtidos na medição; e
- Desenvolver técnicas com processamento de sinais capazes de identificar o comportamento dos sinais obtidos durante o processamento da planta.

# Referências Bibliográficas

- [1] The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement. *Handbook of Multiphase Flow Metering*. Revision 2, March 2005.
- [2] Soo, S. L.; *Multiphase Fluid Dynamics*, Science Press, Beijing, 1995.
- [3] Paladino, E. E.; *Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do tipo Pressão Diferencial*. Tese de Doutorado, UFSC-PPGEM, 2005.
- [4] Letton, W.; Svaeren, J.; Conort, G.; *Topside and Subsea Experience with the Multiphase Flow Meter*, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE 38783, 1997.
- [5] Falcone, G.; Hewitt, G. F.; Alimonti, C.; Harrison, B.; *Multiphase Flow Metering: Current Trends and Future Developments*, Proceedings of SPE Annual Technical Conference And Exhibition, New Orleans, LA, EUA, SPE 71474, 2001.
- [6] Costa e Silva, C. B.; Silva Filho, J. A. P.; Borges Filho, M. B. *Medição de vazão e propriedades em escoamento multifásico: solução econômica para diferentes atividades industriais*. Boletim técnico da Petrobras, Rio de Janeiro, 43(1):45-61, Jan/Mar 2000.
- [7] Agar Corporation; *Not All Multiphase Flowmeters Are Created Equal - Part 1: Search the Fundamentals*, Houston.
- [8] Agar Corporation; *Not All Multiphase Flowmeters Are Created Equal - Part 2: The Agar Solution*, Houston.
- [9] Bega, E. A.(organizador);Delmée, G. J.; Cohn, P. E.; Bulgarelli, R.; Finkel, V. S.. *Instrumentação Industrial*. 2 edição, Rio de Janeiro: Interciência: IBP,2006.

- [10] M.J. Economides, A.D. Hill, C. Ehlig-Economides, *Petroleum Production Systems*, Prentice Hall, 1994.
- [11] Williams, J.; *Status of Multiphase Flow Measurement Research, Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, LA, USA, SPE 28515, 1994.
- [12] Mehdizadeh, P.; Farchy, D.; *Multi-Phase Flow Metering Using Dissimilar Flow Sensors: Theory and Field Trial Results*, Proceedings of SPE Middle East Oil Show, Bahrain, SPE 29847, 1995.
- [13] Agar J.; Farchy, D.; *Wet gas metering using dissimilar flow sensors: theory and field trial results*, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2002.
- [14] Ribeiro, A.; *Developments in Multiphase Metering*, Proceedings of 7th Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, SPE 36197, 1996.
- [15] Atkinson, D. I.; Berard, M.; Segeal, G.; *Qualification of a Non-Intrusive Multiphase Flow Meter in Viscous Flow*, Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dallas, Texas, October 1 - 4, SPE 63118, 2000.
- [16] Fueki, M.; Urabe, S.; Yamazaki, D.; Yamashita, M.; *Development of Multiphase Flowmeter without Radioactive Source*, Proceedings of SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modeling for Asset Management, Yokohoma, Japan, SPE 59421, 2000.
- [17] Lindsay, I., Stimpson, B., Corlett, A.; *Advanced Interpretation of Venturi Meter Measurements in Multiphase Flow*, Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, USA, SPE 71535, 2001.
- [18] Vilela, L.A.A.; Gervásio, E.S.; Soccol, O.J.; Botrel, T.A.; *Sistema para aquisição de dados de pressão e vazão utilizando o microcomputador*, Revista Brasileira de Agrocomputação, vol.1, no.2, p.25-30, Dez.2001.
- [19] Costa e Silva, C. B.; Filho, M. J. B.; Filho, J. A. P. S.; Neto, F. J. S.; *Critério para seleção de medidores multifásicos na Petrobras*, Bol. téc. PETROBRAS, Rio de Janeiro, 42 (1/4): 45-51, jan./dez. 1999.
- [20] Cellos, H.; Wee, A.; *Multiphase Flow Measurement System of High GOR Applications, Proceedings of SPE Western Regional Meeting*, Anchorage, Alaska, EUA, SPE 54605, 1999.

