

Zapopan, Jalisco, México, 19 de noviembre de 2024

Buenas tardes Concurso Excelencia Docente,

De acuerdo con la Resolución 5561 de 2024 y al correo enviado por ustedes el 18 de noviembre, a continuación, encontrará mi tesis de doctorado "*Estudo topológico de escoamento trifásico óleo-água-ar através de sensor de impedância de resposta rápida do tipo wire-mesh*" (Estudio topológico de flujos trifásicos óleo-agua-aire a través de sensor de impedancia de tipo wire-mesh), para la validación del área. Este documento está publicado en línea en el repositorio de la biblioteca de la Universidad de Sao Paulo (<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18147/tde-26072016-074550/pt-br.php>).

Por otro lado, me permito hacer notar que conforme a lo estipulado en el artículo 4 de la Resolución 2421 de 2024, es válido el "... · Doctorado que en la tesis incluya desarrollo de alguno de los siguientes productos:

· Prototipos de hardware que incluyan desarrollo de ingeniería en placas de circuito impreso (PCB), FPGA (field Programmable Gate Array), sistemas embebidos personalizados, y que estén documentados en la tesis...", además de otras opciones. En mi caso, considero cumplo con la opción presentada, ya que en mi doctorado se desarrolló un tomógrafo de alta velocidad (equipo electrónico análogo-digital) que reconoce tres diferentes fases de fluidos, basado en sensores de tipo wire-mesh para ser usado en el área de petróleos (por esto último el doctorado se realizó en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sao Paulo). Se cumple con esta opción porque en la tesis se incluye la información de las diferentes PCBs construidas expresamente para el doctorado, la FPGA especialmente seleccionada por los requerimientos de alta velocidad del proyecto y los sistemas embebidos desarrollados de manera particular para que funcionará todo el tomógrafo. Esto se describe en la sección 4.4 de la tesis. Inclusive en la sección 4.3 se describe otro tomógrafo bifásico que se desarrolló, aunque en ese no se usó FPGA. Igualmente, en la sección 4.2 se muestran otros sistemas desarrollados para hacer pruebas preliminares antes de llegar a los sistemas definitivos mostrados en las secciones anteriormente mencionadas. También, en el capítulo 2 se hace una revisión extensa y detallada de la teoría de las técnicas de instrumentación electrónica, física y programación necesarias para diseñar estos tomógrafos.

Me permito también anexar el artículo "Three-Phase Flow Tomography System in Upward-Vertical High-Viscous-Oil/Water/Gas Flow", publicado en la IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement y derivado directamente de mi tesis. Este artículo resume y destaca el tomógrafo trifásico construido durante el doctorado.

Deseándoles un feliz día,



Hugo Fernando Velasco Peña

CC 79731831

HUGO FERNANDO VELASCO PEÑA

ESTUDO TOPOLÓGICO DE ESCOAMENTO TRIFÁSICO ÓLEO-ÁGUA-
AR ATRAVÉS DE SENSOR DE IMPEDÂNCIA DE RESPOSTA RÁPIDA
DO TIPO “*WIRE-MESH*”

Tese apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor.

Área de concentração: Térmica e
Fluidos

Orientador: Prof. Assoc. Oscar M. H.
Rodriguez

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL
ENCONTRA-SE DISPONÍVEL
JUNTO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECANICA DA
EESC-USP.

SÃO CARLOS

2015

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo da Publicação

Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

V433e Velasco Peña, Hugo Fernando
Estudo topológico de escoamento trifásico
óleo-água-ar através de sensor de impedância de
resposta rápida do tipo wire-mesh / Hugo Fernando
Velasco Peña; orientador Oscar Mauricio Hernandez
Rodriguez. São Carlos, 2015.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Térmica e
Fluídos -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2015.

1. Sensor wire-mesh. 2. Escoamento trifásico. 3.
Escoamento óleo-água. 4. Óleo viscoso. 5.
Instrumentação. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **HUGO FERNANDO VELASCO PEÑA**.

Título da tese: "Estudo topológico de escoamento trifásico óleo-água-ar através de sensor de impedância de resposta rápida do tipo WIRE-MESH".

Data da defesa: 27/02/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Oscar Mauricio Hernandez Rodriguez**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Luiz Felipe Mendes de Moura**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Prof. Dr. **Niederauer Mastelari**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Dr. **Marcelo da Silva Rocha**
(Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/IPEN)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Em memória dos meus pais Ángela e Marco Antonio.

En memoria de mis padres Ángela y Marco Antonio.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Assoc. Oscar Mauricio Hernandez Rodriguez, meus sinceros agradecimentos pela orientação, apoio e confiança prestados para a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Horst Michael Prasser do Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, ETHZ, pela sua valiosa colaboração e sugestões para levar em bom término a presente tese.

Um agradecimento especial a minha esposa Adriana Bonilla pela sua valiosa colaboração como companheira, amiga e colega.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC, da Universidade de São Paulo, meus agradecimentos pelos relevantes ensinamentos transmitidos ao longo do curso e apresentar-me uma nova área de conhecimentos. Especial agradecimento aos professores do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos.

À equipe do Laboratório de Ensaios de Escoamentos Multifásicos (DONAU) da *Shell Global International BV*, na Holanda, por sua valiosa colaboração nos experimentos bifásicos.

À PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.) pelo seu apoio financeiro para a aquisição de equipamentos.

À FIPAI (Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial) e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelas bolsas concedidas durante o doutorado.

Aos colegas do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, meus agradecimentos pelo seu acompanhamento e discussões que enriqueceram o trabalho. Quero agradecer especialmente aos meus companheiros de pós-graduação Iara Rodriguez, Marlon Hernandez, Luis Ortiz, Ricardo Pereira, Márcia Osaki e Sávidier Conti pela sua valiosa colaboração e fazer do doutorado uma estadia grata no Brasil.

Aos estudantes de iniciação científica Lucas Pátaro e Carlos Gonzalez pela sua valiosa colaboração.

Aos técnicos dos departamentos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica e o Laboratório de Resíduos da EESC. Especialmente a Hélio Trebi, pelo seu valioso apoio nas mais difíceis tarefas mecânicas, Roberto Prativiera, José Torres, Jorge dos Santos e José Bogni, técnicos do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos.

À minha família e meus amigos na Colômbia e no Brasil.

RESUMO

VELASCO PEÑA, H. F. (2012). **Estudo topológico de escoamento trifásico óleo-água-ar através de sensor de impedância de resposta rápida do tipo “*wire-mesh*”**. Texto redigido para o Exame de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

A ocorrência frequente de escoamentos multifásicos em tubulações tem motivado um grande interesse acadêmico nas últimas décadas. O caso particular de escoamentos líquido-líquido é geralmente encontrado na indústria do petróleo, onde uma série de aplicações envolve escoamentos óleo-água, tais como a produção de petróleo e seu transporte. No entanto, ele não tem recebido a mesma atenção quando comparado com escoamentos gás-líquido. Ainda não existe uma explicação física razoável para um número significativo de fenômenos observados em escoamento óleo-água, como o fenômeno de redução de atrito, observado em escoamento disperso, e a estrutura interfacial ondulada em escoamento estratificado. Os escoamentos trifásicos têm sido ainda menos estudados. Há técnicas de medição, desenvolvidas para escoamento gás-líquido, que supostamente são adaptáveis aos escoamentos líquido-líquido, mas várias delas ainda precisam de validação adequada. O sensor *wire-mesh*, um método híbrido baseado na medição de resistência ou capacitância, que combina medição local intrusiva da fração de fase e imagens tomográficas transversais, oferece uma boa resolução espacial e alta resolução temporal em comparação com outras técnicas atuais. Porém, a literatura existente em aplicações do sensor *wire-mesh* cobre quase apenas o escoamento gás-líquido e, até agora, não é possível avaliar o limite de viscosidade do fluido para a sua aplicação. Neste contexto, este projeto propõe o estudo de aspectos importantes da fenomenologia de escoamentos líquido-líquido e líquido-líquido-gás com o auxílio da tecnologia *wire-mesh*. O principal objetivo prático é a validação da técnica *wire-mesh* como ferramenta de referência para o desenvolvimento de instrumentação para aplicações em campos petrolíferos, com especial atenção devotada ao efeito da viscosidade do óleo sobre a confiabilidade da medição e à extensão da tecnologia para lidar com escoamentos óleo-água-gás.

Palavras-chave: Sensor *wire-mesh*, Escoamento trifásico, Escoamento óleo-água, Óleo viscoso, Instrumentação.

ABSTRACT

VELASCO PEÑA, H. F. (2012). Topologic study of three-phase pipe flow by means of fast-response wire-mesh impedance sensor. Text written for the DSc. thesis defense examination – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

The frequent occurrence of multiphase flows in pipes has motivated a great research interest over the last decades. The particular case of liquid-liquid flow is commonly encountered in the petroleum industry, where a number of applications involve oil-water flow such as crude oil production and transportation. However, it has not received the same attention when compared to gas-liquid flow. There is no reasonable physical explanation for a significant number of phenomena observed in oil-water flow, as the drag reduction phenomenon observed in dispersed flow and the interfacial wavy structure of stratified flow. Much less has been investigated when it comes to three-phase flow. Several measurement techniques that are supposed to be adaptable to liquid-liquid flow have been proposed recently, but many of them still need proper validation. The wire-mesh sensor, a hybrid impedance-based method that combines intrusive local measurement of phase fraction and tomographic cross-sectional imaging, offers good spatial resolution and high temporal resolution in comparison with other current techniques. However, the existing literature on wire-mesh sensor applications covers almost only the gas-liquid flow and, so far, it is not possible to evaluate the fluid-viscosity limit for its application. In that context, this project proposes the study of important aspects of liquid-liquid and liquid-liquid-gas flow phenomenology with the aid of the wire-mesh technology. The main goal is the validation of the wire-mesh technique as a reference tool for the development of instrumentation for oilfield application, with especial attention paid to the effect of oil viscosity on measurement reliability and the extension of the technology for dealing with oil-water-gas flow.

Keywords: Wire-mesh sensor, Three-phase flow, Oil-water flow, Viscous oil, Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Escoamento bifásico de óleo viscoso e água em padrão anular num poço experimental da Petrobras. O filme de água tem um efeito “lubrificante” que ajuda a aumentar a produção de óleo, Bannwart et al. (2012).	32
Figura 2. Padrões de escoamento trifásico em tubulação horizontal detalhados por Bannwart et al. (2004).	37
Figura 3. Padrões de escoamento trifásico em tubulação vertical abordados no trabalho de Bannwart et al. (2005).	38
Figura 4. a) Desenho esquemático e imagem original obtida por câmera (vista lateral) de um escoamento trifásico em golfadas em tubulação horizontal, Huang et al. (2013). b) Desenho esquemático da distribuição na seção transversal de um escoamento estratificado trifásico e imagem obtida por câmera (vista de abaixo), Gawas (2013).	39
Figura 5. Exemplos de mapas de fluxo trifásico usados por a) Taitel et al. (1995) em escoamento horizontal; b) Açikgöz et al. (1992) em escoamento horizontal; c) Bannwart et al. (2005) em escoamento vertical, $0,04 < j_w < 0,5$ m/s.	44
Figura 6. Abordagem ao problema de medição em escoamentos trifásicos, Thorn et al. (2013).	46
Figura 7. Exemplo de uma sonda de agulha e o sinal obtido, Da Silva (2008).	48
Figura 8. Diagrama da sonda de agulha capacitiva desenvolvida por Da Silva et al. (2007a) e o sinal obtido num experimento bifásico isopropanol-água.	49
Figura 9. Esquemas típicos de medição da fração das fases por meio de atenuação de radiação, Da Silva (2008).	50
Figura 10. Princípio de medição da fração em técnicas de radiação de raios-X e raios- γ , para um feixe estreito, Frøystein et al. (2005). a) medição num volume com as fases misturadas homogeneamente; b) caso equivalente onde as fases estão completamente separadas.	50
Figura 11. Arranjos típicos das sondas de impedância, Da Silva (2008). a) côncava; b) anel duplo; c) helicoidal.	53
Figura 12. a) Relação entre a impedância e a razão de frações dos fluidos; b) Permissividade calculada para uma mistura óleo-água; Dykesteen et al. (1985).	54
Figura 13. Modelo de área semicircular usada por Dos Santos (2011) para um escoamento gás-líquido. a) imagem adquirida; b) modelo de área circular; c) comparação.	55
Figura 14. Diferentes gerações de tomógrafos de radiação ionizante, primeira à quarta geração, Abdullah et al. (2008).	57
Figura 15. Reconstrução da imagem da seção transversal, Da Silva (2008).	57
Figura 16. Representação esquemática do sensor <i>wire-mesh</i> , com a sua localização numa tubulação.	63
Figura 17. Imagem obtida para um escoamento trifásico através de um sensor <i>wire-mesh</i> capacitivo, fio central, Da Silva (2008).	63
Figura 18. Sinal de condutividade usada no trabalho de Descamps et al. (2007) para separar três fases. A linha tracejada representa o nível de discriminação entre o ar e a mistura óleo-água. σ_l, i, j representa a condutividade média da mistura para cada ponto i, j do sensor.	65

Figura 19. Imagens dos sensores desenvolvidos para a medição de espessura de filmes líquidos. a) Belt et al. (2010); b) Damsohn; Prasser (2009).....	66
Figura 20. Exemplo de uma célula de medição. Tomado de Da Silva (2008).....	71
Figura 21. Ponte autobalanceada para a medição da admitância (permissividade complexa) de um fluido.....	72
Figura 22. Resposta de magnitude simplificada para o circuito de medição ponte autobalanceada.	73
Figura 23. Resposta de fase simplificada para o circuito de medição ponte autobalanceada.	75
Figura 24. Resposta em magnitude, teórica, da ponte autobalanceada para fluidos selecionados, $G_f = 5 \mu\text{S}$, $C_f = 10 \text{ pF}$	76
Figura 25. Resposta em fase, teórica, da ponte autobalanceada para fluidos selecionados, $G_f = 5 \mu\text{S}$, $C_f = 10 \text{ pF}$	76
Figura 26. Resposta em frequência, obtida por Da Silva (2008), para fluidos selecionados medidos com o circuito da ponte autobalanceada da Figura 21. $G_f=1 \mu\text{S}$ e $C_f=10 \text{ pF}$, Da Silva (2008).	77
Figura 27. a) Diagrama esquemático de um capacitor de placas paralelos por onde escoar um fluxo intermitente bifásico água-gás; b) circuito elétrico equivalente.	81
Figura 28. Efeito da fração de gás na permissividade relativa efetiva, para uma mistura ar-água, usando alguns dos modelos da Tabela 6. $\varepsilon_2 = \varepsilon_{ar} = 1$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_w = 80$. Tomado de Jaworek; Krupa (2010).	82
Figura 29. Deslocamento da fase, por Jaworek; Krupa (2010), entre o sinal medido a partir de um sensor capacitivo e sua referência. Experimento com uma mistura água-ar usando alguns dos modelos da Tabela 6.	84
Figura 30. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo Paralelo para qualquer frequência.	85
Figura 31. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo Series para uma frequência $f=1 \text{ MHz}$	86
Figura 32. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo Series para uma frequência $f=100 \text{ kHz}$	87
Figura 33. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo de Bruggeman para uma frequência $f=500 \text{ kHz}$	89
Figura 34. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo de Bruggeman para uma frequência $f=1 \text{ MHz}$	89
Figura 35. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo de Maxwell-Garnett Homogêneo para uma frequência $f=10 \text{ kHz}$. Em azul a dispersão o/W e em vermelho a dispersão w/O. Adicionalmente as superfícies cumprem as condições $\alpha_w \geq 0,2$ para o/W e $\alpha_o \geq 0,2$ para w/O.	92
Figura 36. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo de Maxwell-Garnett Homogeneo para uma frequência $f=1 \text{ MHz}$. Em azul a dispersão o/W e em vermelho a dispersão w/O. Adicionalmente as superfícies cumprem as condições $\alpha_w \geq 0,2$ para o/W e $\alpha_o \geq 0,2$ para w/O.	92
Figura 37. Esquema geral de um circuito para medida da condutividade ou permissividade usando <i>wire-mesh</i>	95
Figura 38. Sinais de excitação e resposta para a técnica condutiva.	97

Figura 39. Resposta em frequência simplificada para o circuito de medição da admitância usado na técnica capacitiva. Tomado de Da Silva (2008).	97
Figura 40. Sinais de excitação e resposta para a técnica capacitiva.	98
Figura 41. Coeficientes de ponderação $w(i, j)$ para medição de <i>holdup</i> na seção transversal.	100
Figura 42. Mudança da fase em função da fração de água e a fração de óleo para diferentes frequências.	105
Figura 43. Diagrama de blocos funcional de um demodulador IQ. Adaptado de Jong et al. (1997).	106
Figura 44. Mudança das parte real e imaginária do sinal de saída da ponte autobalanceada para $Gf = 1/100 \text{ k}\Omega$ e $Cf = 2 \text{ pF}$	108
Figura 45. Parte do diagrama de sinais de controle apresentado por Prasser et al. (1998) para a <i>wire-mesh</i> condutiva. Observe que a amostra do sinal é tomada em regime estacionário.	109
Figura 46. Simulação da resposta da tensão de saída de um circuito ponte autobalanceado para a) ar e b) óleo, usando uma <i>wire-mesh</i> típica. $kg = 0.016$, $\sigma_{ar} = 3 \times 10^{-15} \text{ Sm}^{-1}$, $\varepsilon_{ar} = 1$, $\sigma_{\text{óleo}} = 2 \times 10^{-13} \text{ Sm}^{-1}$, $\varepsilon_{\text{óleo}} = 2.3$, $Gf = 1/1 \text{ M}\Omega$ e $Cf = 10 \text{ pF}$. Observe que os valores de regime estacionário são baixos, ao redor de unidades de nV, o qual torna a discriminação impossível para um sistema de aquisição normal.	110
Figura 47. Esquema geral para a identificação de um sistema com um algoritmo recursivo.	111
Figura 48. Esquema do circuito experimental horizontal.	114
Figura 49. Compressor de ar Schulz 3030.	115
Figura 50. Inversores de Frequência.	116
Figura 51. Bombas helicoidais de alimentação de água e óleo, Rodriguez (2009).	116
Figura 52. Diagrama esquemático do separador de placas coalescentes, Rodriguez (2009).	117
Figura 53. Separador de água e óleo do tipo placas coalescentes.	118
Figura 54. Medidores de vazão de água. a) Alta vazão; b) Baixa vazão.	118
Figura 55. Medidores de vazão de óleo. a) Altas vazões; b) Baixas vazões.	118
Figura 56. Medidores de vazão de ar. a) GAL50 Oval; b) SVTG3/8" Contech; c) SVTG1" Contech; b) SVTG2.1/2" Contech.	119
Figura 57. Suportes dos tubos da seção de teste.	122
Figura 58. Misturador óleo-água-ar, Rodriguez (2009).	122
Figura 59. Tubulação de acrílico de 12m montada sobre a estrutura metálica inclinável.	122
Figura 60. Sensor do tipo <i>wire-mesh</i> (configuração 8x8), Rodriguez (2014).	123
Figura 61. Peças utilizadas para fabricação do flange.	124
Figura 62. Detalhes da montagem do flange, com caixa de visualização.	124
Figura 63. Sensor <i>wire-mesh</i> instalado na linha de teste de acrílico, Rodriguez (2014).	124
Figura 64. Fotografia do sistema WMT implementada na linha horizontal no NETeF.	125
Figura 65. Transdutor de pressão diferencial da marca Validyne, Rodriguez (2014).	125
Figura 66. Coluna de mercúrio.	126
Figura 67. Curva de calibração do transdutor de pressão diferencial (diafragma 38), Rodriguez (2009).	127
Figura 68. Esquema do arranjo de válvulas do transdutor de pressão diferencial, Rodriguez (2014).	128
Figura 69. Esquema do sistema <i>Bypass</i> , Rodriguez (2014).	129
Figura 70. Imagem do poço invertido vertical.	130

Figura 71. Dispositivo para geração de padrões instalado na linha vertical (seta inferior) e válvulas para seleção manual do injetor de ar (as tres setas em vermelho). ..	131
Figura 72. Sensor <i>homemade</i> do tipo <i>wire-mesh</i> usado na linha vertical (configuração 16×16).	132
Figura 73. Peças utilizadas para fabricação do flange.	132
Figura 74. Montagem do flange, com caixa de visualização e <i>wire-mesh</i> na linha vertical..	133
Figura 75. Montagem experimental na linha vertical. a) Vista geral e b) detalhe	133
Figura 76. Sensor <i>wire-mesh</i> de 5×5 simulado com software FEM. O raio dos fios é 0,05 mm, a separação entre os fios é de 2 mm e a separação entre os planos é de 1,5 mm.	138
Figura 77. Histograma da fração volumétrica de óleo α_o para a simulação de mistura água-óleo.	141
Figura 78. a) Frações de óleo α_o e Condutividade da mistura σ_x água-óleo para diferentes frequências e b) vista lateral (α_o em função de σ_x).	142
Figura 79. a) Frações de óleo α_o e Permissividade relativa da mistura ϵ_x água-óleo para diferentes frequências e b) vista lateral (α_o em função de ϵ_x).	142
Figura 80. Histograma de frações de água e de óleo.	143
Figura 81. Condutividade das misturas trifásicas simuladas, $f=950$ kHz.	144
Figura 82. Permissividade das misturas trifásicas simuladas, $f=950$ kHz.	144
Figura 83. Mistura de água-óleo sendo medidos com uma <i>wire-mesh</i> 1×4.	145
Figura 84. Resposta em frequência, a) Ganho e b) Fase para uma mistura água de torneira-álcool.	147
Figura 85. Condutividade da mistura água de torneira-álcool para diferentes frações de álcool, $f=204$ kHz. Medições da condutividade (*) e ajuste polinomial (linha).	148
Figura 86. Permissividade da mistura água de torneira-álcool para diferentes frações de álcool, $f=204$ kHz. Medições da permissividade (o), raiz quadrada da permissividade (*) e ajuste polinomial para as duas (linha).	148
Figura 87. Resposta em frequência, a) Ganho e b) Fase para uma mistura água deionizada-óleo mineral (WD-AH).	149
Figura 88. a) Condutividade e b) Permissividade da mistura água deionizada-óleo mineral para diferentes frações de água. A medição foi feita para $f=204$ kHz.	150
Figura 89. Resposta em frequência, a) Ganho e b) Fase para uma mistura água de torneira-óleo.	150
Figura 90. a) Condutividade e b) Permissividade da mistura água de torneira-óleo para diferentes frações de água, $f=1,03$ MHz.	151
Figura 91. Resposta em frequência, a) Ganho e b) Fase para uma mistura água de torneira-hexano.	152
Figura 92. Resposta em frequência, a) Ganho e b) Fase para uma mistura óleo-hexano.	152
Figura 93. Ganho (a, c, e e g) e Fase (b, d, f e h) para uma mistura água-óleo-hexano em diferentes frequências, $f=7$ kHz (a e b); 204 kHz (c e d); 1,03 MHz (e e f); 5,2 MHz (g e h).	155
Figura 94. Parte Real (a, c, e e g) e Imaginária (b, d, f e h) para uma mistura água-álcool-hexano em diferentes frequências, $f=7$ kHz (a e b); 204 kHz (c e d); 1,03 MHz (e e f); 5,2 MHz (g e h).	156
Figura 95. Permissividade (a, c, e e g) e Condutividade (b, d, f e h) para uma mistura água-óleo-hexano em diferentes frequências, $f=7$ kHz (a e b); 204 kHz (c e d); 1,03 MHz (e e f); 5,2 MHz (g e h).	157

Figura 96. Condutividade para uma mistura água-óleo-hexano para uma frequência de 20 MHz. Se aprecia o erro no cálculo ao obter valores negativos.	158
Figura 97. Placa de multiplexação e amplificadores para um sensor WMS capacitivo de 8×8 fios.	159
Figura 98. Esquema do sistema WMT capacitiva para um sensor WMS de 8×8 fios baseado nas placas PXI-5411 e PXI-6025.	159
Figura 99. Fotos do sistema WMT capacitiva para um sensor WMS de 8×8 fios, com diâmetro de 26mm.	159
Figura 100. Imagem da interface implementada em Labview. À direita, a imagem sem “calibração”, os dados de tensão elétrica obtidos da placa; à esquerda, a imagem “calibrada”, depois de fazer o ajuste entre os valores de referência VH e VL	160
Figura 101. Distribuição dos desvios padrões para 1000 amostras.	160
Figura 102. Resultados de visualização da permissividade e a fração de óleo, para um escoamento estratificado com modelo Serie, usando diferentes mapas de cor. Se pode observar na linha 8, coluna 6 uma falha no procedimento de calibração. a) e c) permissividade, b) e d) fração de óleo.	162
Figura 103. Resultados de visualização para um escoamento disperso de óleo em água. a) Permissividade e b), c) e d) Fração de óleo; com modelo b) Paralelo; c) Series; d) Maxwell-Garnett o/W. Pode-se observar a grande diferença entre os modelos usados.	163
Figura 104. Fração de óleo experimental WMS vs. QCV para diferentes modelos, Ver Tabela 6.	164
Figura 105: Seção de teste circuito multifásico DONAU da Shell Holanda.	165
Figura 106. a) Sensor <i>homemade</i> de 16×16 fios e b) sua instalação na linha de aço na seção de teste do circuito multifásico DONAU na Holanda.	165
Figura 107. a) Placa circuito multiplexador e b) Placa de amplificadores para um sensor WMS capacitivo de 16×16 fios, projetadas e construídas no NETeF.	165
Figura 108. Circuito de medição empregado para medição de água salgada.	166
Figura 109. Relação entre a fração local de óleo e a permissividade relativa complexa para diferentes modelos de permissividade. $\epsilon_o = 3 - j0$ e $\epsilon_w = 79 - j7.4059 \times 10^3$, a 41 °C, Rodriguez et al. (2015).	167
Figura 110. Distribuições cordais e da seção transversal da fração de óleo obtidas pelo sensor <i>wire-mesh</i> ; $j_w=1,9$ m/s, $j_o=0,8$ m/s para escoamento disperso, Rodriguez et al. (2015).	168
Figura 111. Distribuições da seção transversal da fração de óleo obtidas pelo sensor <i>wire-mesh</i> com $j_w=0,06$ m/s e diferentes velocidades superficiais de óleo, para escoamento estratificado, Rodriguez et al. (2015).	168
Figura 112. Comparação entre as frações volumétrica de óleo obtidas pelo densímetro de raios- γ e o WMS, Rodriguez et al. (2015).	168
Figura 113. Distribuições na seção transversal da fração de óleo obtidas pelo sensor <i>wire-mesh</i> com: a) $j_w=0.06$ m/s, $j_o=0.07$ m/s; b) $j_w=0.06$ m/s, $j_o=0.02$ m/s, para escoamento estratificado, Rodriguez et al. (2015).	169
Figura 114. Diagrama esquemático do tomógrafo <i>wire-mesh</i> de impedância implementado.	171
Figura 115. Placa do circuito multiplexador (Tx) e Placa de amplificadores de pontes autobalaneçadas (Rx) para um sensor WMS de impedância de 16×16 fios, projetadas e construídas no NETeF.	171
Figura 116. Tempo de estabelecimento do sinal de saída dos receptores, vermelha. Se mede em relação ao relógio de transmissão, azul.	173

Figura 117. Mapa de fluxo dos 14 experimentos realizados com escoamentos trifásicos em tubulação vertical.	174
Figura 118. Escala de cores usada para representar os fluidos e suas frações. Água pura: Azul; Óleo puro: Vermelho; Ar puro: Verde.	175
Figura 119. Imagens laterais e imagens da seção transversal durante o trânsito de uma bolha de Taylor em um escoamento trifásico; Experimento 6. Imagem obtida a 1000 quadros/s. O modelo Paralelo foi usado para obter as frações de fase.	176
Figura 120. Imagens da seção transversal obtidas para diferentes modelos de permissividade trifásicos a) Maxwell-Garnett; b) Bruggeman; c) Paralelo e d) Series. O quadro corresponde ao nariz de uma bolha de Taylor num escoamento trifásico; Experimento 6, instante B da Figura 119.	176
Figura 121. Imagens laterais de escoamentos Ig-Bo com $j_a = 0,8$ m/s e diferentes j_L . a) Experimento 11; b) Experimento 12; c) Experimento 13. Imagens obtidas para modelo Paralelo. A escala vertical temporal corresponde a 500 ms em todos os casos.	178
Figura 122. Detalhe das frações médias temporais na seção transversal para cada fase e sua somatória para os diferentes modelos de permissividade trifásicos. O tempo apresentado corresponde ao trânsito de uma bolha de Taylor do experimento 6, 0,15 s. a) Maxwell-Garnett; b) Bruggeman; c) Paralelo e d) Series. Água: Azul; Óleo: Vermelho; Ar: Verde; Somatória: Preto. As linhas tracejadas corresponde m aos valores médios.	179
Figura 123. Frações médias temporais na seção transversal para cada fase e sua somatória para os diferentes modelos de permissividade trifásicos. O tempo apresentado corresponde ao total do experimento 6, 5 s. a) Maxwell-Garnett; b) Bruggeman; c) Paralelo e d) Series. Água: Azul; Óleo: Vermelho; Ar: Verde; Somatória: Preto. As linhas tracejadas correspondem aos valores médios.	179
Figura 124. Frações cordais para o Experimento 6, a) considerando o transito de uma bolha e b) o experimento completo.	180
Figura 125. Frações cordais para os Experimentos 11, 12 e 13, para os primeiros 500 quadros.	181
Figura 126. <i>Holdup</i> de água medido pelas válvulas de fechamento rápido comparado com o valor medido pelo sensor <i>wire-mesh</i> , para os diferentes modelos de permissividade trifásicos.	182
Figura 127. <i>Holdup</i> de óleo medido pelas válvulas de fechamento rápido comparado com o valor medido pelo sensor <i>wire-mesh</i> , para os diferentes modelos de permissividade trifásicos.	182
Figura 128. <i>Holdup</i> de ar medido pelas válvulas de fechamento rápido comparado com o valor medido pelo sensor <i>wire-mesh</i> , para os diferentes modelos de permissividade trifásicos.	182
Figura 129. Bolhas de ar presas no sensor <i>wire-mesh</i> e passagem de uma bolha de óleo impactando as bolhas de ar.	184

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estudos experimentais sobre escoamento trifásico gás-óleo-água em tubulações.	42
Tabela 2. Medidores multifásicos usados na indústria e as técnicas utilizadas, segundo Babelli (2002) e Thorn et al. (2013).	46
Tabela 3. Comparação de algumas técnicas tomográficas para escoamentos multifásicos.	67
Tabela 4. Possíveis casos de ω_x em relação a ω_f e seu efeito na resposta de magnitude do circuito ponte autobalanceada.	74
Tabela 5. Características elétricas dos fluidos usados na simulação da ponte autobalanceada, $G_f = 5 \mu S$, $C_f = 10 pF$, $f_f = 79,57 kHz$	76
Tabela 6. Modelos de relação entre a fração da fase dispersa α_2 e a permissividade de uma mistura bifásica ϵ_x	80
Tabela 7. Comparação das técnicas de medida estudadas	112
Tabela 8. Faixas de medição dos medidores de vazão de água, óleo e ar.	120
Tabela 9. Faixas de velocidades superficiais dos medidores de vazão de água, óleo e ar, para as linhas horizontal e vertical.	120
Tabela 10 Escala de pressão para seleção de alguns diafragmas.	126
Tabela 11. Faixas de velocidades superficiais trabalhadas em escoamento vertical.	134
Tabela 12. Propriedades elétricas dos materiais usados nas simulações trifásicas.	139
Tabela 13. Admitância simulada para o sensor preenchido de água e cálculo de k_g	140
Tabela 14. Admitância simulada para o sensor preenchido de óleo e cálculo de k_g	141
Tabela 15. Características dos fluidos usados nos experimentos de misturas.	145
Tabela 16. Combinações de fluidos usadas nos experimentos de misturas.	146
Tabela 17. Frações volumétricas usadas no experimento de mistura trifásicos água-óleo-hexano (w: Água de torneira, o: Óleo mineral).	146
Tabela 18. Características do sistema WMT capacitivo implementado no NETeF	161
Tabela 19. Comparação das frações de água obtidas pelo sensor <i>wire-mesh</i> com predições de diferentes modelos de dois fluidos disponíveis na literatura, Rodriguez et al. (2015).	169
Tabela 20. Comparação dos níveis de altura da interface obtidos pelo sensor <i>wire-mesh</i> com predições de diferentes modelos de dois fluidos disponíveis na literatura, Rodriguez et al. (2015).	169
Tabela 21. Velocidades superficiais das fases para os experimentos trifásicos e as frações volumétricas obtidas pelas válvulas de fechamento rápido.	174
Tabela 22. Comparação entre o erro relativo médio para os diferentes modelos trifásicos, comparado com QCV.	181