- [21] Hammer, E.A.; Johansen, G.A.; *Process tomography in the oil industry: state of the art and future possibilities*, Meas. Control 212-216, 1997.
- [22] I. Ismail; J.C. Gamio; S.F.A. Bukhari; W.Q. Yang; *Tomography for multi-phase flow measurement in the oil industry*, Flow Measurement and Instrumentation, vol. 16, pp. 145-155, 2005.
- [23] Huang, S.; Green, R.G.; Plaskowski, A.; Beck, M.S.; *A high frequency stray-immune capacitance transducer based on the charge transfer principle*, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol.37, no.3, pp. 368-373, Sep. 1988.
- [24] Mohamad, E.J.; Rahim, R.A.; *Multiphase flow reconstruction in oil pipelines by portable capacitance tomography*, Sensors, 2010 IEEE, pp.273-278, Nov. 2010.
- [25] A. Plaskowski, M.S. Beck, R. Thorn, T. Dyakowski; *Imaging Industrial Flows: Applications of Electrical Process Tomography*, Institute of Physics Publishing, UK, 1995.
- [26] Boyer, C.;Lemonnier, H.; *Design of a flow metering process for twophase dispersed flows*, International Journal of Multiphase Flow, vol. 22, pp.713-732, 1996.
- [27] S. Liu; Q. Chen; H.G. Wang; F. Jiang; I. Ismail; W.Q.Yang; *Electrical capacitance tomography for gas/solids flow measurement for circulating fluidized beds*, Flow Measurement and Instrumentation: Sci. Direct, pp.135-14 Fev. 2005.
- [28] Damasceno, M.A.; Penha, J.K.M.; Silva Junior, N.F.; Felipe, R.N.B.; Felipe, R.C.T.S.; Medeiros, G.G. *Influence of the Temperature, Pressure and Viscosity on the oil Measurement with Turbine Type Measurers*, Brazilian Archive of Biology and Technology, vol.49, Special: pp.65-71,Jan. 2006.
- [29] Ronchi, A. V. M.; Adamatti, L.V.; Silva, T. R. da.; *Medidor de vazão mássica de gases tipo turbina*, Trabalho de graduação. UFRGS, 2011.
- [30] França, F.A.; *Instrumentação e medidas: grandezas mecânicas*, UNICAMP, 2007.
- [31] *Operações nos Processos. Processos Cooperativos, Comunicações entre Processos*, Introdução aos Sistemas Operacionais. Disponível em [www.jairo.pro.br](http://www.jairo.pro.br), Acesso em 04 de maio de 2013.

- [32] Tanenbaum, A. S.; *Sistemas Operacionais Modernos*, 2 edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.
- [33] Machado, Francis Berenger; *Arquitetura de Sistemas Operacionais*, 2 edição, 1997.
- [34] *Sincronização e Comunicação entre Processos*, Sistemas Operacionais. Disponível em [www.uniban.br](http://www.uniban.br), Acesso em 04 de maio de 2013.
- [35] National Instruments - Developer Zone. *LabVIEW 8.5*, Disponível em [www.ni.com/white-paper/6514/pt](http://www.ni.com/white-paper/6514/pt), Publicado em 18 de maio de 2012, Acesso em 24 de abril de 2013.
- [36] National Instruments - Developer Zone. *Programming Strategies for Multicore Processing: Task Parallelism*, Disponível em [www.ni.com/white-paper/6420/en](http://www.ni.com/white-paper/6420/en), Publicado em 06 de dezembro de 2011, Acesso em 24 de abril de 2013.
- [37] National Instruments - Developer Zone. *Estratégias de Programação para Processamento Multicore: Paralelismo de Dados*, Disponível em [www.ni.com/white-paper/6421/pt](http://www.ni.com/white-paper/6421/pt), Publicado em 16 de dezembro de 2011, Acesso em 24 de abril de 2013.
- [38] National Instruments - Developer Zone. *Estratégias de Programação para Processadores Multicore: Pipelining*, Disponível em [www.ni.com/white-paper/6425/pt](http://www.ni.com/white-paper/6425/pt), Publicado em 16 de dezembro de 2011, Acesso em 24 de abril de 2013.
- [39] National Instruments - Developer Zone. *Learn 10 Functions in NI-DAQmx and Handle 80 Percent of Your Data Acquisition Applications*, Disponível em [www.ni.com/white-paper/2835/en](http://www.ni.com/white-paper/2835/en), Publicado em 04 de janeiro de 2012, Acesso em 29 de abril de 2013.
- [40] National Instruments - Developer Zone. *Exemplo de referência de transmissão de dados em alta velocidade para múltiplos dispositivos DAQmx*, Disponível em [www.ni.com/white-paper/5911/pt](http://www.ni.com/white-paper/5911/pt), Publicado em 20 de dezembro de 2011, Acesso em 02 de maio de 2013.
- [41] Zhang Wenzhao; Liu Zhizhuang; Xu Xiao; Liu Ailing; Chen Aiwu; *A liquid DP flow sensor on straight pipe*, Industrial Mechatronics and Automation (ICIMA), 2010 2nd International Conference on, vol.1, no., pp.481-485, 30-31 May 2010.

- [42] Ismail, I.; Shafquet, A.; Karsiti, M.N.;, *Application of electrical capacitance tomography and differential pressure measurement in an air-water bubble column for online analysis of void fraction*, Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2011 4th International Conference on, pp.1-6, April 2011.
- [43] Jian Qiu Zhang; Yong Yan;., *Detecting the blockage of the sensing lines of a differential-pressure flow sensor in a dynamic process using wavelet transform techniques*, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol.55, no.4, pp.1443-1448, Aug. 2006.
- [44] Jian Qiu Zhang; Yong Yan;., *A self-validating differential-pressure flow sensor [using wavelet transforms]*, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE, vol.2, pp.1227-1230 vol.2, 2001.
- [45] Beck, M. S.; *Correlation in instruments: cross correlation flowmeters*, Journal of Physics E: Scientific Instruments: Instrument Science and Technology, Vol. 14, 1981.
- [46] W. Q. Yang; Beck, M. S.; *An intelligent cross correlator for pipeline flow velocity measurement*, Flow Mea. Instrum, vol.8, no.2, pp. 77-84, 1997.
- [47] Deng, X.; Dong, F.; Xu, L. J.; Liu, X. P.; Xu, L. A.; *The design of a dual-plane ERT system for cross correlation measurement of bubbly gas/liquid pipe flow*, Institute of Physics Publishing: Meas. Sci. Technol., pp.1024-1031 Dez. 2001.
- [48] Shafquet, Areeba; Ismail, I.; Karsiti, Mohd Noh;., *Study of Void Fraction Measurement in a Two Phase Flow by Using Differential Pressure and Electrical Capacitance Tomography*, Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation (AMS), 2010 Fourth Asia International Conference on, pp.408-413, 26-28 May. 2010.
- [49] Meribout, M.; Al-Rawahi, N.Z.; Al-Naamany, A.M.; Al-Bimani, A.; Al Busaidi, K.; Meribout, A.;, *An Accurate Machine for Real-Time Two-Phase Flowmetering in a Laboratory-Scale Flow Loop*, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol.58, no.8, pp.2686-2696, Aug. 2009.
- [50] Falconi, C., Martinelli, E., Natale C. D., Amico, A. D., Maloberti F., Malcovati, P., Baschiroto, A., Stornelli, V., Ferri, G., *Electronic interfaces, Sensors and Actuators B: Chemical*, vol.121, pp.295-329, jan. 2007.