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

Símbolo	Descrição
a	constante associada a calibração
A_T	área da seção transversal do tubo
A_g	área da seção transversal ocupada pelo gás (ar)
A_o	área da seção transversal ocupada pelo óleo
A_w	área da seção transversal ocupada pela água
A_P	área das placas
b	constante associada a calibração
B	susceptância
C	capacitância
d	comprimento
f	frequência ordinária
G	condutância
i	referente a posição / referente a corrente no tempo
I	corrente elétrica complexa
j	velocidade superficial
k_g	fator relacionado à geometria de um capacitor
N_i	número de amostras
Q	vazão volumétrica de injeção
q	quadro (imagem)
R	resistência
t	tempo
v	tensão elétrica no tempo
V	tensão elétrica
V	Volt (unidade de tensão elétrica)
Vol	volume
V	tensão elétrica complexa
x	posição
X	reatância
Y	admitância complexa

Z impedância complexa

Letras Gregas

Símbolo	Descrição
α	fração de uma fase
ϵ_0	permissividade do espaço livre
ϵ	permissividade relativa estática
ϵ	permissividade complexa
γ	relativo a raios-gama
μ	constante associada a calibração
σ	condutividade estática
θ	fase de um sinal elétrico
ϑ	constante associada a calibração
ω	frequência angular

Subscritos

Símbolo	Descrição
<i>a</i>	referente ao ar
<i>c</i>	referente a fase contínua
<i>d</i>	referente a fase dispersa
<i>e</i>	equivalente de uma mistura de fluidos
<i>f</i>	referente ao laço de realimentação de um circuito elétrico
<i>g</i>	referente ao gás
<i>H</i>	referente a uma substância de permissividade alta
<i>i</i>	referente a uma posição / tensão elétrica de entrada
<i>iso</i>	referente ao isopropanol
<i>j</i>	referente a uma posição
<i>k</i>	referente a um tempo discreto
<i>l</i>	referente a uma fase líquida
<i>L</i>	referente a uma substância de permissividade baixa

<i>log</i>	referente a uma tensão elétrica logarítmica
<i>o</i>	referente ao óleo / tensão elétrica de saída
<i>M</i>	referente a uma multiplicação de sinais
<i>m</i>	referente a mistura de fluidos
<i>QCV</i>	referente às válvulas de fechamento rápido
<i>T</i>	total
<i>t</i>	referente ao tempo
<i>w</i>	referente à água
<i>x</i>	referente a uma mistura de fluidos

LISTA DE SIGLAS

ADC	conversor análogo digital (<i>analog digital converter</i>)
ARE	erro relativo médio (<i>averaged relative error</i>)
CAN	<i>controller area network</i>
DEGRA	atenuação de raios- γ de duas energias (<i>dual energy gamma ray attenuation</i>)
ECT	tomografia de capacitância elétrica (<i>electrical capacitance tomography</i>)
EIT	tomografia de impedância elétrica (<i>electrical impedance tomography</i>)
EMT	tomografia eletromagnética (<i>electromagnetic tomography</i>)
ERT	tomografia de resistência elétrica (<i>electrical resistance tomography</i>)
FPGA	arranjo de portas programável em campo (<i>Field Programmable Gate Array</i>)
FS	fundo de escala
GBW	Produto ganho-largura de banda (<i>product gain by bandwidth</i>)
LPF	filtro passa baixas (<i>low pass filter</i>)
NETeF	Núcleo de engenharia térmica e fluidos
pdf	função densidade de probabilidade (<i>probability density function</i>)
QCV	válvulas de fechamento rápido (<i>quick closing valves</i>)
Rx	eletrodo receptor
TC	tomografia computarizada
Tx	eletrodo transmissor
TDMS	gestão de dados técnicos de fluxo contínuo (<i>technical data management streaming</i>)
VHDL	linguagem de descrição de hardware (<i>VHSIC Hardware Description Language</i>)
WMS	sensor <i>wire-mesh</i> (<i>wire-mesh sensor</i>)
WMT	tomografia por <i>wire-mesh</i> (<i>wire-mesh tomography</i>)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	29
CAPÍTULO 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
1.1 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO.....	31
1.1.1. Definições	33
1.1.2. Escoamento trifásico líquido-líquido-gás	35
1.1.3. Mapas de fluxo	44
1.2 MEDIÇÃO DAS FRAÇÕES DE FASE EM ESCOAMENTOS	45
1.2.1. Medição local	46
1.2.2. Medição transversal	49
1.2.3. Imagens tomográficas de escoamentos	56
1.2.4. Sensor do tipo <i>Wire-Mesh</i>	62
1.2.5. Comparação das técnicas	66
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	69
2.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE MISTURAS	69
2.1.1. Impedância e Admitância.....	69
2.1.2. Permissividade relativa complexa.....	70
2.1.3. Medição teórica da permissividade complexa	71
2.1.4. Calibração da permissividade complexa	77
2.1.5. Modelos de relação para escoamentos bifásicos	78
2.1.6. Modelos de relação para misturas trifásicas.....	84
2.2 SENSOR <i>WIRE-MESH</i>	94
2.2.1. Técnica condutiva	96
2.2.2. Técnica capacitiva	97
2.2.3. Medições derivadas médias no espaço e tempo	99
2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO COMPATÍVEIS COM A TECNOLOGIA <i>WIRE-MESH</i>	100
2.3.1. Medição de magnitude em duas frequências diferentes.....	101
2.3.2. Medição de magnitude e fase elétrica	102
2.3.3. Medição da parte real e imaginária	105
2.3.4. Identificação do sistema	108
2.3.5. Sumario das técnicas de medição compatíveis com a tecnologia <i>wire-mesh</i>	111
CAPÍTULO 3. CIRCUITO EXPERIMENTAL.....	113
3.1 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	115
3.1.1. Sistema de suprimento de ar	115
3.1.2. Sistema de suprimento de água e óleo	115
3.1.3. Separador de placas coalescentes	116
3.1.4. Medidores de vazão.....	117
3.2 MONTAGEM DA SEÇÃO DE TESTE HORIZONTAL	121
3.2.1. Sensor <i>wire-mesh</i> linha horizontal	123
3.2.2. Transdutor de pressão (linha horizontal).....	124

3.2.3.	Medição da fração volumétrica in situ de óleo através da técnica das válvulas de fechamento rápido	128
3.3	MONTAGEM DA SEÇÃO DE TESTE VERTICAL.....	129
3.3.1.	Sensor <i>wire-mesh</i> linha vertical.....	131
3.4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	134
CAPÍTULO 4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	137
4.1	SIMULAÇÕES COM ELEMENTOS FINITOS	137
4.1.1.	Simulação de mistura bifásica água-óleo	141
4.1.2.	Simulação de mistura trifásica óleo-água-ar.....	143
4.2	EXPERIMENTOS COM MISTURAS	144
4.2.1.	Mistura de Água de Torneira-Álcool.....	147
4.2.2.	Mistura de Água deionizada-Óleo mineral.....	149
4.2.3.	Mistura de Água de Torneira-Óleo Mineral.	150
4.2.4.	Mistura de Água de Torneira-Hexano.	151
4.2.5.	Mistura de Óleo-Hexano.....	151
4.2.6.	Mistura de Água de Torneira-Óleo Mineral-Hexano.	152
4.3	EXPERIMENTOS EM ESCOAMENTOS BIFASICOS.....	158
4.3.1.	Sistema de Aquisição Bifásico	158
4.3.2.	Validação qualitativa num escoamento estratificado ondulado.....	161
4.3.3.	Validação quantitativa em escoamento bifásico óleo-água num tubo de 1".....	161
4.3.4.	Estudo quantitativo em escoamento bifásico óleo-água num tubo de 3"...	164
4.4	EXPERIMENTOS EM ESCOAMENTOS TRIFASICOS	169
4.4.1.	Sistema de Aquisição Trifásico	170
4.4.2.	Escoamentos trifásicos em tubulação vertical	173
4.4.3.	Efeitos da intrusividade e viscosidade do óleo no escoamento	183
CONCLUSÕES.....	185	
APENDICE A. PUBLICAÇÕES SELECCIONADAS	189	
Publicação de artigos em revistas	189	
Publicação de artigos em congressos.....	189	
REFERÊNCIAS.....	191	

INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos estão presentes em diversos processos naturais e industriais, como exemplos: água fervente, fumaça, areia movediça, tempestades de areia, chuva, neblina, bolhas no refrigerante, torres de destilação e absorção, caldeiras, condensadores, torres de resfriamento, reatores químicos e nucleares, produção e transporte de petróleo e gás, entre outros.

Na produção de petróleo é comum o escoamento de misturas formadas por óleo, água, gás e outros componentes gerando variados padrões de escoamento. Mas, através da revisão da literatura, foi possível detectar as seguintes lacunas:

1. São escassos os dados experimentais disponíveis na literatura sobre escoamento trifásico óleo-água-ar e não há sequer uma caracterização de padrões de escoamento consolidada.
2. A técnica tomográfica baseada na sonda *wire-mesh* encontra-se em desenvolvimento, tendo sido aplicada quase que exclusivamente em sistemas gás-líquido. Além disso, a possibilidade de aplicação da *wire-mesh* em sistemas compostos de fluidos viscosos ainda é uma incógnita.

Como esses padrões precisam ser estudados para conhecer as características e possíveis aplicações e tendo em vista as lacunas detectadas na literatura, o objetivo primordial desta pesquisa é:

- Desenvolvimento de uma sonda *wire-mesh* de impedância calibrada para o estudo de escoamento trifásico óleo viscoso-água-ar.

Para alcançar o objetivo são destacadas as metas físicas deste projeto:

- a. Pesquisa bibliográfica sobre escoamento trifásico óleo viscoso-água-ar em tubulação vertical e sobre tomografia elétrica, com atenção especial devotada à sonda *wire-mesh*.
- b. Projeto, desenho e construção de sondas *wire-mesh* para tubulação de 2 e 3 polegadas, incluindo flanges em material transparente e sistema de visualização para filmagens de alta velocidade.

- c. Projeto, desenho e construção de circuito eletrônico para permitir a medição simultânea de condutividade e permissividade.
- d. Desenvolvimento e implementação de softwares para tratamento de sinais, visando à medição de fração volumétrica média no espaço e no tempo (*holdup*), fração de fase local média no tempo na seção transversal, frações de fase cordais médias no tempo e fração de fase local na seção transversal ao longo do tempo (imagem virtual).
- e. Caracterização subjetiva preliminar dos padrões de escoamento trifásicos e levantamento de cartas de fluxo trifásicas em uma tubulação vertical de 2 polegadas de diâmetro, baseados na observação de filmes obtidos via câmera filmadora digital de alta velocidade, nas instalações experimentais do NETeF.
- f. Aplicação da sonda *wire-mesh* para a caracterização objetiva dos padrões de escoamento trifásico.
- g. Redação de relatórios de produtividade e tese.

O trabalho foi organizado nos seguintes capítulos:

Capítulo 1: revisão bibliográfica dos trabalhos relacionados aos escoamentos líquido-líquido-gás e a instrumentação usada neles, com ênfase nos métodos de medição de escoamentos trifásicos e tomografia por meio do sensor tipo *wire-mesh*.

Capítulo 2: marco teórico referente a revisão das características elétricas de misturas trifásicas e técnicas de medição compatíveis com o sensor tipo *wire-mesh*.

Capítulo 3: descrição do trabalho experimental. Descrição do circuito experimental, montagem da linha de teste. Apresentação de equipamentos e instrumentação utilizados e metodologia experimental. Descrição dos testes experimentais realizados em tubulações.

Capítulo 4: apresentação dos resultados experimentais. Apresentação e análise de dados coletados em tubulações. Circuito proposto para medição da permissividade complexa num escoamento trifásico.

CAPÍTULO 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão discutidos neste capítulo tópicos sobre escoamentos multifásicos, incluindo definições básicas; em especial, os escoamentos trifásicos óleo-água-ar. Trata-se também do desenvolvimento de sensores para escoamentos trifásicos em tubulações, em especial as técnicas de tomografia e o funcionamento do sensor *wire-mesh*, considerando os trabalhos de maior importância para o desenvolvimento da pesquisa. Primeiramente, os termos básicos do escoamento trifásico líquido-líquido-gás serão definidos; logo em seguida, serão abordados tópicos relacionados principalmente ao estudo da medição das características elétricas de escoamentos.

1.1 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

Os escoamentos multifásicos consistem no escoamento simultâneo de diferentes estados de agregação de uma substância, como gás, líquido e sólido em um espaço determinado. Cada uma dos estados das substâncias recebe o nome de fase. A distribuição geométrica das fases pode adquirir diversas formas, o que é chamado de padrão de escoamento ou regime de escoamento. Os escoamentos multifásicos estão presentes em uma grande gama de aplicações da engenharia, entre elas podem-se citar as indústrias petrolífera, química, nuclear e geotérmica, e inclusive em outras menos esperadas como a eletrônica. Na indústria petrolífera os escoamentos bifásicos gás-óleo e óleo-água em tubulações tem recebido uma ampla atenção por parte dos pesquisadores. A melhoria na compreensão dos fenômenos que governam os escoamentos podem levar, entre outras coisas, a baixar os custos de produção de gasolina e derivados, evitar situações de catástrofes humanas e ambientais e aproveitar melhor as fontes não renováveis disponíveis.

Em geral, cada padrão é estudado separadamente, segundo as condições e variáveis relevantes de cada estudo. Para Falcone et al. (2009) as seguintes variáveis têm influência num escoamento bifásico numa tubulação:

- Propriedades, frações e velocidades das fases.
- Temperatura e pressão de operação.
- Diâmetro, forma, inclinação e rugosidade da tubulação.

- Presença de elementos na tubulação (por exemplo, cotovelos, registros, junções em T).
- Tipo de escoamento: estacionário, pseudo-estacionário ou transiente.

Essas variáveis influenciam o padrão de escoamento e, conseqüentemente, os modelos matemáticos utilizados para prever os fenômenos devem levá-las em consideração. Estes modelos geralmente são derivados das equações de transferência de massa, quantidade de movimento e energia, aplicadas a cada fase, incluindo condições de salto entre as fases. Quanto maior o número de fases, de condições e variáveis, maior é a complexidade desses modelos. Em muitos casos, os escoamentos são tão complexos a ponto de inviabilizar a derivação ou aplicação de um modelo matemático baseado numa única teoria. Assim, eles têm que ser complementados por relações empíricas, as relações de fechamento. Por outro lado, a compreensão dos fenômenos físicos relacionados a um determinado padrão de escoamento tem resultado em modelos específicos mais refinados. Por exemplo, Bannwart et al. (2012) tem avançado na modelagem do padrão anular óleo viscoso-água, onde um filme de água é utilizado como “lubrificante” para o escoamento de óleo viscoso, o que visa aumentar a produção de um poço de petróleo, Figura 1.

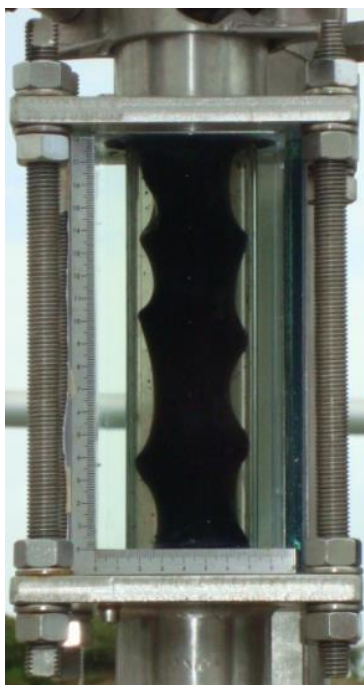


Figura 1. Escoamento bifásico de óleo viscoso e água em padrão anular num poço experimental da Petrobras. O filme de água tem um efeito “lubrificante” que ajuda a aumentar a produção de óleo, Bannwart et al. (2012).

1.1.1. Definições

Nesta seção se realiza uma breve descrição das variáveis, parâmetros e conceitos desenvolvidos ao longo do texto.

a. Fração volumétrica instantânea da fase.

É a razão entre o volume ocupado por uma fase, Vol_i , e o volume total, Vol_T , numa pequena seção no mesmo instante de tempo. É um dos principais parâmetros na investigação experimental de escoamentos multifásicos. Para um escoamento óleo-água-gás se pode escrever a fração de gás α_g como

$$\alpha_g = \frac{Vol_g}{Vol_T} \quad (1.1)$$

$$Vol_o + Vol_w + Vol_g = Vol_T \quad (1.2)$$

onde Vol_o e Vol_w são os volumes ocupados pelo óleo e a água, respetivamente.

Da mesma forma, é possível definir a frações de cada líquido óleo, α_o , e água, α_w , como

$$\alpha_o = \frac{Vol_o}{Vol_T} \quad (1.3)$$

$$\alpha_w = \frac{Vol_w}{Vol_T} \quad (1.4)$$

e a soma das frações deve ser igual à unidade

$$\alpha_o + \alpha_w + \alpha_g = 1 \quad (1.5)$$

b. Velocidade superficial e velocidade da mistura

A velocidade superficial é uma das variáveis mais usadas nas equações do escoamento multifásico. Esta é a vazão volumétrica da fase i , Q_i , dividida pela área da seção transversal da tubulação, A_T . Para o cálculo dessa variável para uma fase determinada, admite-se que só essa fase está escoando através da seção transversal total da tubulação.

$$j_g = \frac{Q_g}{A_T} \quad (1.6)$$

e de forma análoga

$$j_o = \frac{Q_o}{A_T} \quad \text{e} \quad j_w = \frac{Q_w}{A_T} \quad (1.7)$$

c. Velocidade superficial da mistura

A velocidade superficial da mistura é definida como a vazão volumétrica total Q_T dividida pela área da seção transversal da tubulação, ou, a soma das velocidades superficiais de cada fase

$$j = \frac{Q_T}{A_T} \quad (1.8)$$

$$j = j_o + j_w + j_g \quad (1.9)$$

d. Razão Gás-Óleo (GOR)

É definida como a razão entre a vazão volumétrica de gás e a vazão volumétrica do óleo. As duas vazões devem ser convertidas às mesmas condições de pressão e temperatura. É expressa em volume sobre volume, por exemplo m^3/m^3 .

$$GOR = \frac{Q_g}{Q_o} \quad (1.10)$$

e. Fração volumétrica de gás (GVF)

É a vazão volumétrica de gás relativa à vazão volumétrica multifásica total Q_T . As pressões e temperaturas devem ser convertidas às mesmas condições; podem ser padrão ou as de uma seção da tubulação.

$$GVF = \frac{Q_g}{Q_T} \quad (1.11)$$

f. Razão volumétrica de líquido ou Retenção de líquido (Liquid Hold-up)

Duas definições se podem achar na literatura. Na primeira, é a razão da área transversal ocupada pelas fases líquidas numa tubulação e a área da seção transversal, Dahl et al. (2005),

$$\bar{\alpha}_L = H_L = \frac{A_w + A_o}{A_T} \quad (1.12)$$

Mas é mais comum a definição relacionada com o volume. Deste modo, é a razão de volume de líquido numa seção de uma tubulação e o volume total da seção, no mesmo instante de tempo, Guo et al. (2005). Assim,

$$\bar{\alpha}_L = H_L = \frac{V_w + V_o}{V_T} \quad (1.13)$$

g. Corte de água (Water cut - WC)

É a vazão volumétrica de água relativa à vazão volumétrica dos líquidos (óleo e água), nas pressões e temperaturas padrão.

$$WC = \frac{Q_w}{Q_o + Q_w} \quad (1.14)$$

1.1.2. Escoamento trifásico líquido-líquido-gás

Os escoamentos trifásicos ocorrem frequentemente na indústria do petróleo, por exemplo, na produção de hidrocarbonetos *onshore* e *offshore*. Algumas das razões para que isso ocorra são expostas por Bannwart et al. (2009):

1. A água está comumente presente nos reservatórios e acompanha a produção de óleo e gás natural, a qual sobe naturalmente desde o reservatório;
2. A água é produzida devido à injeção de água ao reservatório no momento da produção;
3. A mudança das condições pressão, volume e temperatura na extração dos hidrocarbonetos pode causar que os fluidos passem de sua fase líquida à fase gasosa.

Assim, o conhecimento das características dos escoamentos de óleo-água-gás, tais como os padrões de escoamento, quedas de pressão e frações pode ter um impacto significativo na concepção, projeto, dimensionamento e operação das tubulações e prevenir, por exemplo, sua corrosão, falhas operacionais, produção deficitária e acidentes. Por isso, é necessário desenvolver modelos matemáticos para a predição do comportamento em diferentes condições.

No trabalho de Bannwart et al. (2004) se apresenta um dos estudos mais detalhados dos padrões de escoamento que podem ocorrer um escoamento trifásico numa tubulação horizontal. Os padrões observados em tubulação horizontal por aqueles autores estão ilustrados na Figura 2. A classificação dos padrões de escoamento trifásicos no tubo horizontal foi feita pela classificação dos escoamentos com relação à água, a fase contínua, como duplas da relação ar-água e óleo-água, para depois ser combinada numa classificação trifásica. Os nomes dados as duplas são nomeados analogamente a escoamentos bifásicos gás-líquido. Este estudo foi feito numa tubulação horizontal de vidro de 2,84 cm de diâmetro interno. Os autores usam a nomenclatura seguinte: B- Bolhas dispersas, A- anular, S- estratificadas e I- intermitentes. A descrição dos nove padrões de escoamento horizontal observados pelos autores é dada a seguir:

a) Bg-Bo: bolhas de gás – bolhas de óleo (Figura 2.a). Bolhas esféricas de óleo estão dispersas através da seção transversal do tubo. Essas bolhas seguem o perfil de velocidades da água (em velocidades altas perto do centro do tubo e em velocidades mais baixas perto das

paredes dos tubos). A fase gasosa é também constituída por bolhas, embora localizadas na parte superior da seção transversal da tubulação, isto devido à menor densidade do gás.

b) Bg-Ao: Gás em bolhas - Óleo anular (Figura 2.b). A fase de óleo é contínua e forma um corpo no centro do tubo com a água fluindo perto das paredes. O gás flui na mesma forma descrita no padrão anterior, mas também poderia aparecer entre as ondas interfaciais do óleo para baixas vazões de água.

c) Bg-Io: Gás em bolhas - Óleo intermitente (Figura 2.c). A fase de óleo apresentou-se como bolhas de tamanhos maiores que se fusionaram para formar bolhas alongadas, que escoam através da porção superior do tubo.

d) Bg-So: Gás em bolhas - Óleo estratificado (Figura 2.d). A fase de óleo é estratificada e contínua, embora neste caso o óleo escoar muito perto da parte superior, devido à segregação gravitacional. No entanto, a água forma uma fina película entre o óleo e a parede de topo. A fase gasosa se apresenta como bolhas entre a fase de óleo e a parede do topo.

e) Ig-Bo: Gás Intermitente - Óleo em bolhas (Figura 2.e). O gás apresenta-se como bolhas grandes que muitas vezes ocupam quase toda seção transversal, com exceção de uma pequena fração de líquido. Estas bolhas de gás alongadas causaram agitação forte nas fases líquidas, composta por uma fase de água contínua com bolhas de óleo dispersas.

f) Ig-Ao: Gás Intermitente - Óleo anular (Figura 2.f). A configuração dos líquidos neste padrão consistiu-se de uma fase de óleo contínua lubrificada por uma película de água ao redor, mesmo quando passa uma bolha de gás alongada.

g) Ig-Io: Gás Intermitente - Óleo intermitente (Figura 2.g). A fase líquida neste padrão estava composta de uma fase de água contínua, que se manteve em contato com a parede do tubo, e óleo em bolhas alongadas. Também se podia apresentar uma emulsão de pequenas gotículas de óleo na água.

h) Sg-Bo: Gás estratificado - Óleo em bolhas (Figura 2.h). A fase gasosa é contínua e estratificada na parte superior do tubo. A fase de óleo tem bolhas esféricas que escoam na parte superior de uma fase contínua de água, em alguns casos apresentou-se uma interface ondulada.

i) Sg-So: Gás estratificado - Óleo estratificado (Figura 2.i). Este padrão de escoamento exibiu uma segregação por gravidade de três fases contínuas e ocorreu para baixas vazões de água, óleo e gás. As fases líquidas apresentaram ondas interfaciais que não tocam a parede de topo.

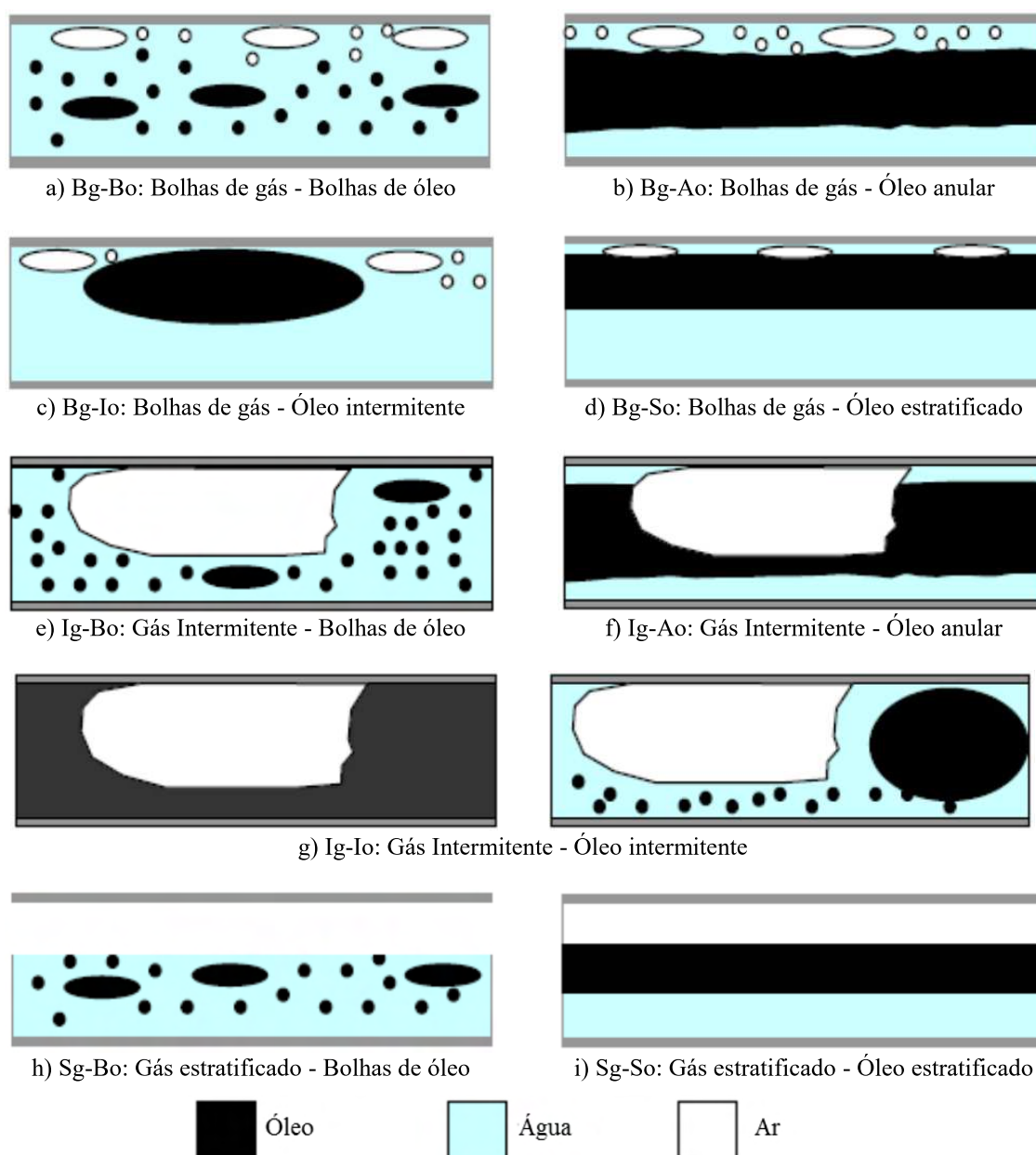


Figura 2. Padrões de escoamento trifásico em tubulação horizontal detalhados por Bannwart et al. (2004).

Este trabalho tem um complemento em tubo vertical com o artigo de Bannwart et al. (2005). Eles continuam usando a água como a fase contínua e os nomes são dados aos padrões tendo essa fase como referência. O trabalho visualiza seis tipos de escoamentos (Figura 3). Os escoamentos tratados são:

a) Bg-Ao: Gás em bolhas - Óleo anular (Figura 3.a) Este padrão é semelhante ao escoamento óleo-água anular, com exceção de que aqui as bolhas de gás são vistas na fase de água. A interface óleo-água é tipicamente ondulada.

b) Ig-Ao: Gás intermitente - Óleo anular (Figura 3.b) A fase de gás forma bolhas de grandes dimensões que rodeiam parcialmente um núcleo oleoso ainda contínuo.

c) Bg-Io: Gás em bolhas - Óleo intermitente (Figura 3.c) O gás forma pequenas bolhas e o óleo forma bolhas de grandes dimensões.

d) Bg-Bo: Gás em bolhas - Óleo em bolhas (Figura 3.d) Este padrão foi observado para gás e óleo com baixas velocidades, mas a água com velocidade suficientemente alta para manter o óleo separado em pequenas bolhas.

e) Ig-Io: Gás intermitente - Óleo intermitente (Figura 3.e) Para o gás e o óleo se formam grandes bolhas que estão muito próximas uns das outras. Uma observação detalhada mostra que a bolha de óleo é sugada pela esteira deixada pela bolha de gás.

f) Ig-Bo: Gás intermitente - Óleo em bolhas (Figura 3.f) O gás forma bolhas grandes, de alta velocidade e o óleo é disperso em pequenas bolhas. Este padrão é tipicamente pulsante, indicando uma transição para o escoamento anular gás-líquido.