- [51] Xiang Deng; Ye Chen; Zengwei Yan; Zheng Wei;, *AC Impedance Model of Array Electrodes in Multisensor Fusion System for Two-Phase Flow Measurement*, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol.59, no.6, pp.1722-1726, june. 2010.
- [52] Baxter, Larry K. *Capacitive sensors: design and application*. Nova York: IEEE, 1997.
- [53] H.E. Merritt, *Hydraulic Control Systems*, John Wiley e Sons, Inc, NewYork, 1967.
- [54] Kang, Jiyeon; Park, Frank C.;; *Minimum heat loss control of fluid-powered systems*, Control, Automation and Systems (ICCAS), 2011 11th International Conference on, pp.1383-1387, Oct. 2011.
- [55] Billeter, T. Roger;; *Sensor for Measurement of Fuel Rod Gas Pressure during Loss of Fluid Tests*, Nuclear Science, IEEE Transactions on, vol.27, no.1, pp.826-832, Feb. 1980.
- [56] Jiann-Chang Lin; Shuhn-Shyurng Hou; Shu-Jhang Li;; *The effects of temperature-dependent specific heats of the working fluid on the performance of a Dual cycle with heat loss and friction*, Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2011 International Conference on, vol., no., pp.5378-5381, 16-18 April 2011.
- [57] Ribeiro, K. C.; *Medição da impedância utilizando sistemas digitais*, Dissertação de mestrado, UFMG-PPGEE-CPDEE, 2007.
- [58] Angrisani, L.; Baccigalupi, A.; Pietrosanto, A.; *A digital signal-processing instrument for impedance measurement*, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol.45, no.6, pp.930-934, Dec. 1996.
- [59] Tomas, R; M. Ramos Pedro; Cruz Serra, A. *DSP based portable impedance measurement instrument using sine-fitting algorithms*. Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. IMTC 2005. vol. 2, pp.1018-1022, May. 2005.
- [60] Ramos, P.M.; Silva, M. Fonseca; Serra, A. Cruz. *Low frequency impedance measurement using sine-fitting Measurement*. Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO). vol. 35, pp.89-96, Jan. 2004.

- [61] Sun, F., Chaudhry, Z., Liang, C., and Rogers, C. A. *Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator*. J. Intelligent Mat. Sys. and Struct. 6, pp.134-139, 1995.
- [62] Park, G.; Cudney, H.H; Inman, D.J; *Impedance-based health monitoring of civil structural components*. Journal of infrastructure systems. 6, pp.153-160, 2000.
- [63] Ewins, D. J.; *Modal Testing: Theory and Practice*. John Wiley e Sons inc, 1984.
- [64] Tebaldi, A.; *Detecção de Falhas Estruturais Usando Sensores e Atuadores Piezelétricos e Algoritmos Genéticos*. Dissertação de Mestrado, (Dem/Feis/Unesp), Ilha Solteira, SP, Brasil, 2003.
- [65] De Vera, C. P.; GUEMES, J. A., *Embedded Self-Sensing Piezoelectric for Damage Detection*. Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring, September 18-20, Stanford, CA 445-455, 1997.
- [66] Awad, S.S.; Narasimhamurthi, N.; Ward, W.H.;, *Analysis, design, and implementation of an AC bridge for impedance measurements*, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol.43, no.6, pp.894-899, Dec 1994.
- [67] Dutta, M.; Rakshid, A.; Battacharyya, S. N.; Choudhwy, J. K.; *An application of the LMS adaptive algorithm for a digital AC bridge*, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 36, pp. 894-897, 1987.
- [68] Santos, Edval J. P. *Sensores Industriais*. Recife, 2009/2010.
- [69] Santos, Edval J. P. *Eletrônica Analógica Integrada e Aplicações*. Recife, 2009/2010.
- [70] Thumas, Jose Eduardo. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 2 edição, Rio de Janeiro: Interciência: Petrobras,2004.
- [71] Ferri, G., De Laurentiis, P., Di Natale, C., D Amico, A., *A low voltage integrated CMOS lock in amplifier prototype for LAPS applications*, Sensors and Actuators A, vol.92, pp. 263-272, 2001.
- [72] Sonnaillon, M. O., Bonetto, F. J., *A low-cost, highperformance, digital signal processor-based lock-in amplifier capable of measuring multiple frequency sweeps simultaneously*, Review of Scientific Instruments, vol.76, jan. 2005.