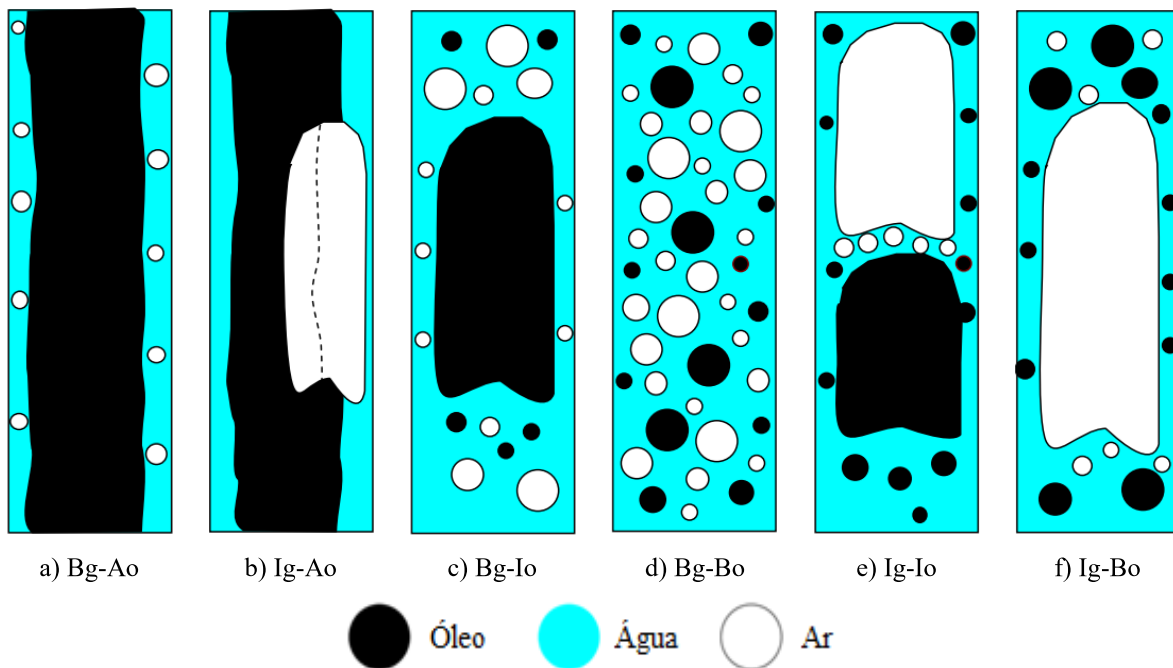


Figura 3. Padrões de escoamento trifásico em tubulação vertical abordados no trabalho de Bannwart et al. (2005).

Destaca-se que quando os trabalhos de escoamentos trifásicos ilustram os padrões de escoamento geralmente mostram desenhos esquemáticos laterais da distribuição das fases. Os desenhos se obtêm da observação direta ou de imagens feitas através de câmeras de alta velocidade. A Figura 4a apresenta um desenho obtido a partir de uma imagem, para um escoamento em golfadas na horizontal, Huang et al. (2013). O desenho complementa a imagem apresentando um corte longitudinal da tubulação e a distribuição das fases líquidas no interior da tubulação, que não pode ser obtida da imagem. Também, são um exemplo dos desenhos obtidos a Figura 2 e a Figura 3. Somente um pequeno número de estudos apresentam a

distribuição na seção transversal, entre eles, Gawas (2013) apresenta desenhos esquemáticos da distribuição que devem ter as fases na seção transversal da tubulação, Figura 4b. Esses desenhos permitem fazer uma classificação padronizada dos diferentes escoamentos, mas os desenhos são uma estimativa dos autores e estão longe de ser uma caracterização objetiva da distribuição das fases e da fração delas.

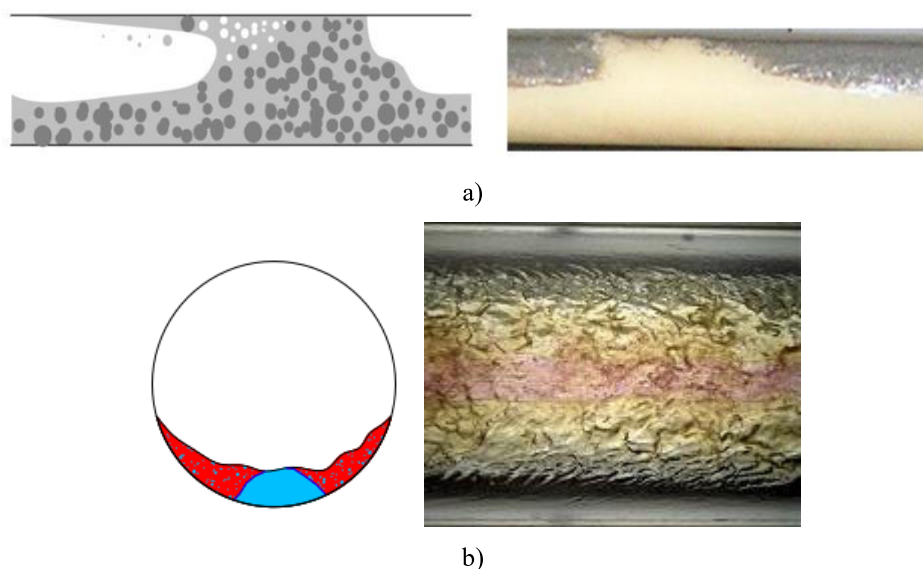


Figura 4. a) Desenho esquemático e imagem original obtida por câmera (vista lateral) de um escoamento trifásico em golfadas em tubulação horizontal, Huang et al. (2013). b) Desenho esquemático da distribuição na seção transversal de um escoamento estratificado trifásico e imagem obtida por câmera (vista de abaixo), Gawas (2013).

Vários trabalhos sobre escoamentos trifásicos já foram feitos por diversos autores. Há trabalhos experimentais como o apresentado por Shean (1976), com tabelas detalhadas da queda de pressão e fração das fases para tubo vertical. Num trabalho de referência na área, Açıkgöz et al. (1992) apresenta dez padrões de escoamento em tubo horizontal com referência à água e ao óleo e apresenta mapas de fluxo. Li et al. (2007) mediu a fração volumétrica das fases em tubo horizontal através de raios- γ . Mais recentemente, Bannwart et al. (2009) mostram diferentes padrões para tubos na vertical e inclinado, em três tubos de diâmetros diferentes. Eles prestam atenção especial à queda de pressão trifásica comparada com a queda monofásica de óleo e com a queda bifásica óleo-gás. Gawas (2013) estuda o arrasto de gotículas de água e óleo na fase gasosa numa tubulação de 6". Este trabalho também contém uma boa revisão dos estudos sobre escoamentos trifásicos mais relevantes. A Tabela 1 apresenta vários dos trabalhos experimentais sobre escoamentos trifásicos óleo-água-ar em tubulações. Nessa tabela se apresentam os fluidos usados e suas características. Também as velocidades superficiais usadas nos experimentos e as características do tubo e o experimento.

Como se pode observar na Tabela 1, a maioria dos trabalhos estudam principalmente a queda de pressão. Esta é geralmente comparada com a queda de pressão monofásica de óleo ou com a queda de pressão bifásica óleo-gás, Bannwart et al. (2009) e Wang et al. (2013). Neste último, as quedas de pressão trifásicas são comparadas com quedas de pressão de escoamentos bifásicos que tenham padrões semelhantes. Outra quantidade significativa dos trabalhos estudam os padrões de escoamento e sua identificação por mapas. Aqui se deve ressaltar que as técnicas de visualização dos padrões estão geralmente baseadas em observações laterais da tubulação, fazendo uso de câmeras de alta velocidade. Esta técnica requer que os fluidos tenham algum grau de transparência para poder visualizar corretamente os fluidos no interior. Também influi a característica oleofílica da tubulação, o que pode manter um filme ou volume de óleo aderido à parede do tubo, atrapalhando a visualização. Assim, em muitos casos, a visualização que se tem não é a melhor dependendo das características do experimento. É de destacar que as figuras que apresentam a distribuição das fases na seção transversal são desenhos dos autores. A aplicação de uma técnica de tomografia é importante para obter essas distribuições. Outros poucos trabalhos têm analisado as frações volumétricas das fases, Shean (1976) e Xu et al. (2012). Nesses casos os autores usaram válvulas de fechamento rápido.

Quanto à modelagem matemática, encontram-se trabalhos variados em escoamento trifásico. Ghorai et al. (2005) desenvolveram um modelo para prever as frações volumétricas e quedas de pressão na horizontal e escoamento estratificado. Também estudam o critério de estabilidade desenvolvido por Taitel et al. (1995). Zhang e Sarica (2005) apresentam um modelo unificado para a predição do comportamento do escoamento trifásico. Eles tratam o escoamento como se fosse bifásico gás-líquido, com as duas fases líquidas misturadas ou como um escoamento estratificado trifásico em baixas vazões. Os autores consideram tubulações na horizontal e ligeiramente inclinadas. No primeiro caso, assume-se um pequeno deslizamento entre as fases líquidas. Ao comparar com os resultados experimentais, obtém-se melhoras frente à aplicação de outros modelos. No trabalho de Khor et al. (1997) os autores desenvolvem um modelo unidimensional para as frações volumétricas em escoamentos estratificados trifásicos. Os autores usam dados experimentais e diferentes definições de diâmetro equivalente para testar o modelo. Eles concluem que o modelo é sensível aos valores das tensões interfaciais entre os fluidos e entre os fluidos e a estrutura. Também destacam a não existência de informação sobre fatores de arrasto entre os fluidos, o que consideram relevante neste tipo de escoamento. Er (2010) desenvolveu um modelo mecanicista para a predição da fronteira entre padrão estratificado separado e estratificado com a fase líquida dispersa. Também se tem trabalhos de simulação numérica. No caso de Bonizzi e Issa (2003), os autores usam volumes finitos para

simular escoamento estratificado e pistonado. Recentemente, Liu et al. (2014) introduzem um modelo que propõe um novo método para o cálculo do gradiente de pressão por fricção. Neste trabalho os autores realizam uma comparação com dados experimentais e mostram como o novo modelo prevê melhor as quedas de pressão usando óleo pesado.

Estes trabalhos mostram como o arranjo geométrico das fases pode ser complexo e também o aumento da complexidade matemática para os possíveis padrões de escoamento trifásicos, quando são comparados com escoamentos bifásicos. É preciso estudar cada padrão e estes estudos começam tipicamente pela medição de variáveis como a fração de cada fase, a queda de pressão, as velocidades superficiais das fases, entre outras. Em cada estudo se usam diferentes técnicas de medição, por exemplo: densímetros de raios- γ , medidores de impedância, sensores ultrassônicos, transdutores de pressão, medidores de vazão, junto com técnicas de visualização de imagens do escoamento. Requerem-se vários equipamentos para medir as características que apresenta cada padrão de escoamento, os regimes de transição e possíveis aplicações. Assim, as técnicas de medição destas características são discutidas na seção 1.2.

Tabela 1. Estudos experimentais sobre escoamento trifásico gás-óleo-água em tubulações.

Referência	Análises	Fluidos	Densidade (kg ³ /m ³)	Viscosidade (Pa s)	Matriz de testes (Velocidades superficiais, j , em m/s)	Características da Tubulação (Diâmetro – Comprimento – Material – Inclinação)
Shean (1976)	Padrões de escoamento Frações volumétricas Queda de pressão	Óleo mineral (Nujol) Água Ar	889,02 999,55 1,2	0,71 0,00071 0,0000018	$j_o = 0,321 - 0,859$ $j_w = 0,165 - 0,442$ $j_g = 0,511 - 5,811$	19,05 mm – 7,16 m – Cobre e Acrílico – Vertical
Açikgöz et al. (1992)	Padrões de escoamento e transições	Óleo mineral Água Ar	864	0,1164	$j_o = 0,043; 0,09; 0,24$ $j_w = 0,004 - 0,66$ $j_g = 0,15 - 50$	19 mm – 4,75 m – Acrílico – Horizontal
Spedding et al. (2002)	Frações de escoamento Queda de pressão	Óleo (Finavestan A 50 B) Água Ar	832,5	0,0203275	$j_o < 0,188$ $j_w < 0,282$ $j_g < 37,669$	26 mm – 1,08 m – Acrílico – Vertical e perto da vertical
Oddie et al. (2003)	Experimentos transientes e em estado estável Frações volumétricas	Querosene Água Nitrogênio			$j_o = 0,031; 0,157; 0,628$ $j_w = 0,031; 0,157; 0,628$ $j_g = 0,078; 0,157; 0,785$	152 mm – 11 m – Acrílico – Vertical (0°) a 92°
Bannwart et al. (2004, 2009)	Queda de pressão	Óleo bruto Água Ar	970	3,4	$j_o = 0,01 - 2,50$ $j_w = 0,04 - 0,50$ $j_g = 0,03 - 10,00$	28,4 mm – 5,43 m – Vidro – Horizontal 28,4 mm – 2,5 m – Vidro – Vertical 10 mm – 1 m – Vidro – 15°
		Óleo bruto viscoso Água Gás natural	972,1	36,95	$j_o = 0,16$ $j_w = 0,05; 0,08$ GOR = 15 m ³ /m ³	77 mm – 274m – Aço
Spedding et al. (2005)	Predições dos padrões	Óleo Água Ar	828,5	0,0122		25,9 mm – 7,7 m – Acrílico – Horizontal
		Óleo Água Ar	854,2	0,0395		50,1 mm – 4,52 m – Acrílico – Horizontal
Bannwart et al. (2005)	Queda de pressão	Óleo bruto morto Água Ar	971	0,00504	$j_o = 0,02 - 1,2$ $j_w = 0,04 - 0,5$ $j_g = 0,04 - 9$	28,4 mm – 2,5 m – Vidro – Vertical
Wegmann et al. (2007)	Padrões de escoamento em estado estável	Óleo de parafina Água deionizada Ar	818,5 997,8 1,125	0,00472 0,000975 0,0000177	$j_o = 0,1 - 1,0$ $j_w = 0,1 - 2,0$ $j_g = 0,2 - 6,77$	5,6 mm – 5 m – Vidro (Schott Duran) – Horizontal
					$j_o = 0,1 - 1,0$ $j_w = 0,04 - 1,3$ $j_g = 0,2 - 4,33$	7 mm – 5 m – Vidro (Schott Duran) – Horizontal

Tabela 1. (Continuação) Estudos experimentais em escoamentos trifásicos gás-óleo-água.

Referencia	Análises	Fluidos	Densidade (kg ³ /m ³)	Viscosidade (Pa s)	Matriz de testes (Velocidades superficiais, j , em m/s)	Características da Tubulação (Diâmetro – Comprimento – Material – Inclinação)
Poesio et al. (2009)	Queda de pressão Velocidade das bolhas	Óleo viscoso Água Ar	886	1,2	$j_o = 0,03 - 0,7$ $j_w = 0,1 - 2,6$ $j_g = 0,29$	21 mm – 10 m – Vidro – Horizontal
		Óleo viscoso Água Ar		0,9	$j_o = 0,46 - 1,08$ $j_w = 0,04 - 0,67$ $j_g = 0,06 - 4$	28 e 40 mm – 10 m – Vidro – Horizontal
Xu et al. (2012)	Queda de pressão Fração volumétrica do gás	Óleo mineral Água Air	860.0	0,044	$j_o = 0 - 0,90$ $j_w = 0 - 0,885$ $j_g = 0 - 0,85$	50 mm – 3 m – Acrílico – Vertical
Poesio et al. (2012)	Queda de pressão	Óleo pesado Água Ar	890 1000	0,9 0,001026	$j_o = 0,13 - 0,52$ $j_w = 0,04 - 0,85$ $j_g = 0,25 - 4$	50 mm – 11 m – Acrílico – Horizontal
Gawas (2013)	Dispersão das fases líquidas na gasosa	Isopar L Água Ar	760 998 1,2	0,00135 0,001 0,000018	$j_o + j_w = 0,005 - 2,5$ WC = 0 – 1 $j_g = 10 - 23$	152,4 mm – 112 m – Aço e Acrílico – 2°, 0°, 2° da Horizontal
Huang et al. (2013)	Identificação de padrões	Óleo emulsificado (10% de água) Água Ar	883.3 998 1.29	0,1405 0,001 0,000018	$j_o = 0,01 - 2$ $j_w = 0,01 - 2$ $j_g = 0,01 - 15$	40 mm – 10 m – Resina – 2°, 5°, 15° e 30° da Horizontal
Wang et al. (2013)	Queda de pressão Mapas de fluxo e predição de padrões	Óleo mineral pesado (Lubsoil ND-50) Água filtrada Gas natural (2,59Mpa)	884.4	0,15 – 0,57	$j_o = 0,1 - 1$ $j_w = 0,1 - 1$ $j_g = 1 - 5$	52,5 mm – 18 m – Aço inoxidável – Vertical e Horizontal
Al-Hadhrani et al. (2014)	Queda de pressão Mapas de fluxo	Óleo de baixa viscosidade (SafraSol D80) Água Ar			$j_o + j_w = 0,2 - 3,0$ WC = 0,1 – 0,9 $j_g = 0,2 - 52,5$	22,5 mm – 8,3m – Acrílico – Horizontal
Liu et al. (2014)	Queda de pressão Mapas de fluxo	Óleo pesado Água Ar		1,046; 6,88	$j_o + j_w = 0,03 - 0,8$ WC = 0,1 – 0,9 $j_g = 0,1 - 30$	50 mm – 18,5 m – Aço – Vertical

1.1.3. Mapas de fluxo

Os autores usam os mapas de fluxo para identificar ou classificar os padrões de escoamento. Estes são obtidos a partir de dados experimentais, determinando-se os padrões de escoamento em função das velocidades superficiais das fases, fração das fases, vazões volumétricas e outras propriedades dos fluidos. Os mapas de fluxos podem mostrar os limites de transição entre os padrões de escoamento. Por exemplo, o modelo de Taitel; Dukler (1976) permite gerar mapas de fluxo para escoamento bifásico gás-líquido, sendo as coordenadas do mapa os fluxos das fases, com a consideração das propriedades dos fluidos, como densidade e tensão superficial, e geometria da tubulação. Exemplos de mapas em escoamento trifásico estão mostrados na Figura 5.

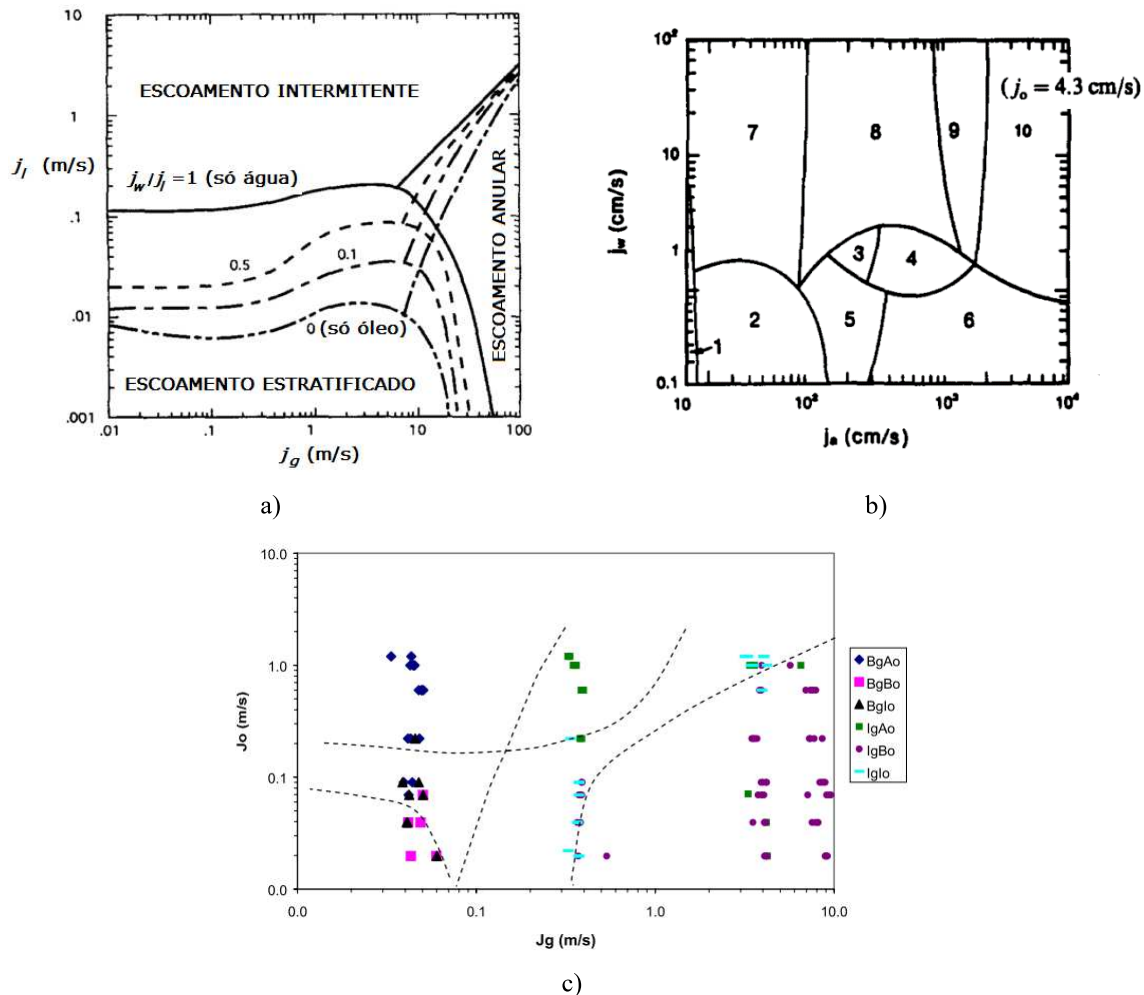


Figura 5. Exemplos de mapas de fluxo trifásico usados por a) Taitel et al. (1995) em escoamento horizontal; b) Açıkgöz et al. (1992) em escoamento horizontal; c) Bannwart et al. (2005) em escoamento vertical, $0,04 < j_w < 0,5 \text{ m/s}$.

Em muitos casos práticos precisa-se da identificação do padrão de escoamento. Por exemplo, as tubulações que conectam reservatórios de petróleo às plataformas de produção podem apresentar o padrão intermitente pistonado. Este padrão é indesejável no poço, pois pode gerar mudanças de pressão extremas e repentinas, o que pode arruinar diferentes equipamentos como separadores, bombas ou registros. Assim, uma correta identificação permite que operadores evitem padrões indesejáveis ou perigosos.

1.2 MEDIÇÃO DAS FRAÇÕES DE FASE EM ESCOAMENTOS

Os artigos de Babelli (2002) e Thorn et al. (2013) trazem uma excelente revisão dos medidores usados na indústria. Em geral, os medidores usam uma abordagem similar à apresentada na Figura 6 para determinar as variáveis do escoamento. Esta abordagem começa pela medição das frações das fases, e a partir dessas variáveis se podem inferir outros parâmetros relevantes. Estes artigos apresentam diversas técnicas para a medição das variáveis em poços, entre as quais estão densímetros gama, sondas de impedância elétrica, medidores de frações por micro-ondas, medidores de fluxo de massa por Coriolis, medidores de fluxo por vórtice, venturi, medidores de pressão e medidores de deslocamento positivo. Na Tabela 2 se apresenta um resumo dos fabricantes de medidores multifásicos usados na indústria e as técnicas usadas por cada um. Algumas das técnicas indicadas serão descritas nas seções seguintes. Vale ressaltar que nessa tabela nenhuma técnica é usada isoladamente. Além disso, nesse tipo de equipamento só se tem as características mais relevantes do escoamento como vazões e frações de cada fase, mas não se tem a distribuição geométrica das fases dentro da tubulação, isto é, não se tem uma identificação direta do padrão, o qual precisa ser deduzido a partir dessas características. Em geral isto se faz com os mapas de fluxo. Assim, deve-se ter mapas à disposição que se ajustem as condições do escoamento para fazer uma identificação correta.

Em soma, uma das variáveis mais importantes é a fração de fase. Essa medição pode ser feita de muitas formas diferentes e utilizando-se diferentes propriedades físicas, como se apresenta na Tabela 2. Assim, os equipamentos de medição são desenhados para serem sensíveis a alguma propriedade física que deve ser diferente para cada fase. A seguir apresentam-se as técnicas de medição locais, da seção transversal e tomográficas, destacando a sua aplicação em escoamentos trifásicos. Apresentam-se os conceitos básicos dos sistemas e técnicas de medição, mas a técnica de medição elétrica vai ser estudada mais profundamente na seção 2.1.

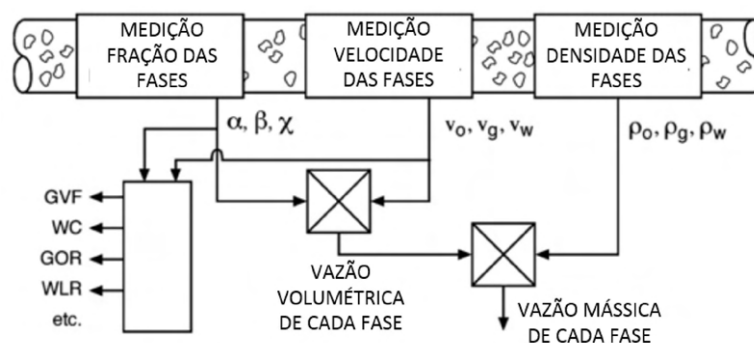


Figura 6. Abordagem ao problema de medição em escoamentos trifásicos, Thorn et al. (2013).

Tabela 2. Medidores multifásicos usados na indústria e as técnicas utilizadas, segundo Babelli (2002) e Thorn et al. (2013).

Fabricante	Medida da vazão total	Medida da fração dos fluidos
AGAR	Medidor de deslocamento positivo, Coriolis	Venturi, Microondas
Aker	Correlação cruzada	Densímetro gama dual
Framo	Venturi	Densímetro gama dual
Jiskoot	Queda de pressão	Densímetro gama dual
Kongsberg	Correlação cruzada	Mapeamento da seção transversal, Constante dielétrica
Neftemer	Análises de sinais	Densímetro gama de múltiplas energias
Pietro	Correlação cruzada, Venturi	Impedância, Densímetro gama
Roxar / Fluenta / MFI	Correlação cruzada, Venturi	Densímetro gama, Microondas
Schlumberger	Venturi	Densímetro gama dual
Scrollflow	Medidor de cavidade progressiva	Densímetro, Amostra
Texaco	Medidores de massa, Densímetro	Separador, Micro-ondas
Wellcomp	Coriolis	Análises de amostra, Capacitância

1.2.1. Medição local

Um tipo de sensor tipicamente usado para medir a fração de fase local são as sondas de agulha. Uma sonda em forma de agulha em miniatura é inserida no escoamento e determina a fase presente na ponta da agulha. Numa técnica classicamente usada com sondas de agulha, a fração de fase pode ser descrita matematicamente pela introdução de uma função indicadora da fase P_i , que é uma função binária e representa a presença ou ausência da i -ésima fase numa posição dada $\mathbf{x}$ e no tempo t (DA SILVA, 2008), daí

$$P_i(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} 1 & \text{se } \mathbf{x} \in \text{à fase } i \\ 0 & \text{se } \mathbf{x} \notin \text{à fase } i \end{cases} \quad (1.15)$$

Se a média da função indicadora da fase é tomada sobre diferentes domínios, espacial ou temporal, pode-se obter diferentes definições para a fração de fase, por exemplo, local,

radial, transversal e volumétrica. Por exemplo, para um escoamento gás-líquido, a partir da medida da presença de gás P_g (Eq. (1.15)), a fração de fase gasosa local média-no-tempo, em um ponto dado $\mathbf{x}$, é definida como

$$\alpha_g(\mathbf{x}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T P_g(\mathbf{x}, t) dt \quad (1.16)$$

Assim, para um tempo de medição suficientemente longo T , a equação (1.16) pode ser aproximada por

$$\alpha_g(\mathbf{x}) = \frac{T_g}{T} = \frac{T_g}{T_g + T_l} \quad (1.17)$$

onde T_g e T_l denotam o tempo acumulado da presença das fases gasosa e líquida dentro do intervalo de tempo T . Quando se move a sonda para posições diferentes é possível obter a distribuição da fração da fase numa corda, área ou volume.

Existem diferentes tipos de sondas de agulha, mas as duas técnicas mais utilizadas são as óticas (DESCAMPS et al., 2007) e as de impedância elétrica (SANAULLAH et al., 2001). A Figura 7 apresenta um exemplo de uma sonda de agulha resistiva ou condutiva e a função indicadora da fase P_l obtida pela sonda. As sondas elétricas funcionam basicamente como um interruptor para uma corrente direta ou alternada, mas têm evoluído com técnicas mais complexas, Ishii e Kim (2001). Quando a fase na ponta da sonda é condutora, uma corrente flui a partir do eletrodo de excitação interno para o eletrodo aterrado externo. Se a fase na sonda de ponta é não condutora o circuito está aberto e não há circulação de corrente. Como se pode observar na Figura 6, apesar de que o sinal teoricamente deveria ser binário, não é isso que se verifica na prática. Isto pode dever-se ao tamanho finito da ponta da agulha, o tempo de resposta da sonda, deformação da interface entre as fases, entre outros. Assim, o sinal é binarizado por meio de um limiar adequado (DA SILVA, 2008).

Este tipo de técnica tem sido usada em escoamentos trifásicos. Fordham et al. (1999) desenvolveram uma sonda ótica, baseada no índice de refração do fluido, que pode discriminar entre três fases (água-querosene-ar). A sonda tem duas pontas de fibra ótica, cada uma com uma geometria diferente. Geometrias diferentes permite que uma ponta diferencie os líquidos do ar e a outra sonda fica a cargo de diferenciar o querosene. Assim, com a combinação dos dois sinais binários de cada ponta, se pode conhecer o fluido que se está medindo. Os resultados qualitativos são bons, mas os autores esperam aprimorar os resultados quantitativos.

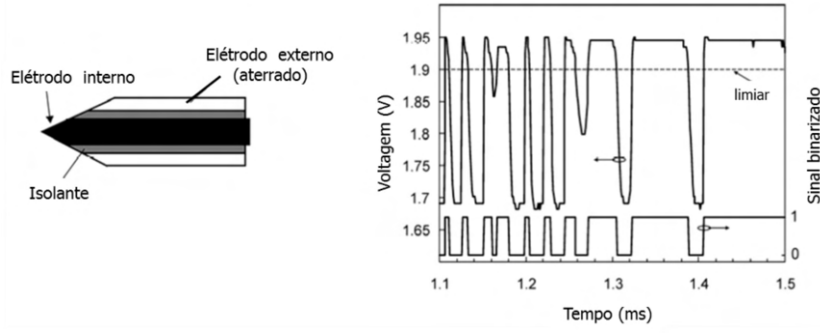


Figura 7. Exemplo de uma sonda de agulha e o sinal obtido, Da Silva (2008).

Outra sonda de agulha, com outro princípio de medição, é usada por Da Silva et al. (2007a). Nesse caso, a propriedade elétrica medida é a permissividade ou capacitância média do fluido no local. A Figura 8 apresenta o conceito da sonda de agulha desenvolvida e sua aplicação num experimento bifásico isopropanol-água. A diferença da técnica anterior, que obtém a fração de uma fase pela média temporal, é que esta técnica pode obter a fração quase instantaneamente. Isto é possível porque a sonda mede a permissividade equivalente da mistura ε_e que existe entre os dois eletrodos. Conhecendo-se o valor das permissividades dos fluidos e a equivalente da mistura, é possível associar diretamente o último com a fração das fases através de uma relação. Para o caso particular desse experimento, os autores acharam que a relação de Birhack descreve bem a relação de permissividade da mistura,

$$\sqrt{\varepsilon_e} = \alpha_{iso} \sqrt{\varepsilon_{iso}} + (1 - \alpha_{iso}) \sqrt{\varepsilon_w} \quad (1.18)$$

onde α_{iso} é a fração de isopropanol, ε_{iso} e ε_w são as permissividades do isopropanol e da água, respectivamente, e que se mantém constantes.