- [73] An Hu; Chodavarapu, V.P.; *CMOS Optoelectronic Lock-In Amplifier With Integrated Phototransistor Array*, Biomedical Circuits and Systems, IEEE Transactions, vol.4, no.5, pp.274-280, Oct. 2010.
- [74] S. Johnson; M. Thomas; C. Kros; *Membrane capacitance measurement using patch clamp with integrated self-balancing lock-in amplifier*, Pflügers Arch-Eur. J. Physiol., vol.443, no.4, pp.653-663, Feb. 2004.
- [75] De Marcellis, A.; Ferri, G.; Patrizi, M.; Stornelli, V.; D'Amico, A.; Di Natale, C.; Martinelli, E.; Alimelli, A.; Paolesse, R.; *An integrated analog lock-in amplifier for low-voltage low-frequency sensor interface*, Advances in Sensors and Interface, 2007. IWASI 2007. 2nd International Workshop on, pp.1-5, June 2007.
- [76] Gnudi, A.; Colalongo, L.; Baccarani, G.; *Integrated Lock-In Amplifier for Sensor Applications*, Solid-State Circuits Conference, 1999. ESSCIRC '99. Proceedings of the 25th European, pp.58-61, Sept. 1999.
- [77] Azzolini, C.; Magnanini, A.; Tonelli, M.; Chiorboli, G.; Morandi, C.; *Integrated lock-in amplifier for contactless interface to magnetically stimulated mechanical resonators*, Design and Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era, 2008. DTIS 2008. 3rd International Conference on, pp.1-6, Mar. 2008.
- [78] Yang Qing; *Design and simulation of a lock-in amplifier*, Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), 2011.
- [79] Resende, Leonardo Correia. Desenvolvimento de um Amplificador Lock-In com DSP operando em Altas Freqüências. *Dissertação de mestrado. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF*, 2008.
- [80] Kun, C.; Dezhi, Z.; Jianhui, Z.; Shangchun, F.; *An Open-Loop Characteristic Testing System of Coriolis Mass Flowmeter Based on Virtual Instrument Technology*, Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE), 2010 International Conference on, vol.2, pp.61-64, June 2010.
- [81] Chen Aiwu; Liu Ailin; Liu Zhizhuang; Zhang Wenzhao; Tang Xinling; *Design of flow control system on sprayer*, Computer Application and System Modeling (ICASM), 2010 International Conference on, vol.12, pp.V12-577-V12-580, Oct. 2010.

- [82] Huang Ming-Jian; Tang Zhen-Juan; Zhu Jiang; Sun Shi-Xiang; Xu Cui-Cui; *Calibration System of Large Diameter Flowmeter Base on LabVIEW*, Intelligent Systems and Applications, 2009. ISA 2009. International Workshop on, pp.1-4, may. 2009.
- [83] Gan, K.B.; Zahedi, E.; Ali, M.A.M.; *Design and Implementation of A PC-Based Digital Synchronous Detection System for Biological Signal Measurement*, Research and Development, 2007. SCORed 2007. 5th Student Conference on, pp.1-4, 12-11 dec. 2007.
- [84] Moody, K.L.; Hollingsworth, N.A.; Nielsen, J. -F; Noll, D.; Wright, S.M.; McDougall, M.P., *A LabVIEW-based operating system for parallel transmit systems*, Biomedical Imaging: From Nano to Macro, 2011 IEEE International Symposium on , pp.771,774, March 30 2011-April 2 2011.
- [85] Lunca, E.; Damian, C.; Mariut, F., *Simplifying the communication with I C devices using LabVIEW and the PC's parallel port*, Remote Engineering and Virtual Instrumentation (RE V), 2012 9th International Conference on , pp.1,4, 4-6 July 2012.
- [86] National Instruments. *NI USB-6363 X Series Data Acquisition - Specifications*.