Portanto, a função indicadora da fase já não é uma função binária e passa a ser uma função contínua, que pode ser relacionada com a fração da fase em cada instante de tempo. Para esse caso particular a função indicadora de fase é ε_e , sendo seus limites ε_{iso} e ε_w ,

$$\varepsilon_{iso} \leq \varepsilon_e(\mathbf{x}, t) \leq \varepsilon_w, \quad (1.19)$$

e pode ser relacionada com a fração de isopropanol com a relação

$$\alpha_{iso}(\mathbf{x}, t) = \frac{\sqrt{\varepsilon_e(\mathbf{x}, t)} - \sqrt{\varepsilon_w}}{\sqrt{\varepsilon_{iso}} - \sqrt{\varepsilon_w}}. \quad (1.20)$$

Desse modo, a fração de isopropanol local média-no-tempo, em um ponto dado $\mathbf{x}$ e dentro de um intervalo de tempo suficientemente longo, é definida como a média das N medições feitas

$$\alpha_{iso}(\mathbf{x}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \alpha_{iso}(\mathbf{x}, k). \quad (1.21)$$

Na seção 2.1.5 se discutirá com mais profundidade esse tipo de relação entre a fração de fase e propriedades elétricas.

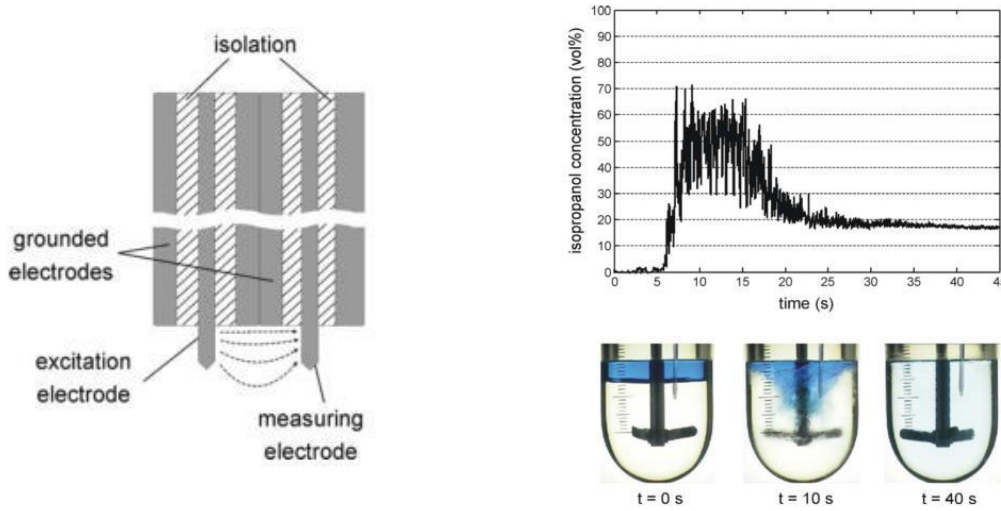


Figura 8. Diagrama da sonda de agulha capacitiva desenvolvida por Da Silva et al. (2007a) e o sinal obtido num experimento bifásico isopropanol-água.

1.2.2. Medição transversal

A fração de fase transversal média $\hat{\alpha}_i$ pode ser definida a partir da função indicadora da fase (1.15) sobre a área da secção transversal A_T de um tubo num tempo dado

$$\hat{\alpha}_i(t) = \frac{1}{A} \int_A P_i(\mathbf{x}, t) dA = \frac{A_i}{A_T} \quad (1.22)$$

onde A_i é a área transversal ocupada pela i -ésima fase. Na realidade, muitos sensores não medem as propriedades num plano e realmente se tem medições de frações volumétricas; mas se pode considerar como medições de área se a fatia da medição da seção transversal é relativamente pequena. Duas técnicas predominam neste tipo de medição, as técnicas de atenuação de radiação e as de impedância elétrica. Os sensores baseados na atenuação de radiação podem ser considerados como medidores de fração de fase de seção transversal, enquanto as técnicas de impedância elétrica medem frações de fase volumétricas.

a. Radiação Ionizante

As técnicas radioativas medem a atenuação de uma fonte radioativa, geralmente de raios-X ou raios- γ , ao passar através do escoamento e a tubulação, Figura 9. As frações das fases se determinam pela comparação da atenuação medida com as atenuações conhecidas. As

atenuações conhecidas se obtêm ao preencher completamente a tubulação com só uma das fases usadas. Os raios são atenuados de acordo com o coeficiente de atenuação de cada fase. Assim, a medição da atenuação de cada feixe pode ser usada para determinar a fração de fase transversal, (DA SILVA, 2008).

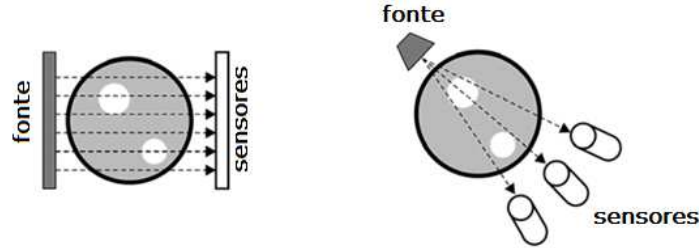


Figura 9. Esquemas típicos de medição da fração das fases por meio de atenuação de radiação, Da Silva (2008).

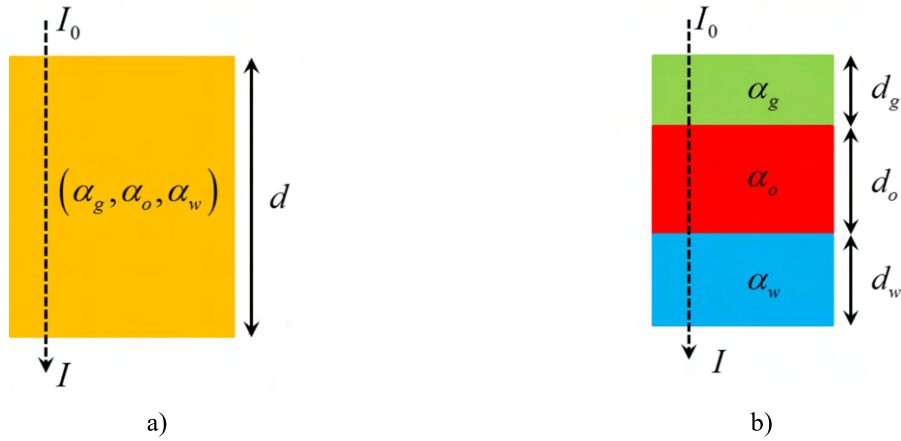


Figura 10. Princípio de medição da fração em técnicas de radiação de raios-X e raios- γ , para um feixe estreito, Frøystein et al. (2005). a) medição num volume com as fases misturadas homogeneamente; b) caso equivalente onde as fases estão completamente separadas.

No caso de escoamento trifásico, Frøystein et al. (2005) fazem uma análise detalhada dos princípios e equações envolvidas, Figura 10. Neste caso, a fonte de radiação produz um feixe estreito de fótons que atravessa a tubulação e os fluidos. A fonte também produz fótons com dois níveis de energia, um baixo E_L e um alto E_H . Para uma mistura homogênea das fases (Figura 10a) ou um escoamento com fases separadas, onde o feixe estreito é perpendicular às interfaces entre as fases (Figura 10b), a soma dos comprimentos do feixe atravessando cada fase deve ser igual a comprimento total dentro do volume de controle. Assim,

$$d_g + d_o + d_w = d, \quad (1.23)$$

e as frações das fases podem ser escritas como

$$\alpha_g = \frac{d_g}{d}; \quad \alpha_o = \frac{d_o}{d}; \quad \alpha_w = \frac{d_w}{d}. \quad (1.24)$$

Se a tubulação estiver vazia, as medições do sensor são representadas por I_0^L e I_0^H , para o nível de energia baixo e alto, respectivamente. Se só o feixe de baixa energia atravessasse a mistura trifásica, a medida do sensor deve ser

$$I^L = I_0^L e^{-d_g \mu_g^L - d_o \mu_o^L - d_w \mu_w^L}, \quad (1.25)$$

e no caso de alta energia é

$$I^H = I_0^H e^{-d_g \mu_g^H - d_o \mu_o^H - d_w \mu_w^H}, \quad (1.26)$$

onde μ_g^L , μ_g^H , μ_o^L , μ_o^H , μ_w^L e μ_w^H são os coeficientes de atenuação linear dos níveis E_L e E_H para o gás, óleo e água, respectivamente. Por outro lado, o coeficiente de atenuação médio para E_L pode ser obtido da medição como

$$\mu^L = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_0^L}{I^L} \right) \quad (1.27)$$

e para E_H

$$\mu^H = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_0^H}{I^H} \right). \quad (1.28)$$

Combinando as equações (1.24) à (1.28) se obtém as seguintes expressões

$$\mu_g^L \alpha_g + \mu_o^L \alpha_o + \mu_w^L \alpha_w = \mu^L \quad (1.29)$$

$$\mu_g^H \alpha_g + \mu_o^H \alpha_o + \mu_w^H \alpha_w = \mu^H. \quad (1.30)$$

Além, claro, da equação de continuidade (Eq. 1.5)

$$\alpha_g + \alpha_o + \alpha_w = 1.$$

Assim, as equações (1.29), (1.30) e (1.5) formam um conjunto de equações lineares para as frações de fase individuais. Li et al. (2005) deixam claro que a condição necessária para a independência linear é

$$\frac{\mu_w^L}{\mu_o^L} \neq \frac{\mu_w^H}{\mu_o^H}. \quad (1.31)$$

As quantidades μ_L e μ_H são determinadas das medições de atenuação, enquanto os coeficientes de atenuação são achados por meio de um processo de calibração com cada fase.

Este tipo de técnica tem mostrado alto potencial para o estudo de escoamento multifásico devido à sua boa resolução espacial, razoável resolução temporal e a sua natureza não intrusiva e não invasiva. A aplicabilidade desta técnica no estudo de escoamento óleo-água em tubulações tem sido avaliada em alguns trabalhos (ELSETH, 2001; ODDIE et al., 2003;

RODRIGUEZ; OLIEMANS, 2006). Essa técnica é considerada referência pela eficácia que apresenta e sua boa precisão, 1% de erro para bifásico (RODRIGUEZ; OLIEMANS, 2006) e 3% de erro para trifásico (para cada nível de energia, Li et al. (2007)). Devido às flutuações na intensidade da fonte, essas técnicas requerem um tempo relativamente longo para obter uma medição com uma boa precisão. Baixar o tempo implica piorar a precisão e subir a intensidade baixa o tempo, mas isso pode implicar em equipamentos com proteção radiológica mais complexos.

b. Sensores Elétricos

As técnicas que medem propriedades elétricas também são muito usadas para obter a fração da secção transversal, mas, pela natureza da técnica, a fração medida é volumétrica. Estas técnicas medem a impedância elétrica, que muda com a frequência; assim, usualmente a impedância é medida numa só frequência, mas se tem duas bandas para a medição da impedância. A primeira faixa vai de 0 Hz até dezenas de MHz, isso corresponde às bandas do espectro eletromagnético chamadas ELF (*Extremely Low Frequency*) até VHF (*Very High Frequency*). A segunda faixa corresponde a frequências entre 2 GHz e 20 GHz que correspondem as bandas UHF (*Ultra High Frequency*) e SHF (*Super High Frequency*), mas que normalmente são chamadas de microondas. Na seção 2.2 se estudará com mais detalhe as diferenças em se medir nas duas bandas. Na literatura, os sensores que trabalham na primeira banda são somente chamados de elétricos e os que trabalham na segunda banda são chamados de microondas. Nesta tese continuar-se-á com a mesma distinção, apesar de os dois medirem propriedades elétricas.

Nos sensores elétricos (banda DC-VHF), comumente dois eletrodos são colocados ao redor da tubulação. Há muitas possibilidades de organizar um sistema de eletrodos para medir a fração das fases, Figura 11. Essas técnicas geralmente se dividem em duas categorias, dependendo principalmente do tipo de fluidos a serem usados: sensores de condutividade/resistência elétrica e sensores de capacitância/permisividade elétrica. Os sensores de condutividade são empregados quando se tem ao menos uma fase condutora e devem estar em contato com os fluidos, pelo que são invasivos. Estes usam sinais DC ou de baixa frequência, até dezenas de kHz (CANTELLI et al., 2011 e DEVIA; FOSSA, 2003). Os sensores capacitivos podem ser usados quando os fluidos apresentam diferenças na permisividade elétrica e não precisam estar em contato com os fluidos, mas a tubulação precisa ser não condutora (JAWOREK et al., 2004). Como são não invasivos, a aplicação deste tipo de sensor é amplamente pesquisada em escoamentos multifásicos (DOS REIS; DA SILVA

CUNHA, 2013, YE et al., 2011 e AHMED, 2006). A banda de frequências usada para a medição está nos MHz.

Essas técnicas também são amplamente usadas pelo fator econômico e utilizam radiação eletromagnética não-ionizante. Ainda assim, apresentam certas desvantagens. No caso dos sensores condutivos, a propriedade medida, geralmente a resistência elétrica da água, varia fortemente com a temperatura, a salinidade e a frequência. Isto também pode acontecer com a capacitância, mas em geral em menor medida. As duas técnicas têm como desvantagem que são sensíveis à localização relativa entre os eletrodos e ao padrão de escoamento (AN et al., 2014), principalmente no caso côncavo, Figura 11a. Devido a isto, vários trabalhos procuram otimizar a geometria destes sensores (ABOU-ARKOUB et al., 2010, YE et al., 2011 e DEVIA; FOSSA, 2003), a melhoria das técnicas de medição (JAWOREK; KRUPA, 2010) ou estudar os efeitos da frequência na medição (DEMORI et al., 2010). Pelo mesmo motivo, a utilização deste tipo de sensor requer uma calibração que é desenvolvida para cada estudo particular, pelo exemplo: a geometria dos eletrodos (DOS REIS; DA SILVA CUNHA, 2013) ou a variação da capacitância com a temperatura (ROCHA et al., 2009).

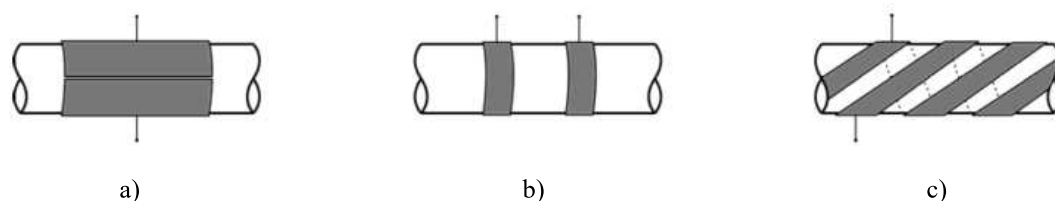


Figura 11. Arranjos típicos das sondas de impedância, Da Silva (2008). a) côncava; b) anel duplo; c) helicoidal.

A combinação da medição de resistência e capacitância dos fluidos é pouco usada em escoamento multifásico (DA SILVA, 2008). Trabalhos como o de Dykesteen et al. (1985) mostram sua aplicação em sistemas trifásicos para determinar a impedância e a partir desta achar a fração das fases em escoamento disperso óleo-água-ar. A ideia essencial desse trabalho, ilustrado na Figura 12a, consiste em ter um modelo do valor de capacitância e resistência do escoamento em função da fração de ar α_g e água α_w . Assim, um conjunto de valores medidos de resistência R_1 e capacitância C_1 determina os valores da fração de ar α_{g1} e água α_{w1} em um escoamento em particular. Por último, usada em conjunto com a equação da conservação da massa (1.5), se pode determinar a fração de óleo α_{o1} desse escoamento. Essencialmente, isto mostra que se precisa da medição simultânea de duas variáveis independentes para poder obter a fração das fases em escoamentos trifásicos. Desta forma, se obtém um sistema de três equações linearmente independentes, de forma similar ao apresentado na medição pela técnica

radioativa dual. Os autores encontram que os modelos aplicados tem um comportamento adequado e conforme a teoria para a faixa testada, $0 < \alpha_g < 0,5$ e $0 < \alpha_w < 1$. Deve-se observar também que nesses modelos as relações podem não ser unívocas, o que leva a relações complexas entre a fração das fases e a característica elétrica medida, Figura 12b. Na seção 2.1.6 se dá uma explicação mais profunda destas relações.