# Apêndice A

## Informações adicionais

### A.1 Diagramas

A pinagem do *DAQ* utilizado na simulação é mostrada na Figura A.1.

### A.2 Tabelas

Nas Tabelas A.1, A.2, A.2, A.3, A.4 são mostrados os dados usados na geração dos gráficos de resultado das curvas de calibração do capítulo 3.

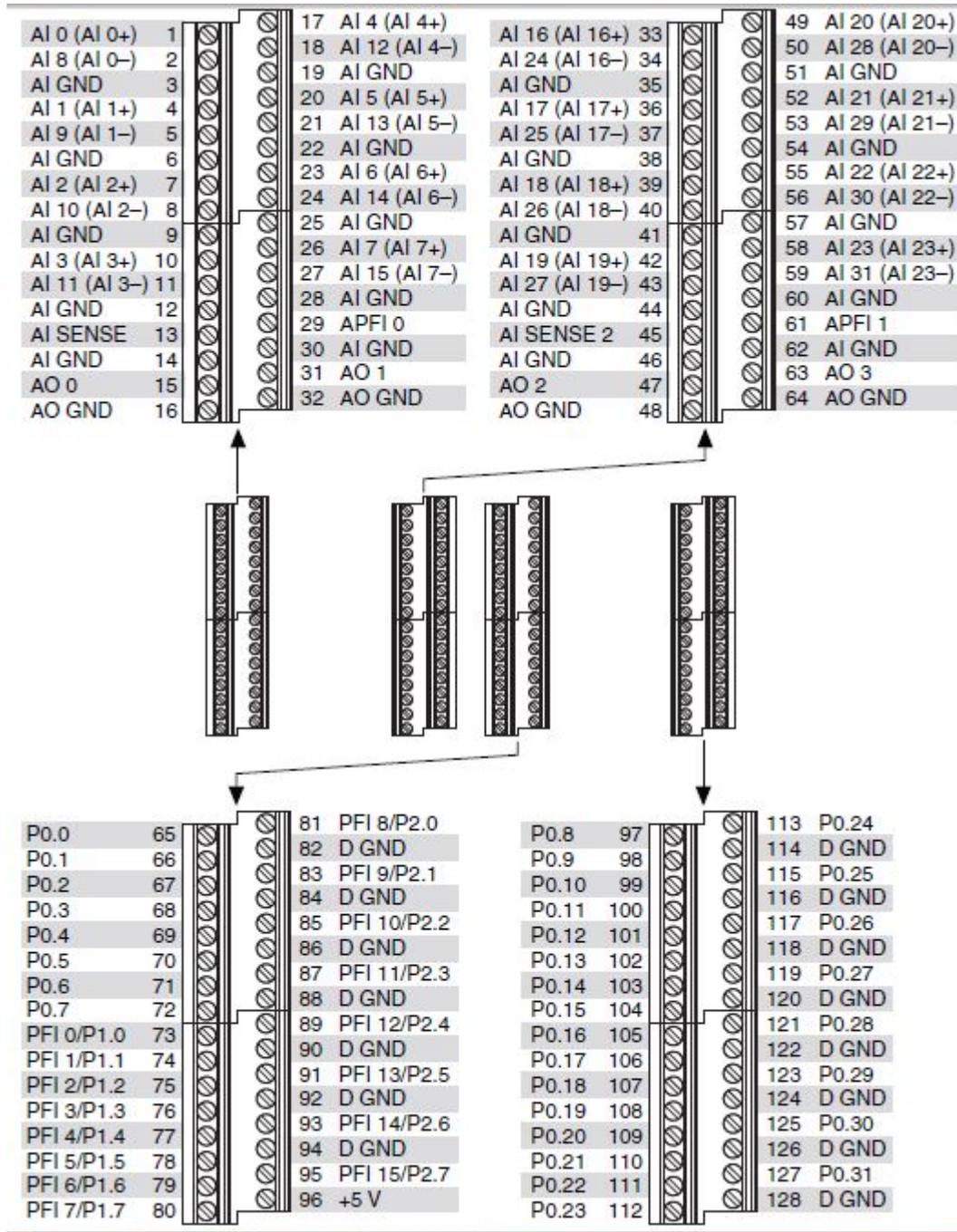


Figura A.1: Pinagem dispositivo de aquisição de dados(DAQ) 6363 [86]

Tabela A.1: Valores teóricos das tensões de saída por capacitância.

Valores teóricos Vsa.teo (V)				
C(pF)	fo=10kHz	fo=1kHz	fo=500Hz	fo=100Hz
100	0,3925	0,03925	0,019625	0,003925
200	0,785	0,0785	0,03925	0,00785
300	1,1775	0,11775	0,058875	0,011775
400	1,57	0,157	0,0785	0,0157
500	1,9625	0,19625	0,098125	0,019625
600	2,355	0,2355	0,11775	0,02355
700	2,7475	0,27475	0,137375	0,027475
800	3,14	0,314	0,157	0,0314
900	3,5325	0,35325	0,176625	0,035325
1000	3,925	0,3925	0,19625	0,03925
1500	5,8875	0,58875	0,294375	0,058875
2000	7,85	0,785	0,3925	0,0785
2500	9,8125	0,98125	0,490625	0,098125
3000	11,775	1,1775	0,58875	0,11775
3500	13,7375	1,37375	0,686875	0,137375
4000	15,77	1,57	0,785	0,15
4500	17,6625	1,76625	0,883125	0,176625
5000	19,625	1,9625	0,98125	0,19625
5500	21,5875	2,15875	1,079375	0,215875
6000	23,55	2,355	1,1775	0,2355
6500	25,5125	2,55125	1,275625	0,255125
7000	27,475	2,7475	1,37375	0,27475
7500	29,4375	2,94375	1,471875	0,294375
8000	31,4	3,14	1,57	0,314
8500	33,3625	3,33625	1,668125	0,333625
9000	35,325	3,5325	1,76625	0,35325

Tabela A.2: Valores experimentais das tensões de saída por capacitâncias. Foi utilizado um Capacitor de precisão - *CS 301 Precision* com capacitância residual de 40 pF.

Valores experimentais $V_{sa\_exp}[V]$				
C(pF)	fo=10kHz	fo=1kHz	fo=500Hz	fo=100Hz
100	0,0950	0,05353	0,02682	0,005468
200	0,8847	0,09361	0,0469	0,0095
300	1,05577	0,1378	0,05971	0,0097
400	1,1323	0,1770	0,08213	0,01477
500	1,1694	0,2070	0,11047	0,01982
600	1,19256	0,2415	0,1146	0,02203
700	1,2068	0,2800	0,1300	0,0305
800	1,2168	0,3230	0,1597	0,03317
900	1,2242	0,3670	0,1859	0,03414
1000	1,2316	0,412	0,2022	0,03364
1500	1,2458	0,627	0,2899	0,0527
2000	1,2514	0,839	0,3983	0,074
2500	1,254	1,006	0,4867	0,094
3000	1,25575	1,218	0,589	0,1139
3500	1,258	1,388	0,7005	0,1285
4000	1,2586	1,105	0,8046	0,1516
4500	1,25905	0,907	0,9046	0,1734
5000	1,2595	0,753	1,0068	0,1882
5500	1,25966	0,631	1,11	0,208
6000	1,25991	0,526	1,15755	0,2313
6500	1,2604	0	1,244	0,243
7000	1,26036	0,3837	1,3245	0,2647
7500	1,26038	0	1,4435	0,2892
8000	1,26046	0,2638	1,34	0,3039
8500	1,2611	0	1,2272	0,3188
9000	1,26096	0,1713	1,1318	0,3378

Tabela A.3: Comparação entre medições. Como referência foi utilizado um capacitor de precisão - *CS 301 Precision* com capacitância residual de 40 pF.

Comparação medição multímetro e <i>lock-in</i> .				
C (pF)	Nominal (pF)	Multímetro(pF)	<i>Lock-in</i> (pF)	Erro (pF)
0	0	157	41	41
100	100	269	140,42	40,42
200	200	365	244,87	44,87
300	300	484	343,42	43,42
400	400	601	446,22	46,22
500	500	707	544,5	44,5
600	600	816	647,88	47,88
700	700	918	744,59	44,59
800	800	1019	847,6	47,6
900	900	1117	953,55	53,55
1000	1000	1219	1056	56
1500	1500	1716	1574	74
2000	2000	2210	2097	97
2500	2500	2702	2619	119
3000	3000	3188	3079	79
3500	3500	3680	3597	97
4000	4000	4182	2966	1034
4500	4500	4676	2509	1991
5000	5000	5160	2145	2855
5500	5500	5650	1856	3644
6000	6000	6150	1610	4390
6500	6500	6650	1408	5092
7000	7000	7140	1236	5764
7500	7500	7630	1088	6412
8000	8000	8120	960	7040
8500	8500	8620	845	7655
9000	9000	9110	745	8255

Tabela A.4: Comparação resultados multímetro e *lock-in*. Como referência foi utilizado um resistor de precisão - *RS 201 Precision*.

Comparação medições <i>lock-in</i> e Multímetro comercial				
R (MΩ)	Nominal (MΩ)	Multímetro (MΩ)	<i>lock-in</i> (MΩ)	Erro
9,9	9,9	9,83	9,89	0,01
9,8	9,8	9,73	9,8	0
9,7	9,7	9,62	9,7	0
9,6	9,6	9,53	9,6	0
9,5	9,5	9,43	9,48	0,02
9,4	9,4	9,33	9,38	0,02
9,3	9,3	9,23	9,28	0,02
9,2	9,2	9,13	9,18	0,02
9,1	9,1	9,03	9,08	0,02
9	9	8,93	8,99	0,01
8,9	8,9	8,83	8,89	0,01
8,8	8,8	8,74	8,78	0,02
8,7	8,7	8,63	8,69	0,01
8,6	8,6	8,53	8,58	0,02
8,5	8,5	8,43	8,49	0,01
8,4	8,4	8,33	8,38	0,02
8,3	8,3	8,24	8,29	0,01
8,2	8,2	8,14	8,18	0,02
8,1	8,1	8,04	8,08	0,02
8	8	7,94	7,97	0,03
7,9	7,9	7,84	7,9	0
7,8	7,8	7,74	7,79	0,01
7,7	7,7	7,64	7,69	0,01
7,6	7,6	7,54	7,59	0,01
7,5	7,5	7,45	7,49	0,01
7,4	7,4	7,34	7,39	0,01
7,3	7,3	7,24	7,291	0,009
6	6	5,95	5,99	0,01
5	5	4,97	4,99	0,01
4	4	3,97	3,99	0,01
3	3	2,998	2,99	0,01
2	2	2	2	0
1	1	0,998	0,997	0,003
0,5	0,5	0,499	0,498	0,002
0,2	0,2	0,2002	0,199	0,001
0,15	0,15	0,1502	0,272	0,122
0,14	0,14	0,1403	0,319	0,179
0,13	0,13	0,1302	0,396	266
0,12	0,12	0,1202	0,537	0,417
0,11	0,11	0,1101	0,86	0,75
0,1	0,1	0,1001	2,05	1,95