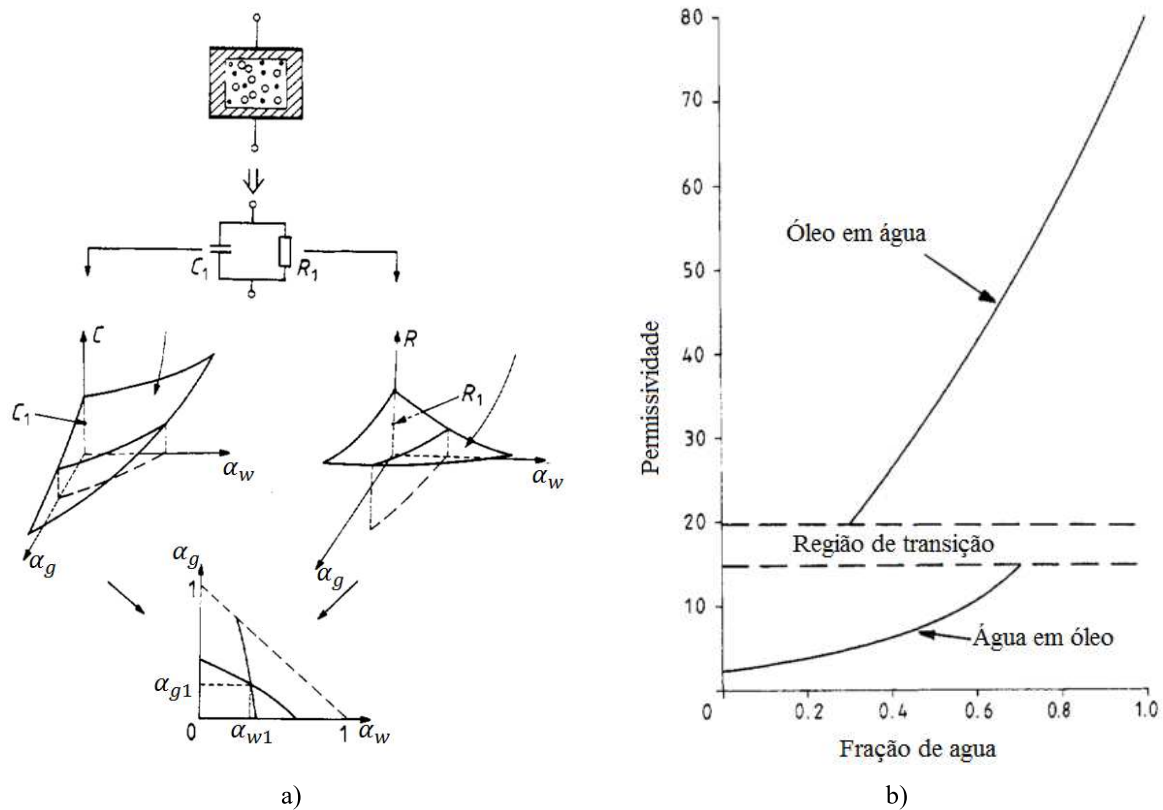


Figura 12. a) Relação entre a impedância e a razão de frações dos fluidos; b) Permissividade calculada para uma mistura óleo-água; Dykesteen et al. (1985).

c. Microondas

As técnicas baseadas em microondas também têm sido aplicadas em escoamentos trifásicos, mas não são tão comuns como as de impedância elétrica. Bondet et al. (2008) usa duas sondas coaxiais para obter frações de fase em um tubo de 14mm e escoamentos Bo-Ag e Bo-Bg. Cada sonda trabalha em bandas diferentes 10-800 MHz e 40 GHz e através de um analisador de redes mede a admitância em sua forma cartesiana. A técnica desenvolvida tem limitações quanto à faixa de frações de gás abaixo de 0,6. Hilgedick et al. (2014) usa também um cabo coaxial para medir a fração de areia em escoamentos trifásicos estratificados óleo-gás-salmoura. Eles não medem a fração de cada fluido, mas consideram a mistura como uma estrutura única que contém areia. Então, estudam a mudança na perda de potência do sinal de três diferentes frações trifásicas ao ter diferentes quantidades de areia. Portanto, pode-se considerar como um problema bifásico líquido-sólido.

d. Ópticas

Outras técnicas se baseiam em visualização óptica ou vídeometria, que também obtém dados de fração volumétrica. Estas técnicas têm geralmente uma excelente resolução espacial e usualmente apresentam boa resolução temporal, pois se utilizam câmeras de alta velocidade para poder filmar bolhas, gotas ou partículas que se deslocam a altas velocidades *in situ*. A técnica óptica tem como desvantagem que precisa de um ambiente propício, necessitando ao menos uma fase (preferivelmente a fase contínua) e tubulações transparentes, além de iluminação apropriada. No entanto, devido à sua característica não invasiva e custo relativamente reduzido é um método de amplo uso em estudos experimentais bifásicos (DE CASTRO et al., 2012, RIAÑO et al., 2013 e DOS SANTOS, 2011). Como as técnicas estão baseadas em câmeras que obtém uma imagem lateral do escoamento, se usam modelos complementares para estimar as frações, que dependem do padrão estudado. Por exemplo, se usa o modelo de célula unitária para estimar a fração de gás no escoamento de bolhas alongadas ou pistonado. A Figura 13 ilustra a aplicação do modelo, feita por Dos Santos (2011), num escoamento gás-líquido em tubulação horizontal. Uma bolha alongada (Figura 13a) é aproximada pela forma semicircular perfeita numa tubulação circular (Figura 13b) e com esse modelo se calcula a fração de gás (Figura 13c). Devido às limitações desta técnica, sua aplicação em escoamentos trifásicos se vê relegada às análises qualitativas (WEGMANN et al., 2007 e BANNWART et al., 2009).

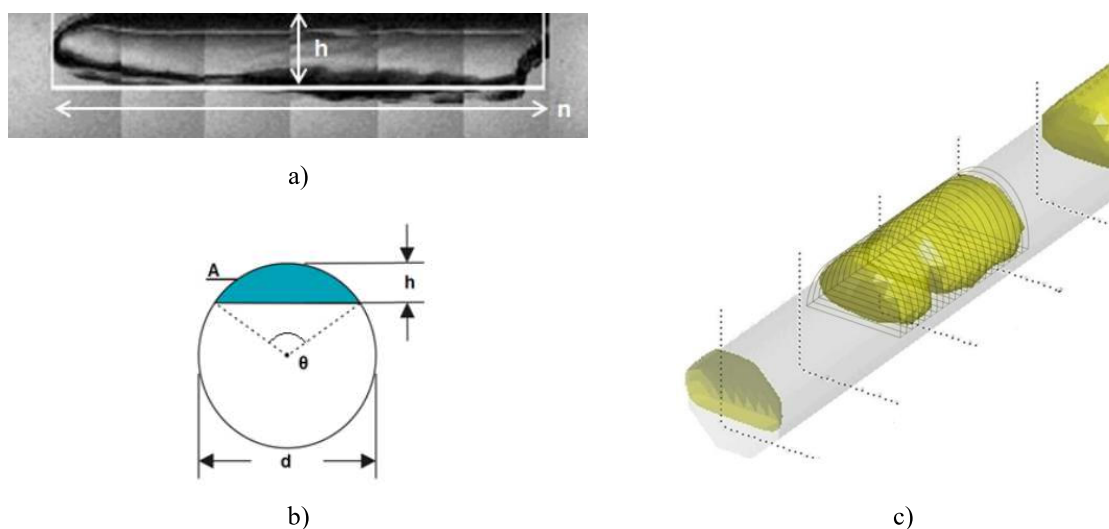


Figura 13. Modelo de área semicircular usada por Dos Santos (2011) para um escoamento gás-líquido. a) imagem adquirida; b) modelo de área circular; c) comparação.

e. Técnicas duais

Existem técnicas duais para a medição trifásica. Os medidores da Roxar (Tabela 2) combinam a medição da densidade média ρ_m por densitometria por raios- γ com a medição da permissividade elétrica média ε_m em microondas (LUND BO; NYFORS, 2002). Assim, o sistema de três equações para determinar as frações das fases é:

$$\rho_m = \rho_g \alpha_g + \rho_o \alpha_o + \rho_w \alpha_w \quad (1.32)$$

$$\varepsilon_m = f(\alpha_g, \alpha_o, \alpha_w, \varepsilon_g, \varepsilon_o, \varepsilon_w) \quad (1.33)$$

$$\alpha_o + \alpha_w + \alpha_g = 1. \quad (1.34)$$

Eles usam a equação de Bruggeman para a relação entre as permissividades relativas e as frações de fases, seção 2.1.6c.

1.2.3. Imagens tomográficas de escoamentos

As imagens tomográficas de escoamentos multifásicos encontram muitas aplicações industriais. Uma imagem tomográfica é uma representação bidimensional de uma fatia através de um objeto. Imagens tomográficas têm sido usadas para a investigação de escoamentos multifásicos em alguns trabalhos (KICKHOFEL et al., 2011, WU et al., 2009, SCHLEICHER et al., 2008 e HAMPEL; FISCHER, 2008). Algumas revisões podem ser vistas em Rasteiro et al. (2011) e Prasser (2008), com diferentes técnicas.

Para Da Silva (2008), o princípio geral da tomografia computadorizada em escoamento multifásico consiste em medir uma propriedade física, através do tubo, que pode ser relacionada com a fração de fase (por exemplo: a resistência elétrica). Um número de medições independentes é tomado a partir de um conjunto de fontes-sensores. Estes conjuntos são colocados na periferia do objeto de teste. As medições são tomadas em diferentes posições angulares, seja por rotação ou movimento do conjunto (CALVO et al., 2009), comutação eletrônica (YANG, 2010) ou por simulação de múltiplas fontes a partir de somente uma (BIEBERLE; HAMPEL, 2006), Figura 14. Após as medições terem sido completadas, as propriedades locais do escoamento podem ser calculadas por meio de um algoritmo de reconstrução inversa. A imagem reconstruída $\Phi'(\mathbf{r})$ pode não ser sempre idêntica à distribuição real $\Phi(\mathbf{r})$. A Figura 15 ilustra esquematicamente o processo. A reconstrução da imagem em tomografia implica resolver um problema inverso, isto é, a obtenção da distribuição espacial da propriedade a partir de uma quantidade significativa de medições e da geometria conhecida do problema. Existem muitos tipos de sistemas de tomografia baseados em diferentes técnicas, tais

como elétricas, ultrassom ou radiação ionizante. A seguir se revisará o estado da arte de técnicas tomográficas que são viáveis para aplicação em escoamentos multifásicos, especialmente as que podem trabalhar em escoamentos trifásicos.

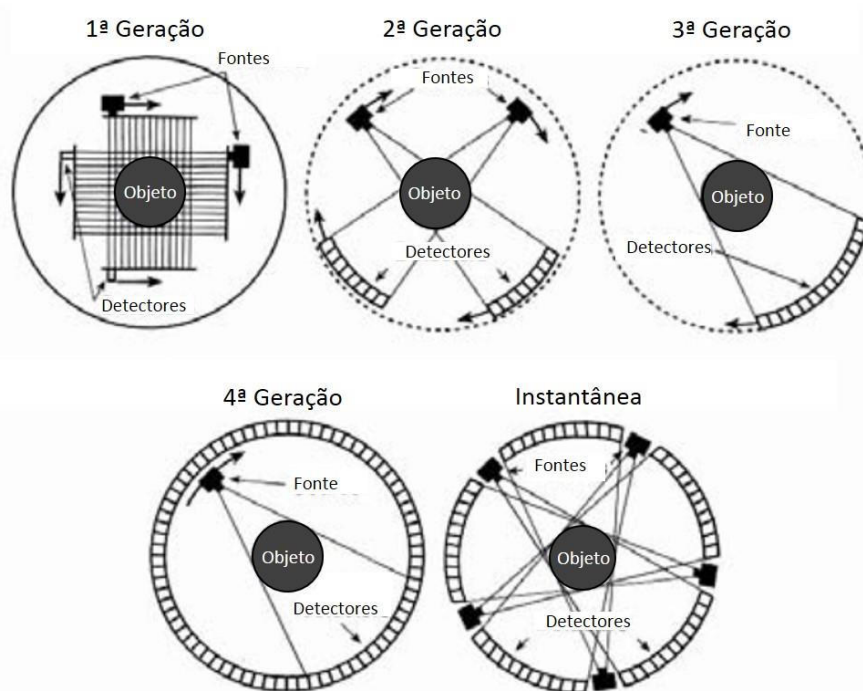


Figura 14. Diferentes gerações de tomógrafos de radiação ionizante, primeira à quarta geração, Abdullah et al. (2008).

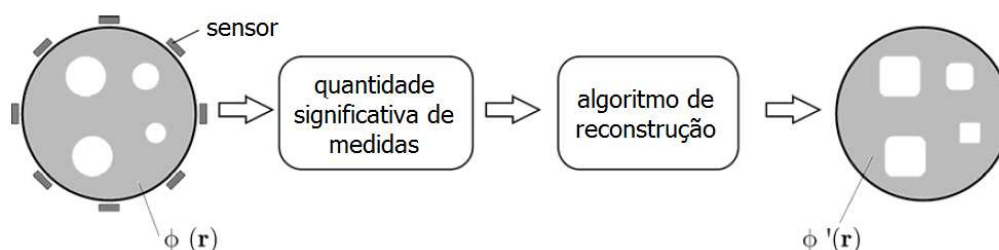


Figura 15. Reconstrução da imagem da seção transversal, Da Silva (2008).

a. Tomografia de raios-X, raios- γ e de nêutrons

As tomografias de raios-X, raios- γ e de nêutrons podem ser vistas como métodos avançados de densitometria amplamente usados. Eles se baseiam na atenuação da radiação pela matéria. As aplicações em tomografia de escoamentos trifásicos, como a desenvolvida no Instituto de Pesquisas Nucleares (IPEN) por Calvo et al. (2009), requerem o uso de dois níveis de energia (frequências) e cada fase deve apresentar características de atenuação diferentes para os níveis de energia usados. Assim, se pode identificar corretamente as três fases e a imagem da distribuição da fração das fases pode ser obtida. Devido à necessidade de usar dois níveis de energia, alguns trabalhos (LI et al., 2005) usam dois radioisótopos diferentes como fontes de

radiação, cada um com um nível de energia diferente. Ao final se tem duas equações linearmente independentes e, juntamente com a equação da conservação da massa, eq. (1.5), é possível obter a fração de cada fase. Uma descrição detalhada do uso de tomografia de raios- γ em escoamentos trifásicos pode ser vista em Frøystein et al. (2005). Por outro lado, nas técnicas de raios-X e raios- γ a interação com a matéria depende de uma probabilidade relacionada ao número atômico. Assim, se precisa de uma janela de tempo considerável para obter uma medição confiável. Propostas recentes de Hampel et al. (2005), Bieberle et al. (2007) e Maad et al. (2010) tem alta resolução temporal. Hampel et al. (2005) propõe gerar um movimento rápido de um feixe de raios-X com ângulo limitado, chegando a 1000 quadros/s com uma resolução espacial de 1 mm. Maad et al. (2010) chegam a 5500 quadros/s usando várias fontes de radiação. Enquanto Bieberle et al. (2007) consegue até 43000 quadros/s com três bits de resolução ou 24000 quadros/s com 6 bits de resolução. Entretanto, esses trabalhos de tomografia de alta resolução temporal só utilizam um nível de energia. Portanto, esses equipamentos só tem sido usados com escoamentos bifásicos, Bieberle et al. (2011), mas podem reconhecer outros materiais pelo nível de intensidade na imagem. Além disso, estes sistemas usam níveis de radiação maiores para obter alta resolução temporal.

A tomografia por nêutrons tem algumas vantagens dependendo dos materiais, em comparação com raios-X e raios- γ . Por exemplo, materiais metálicos como chumbo e ferro tem pouca atenuação, enquanto com raios-X e raios- γ a atenuação é alta. Água tem uma atenuação muito alta dos nêutrons devido ao seu conteúdo de hidrogênio. Assim, é possível obter radiografias em tubulações metálicas (LUIZ et al., 2010). No entanto, a tomografia de nêutrons requer geralmente acesso a uma fonte intensa de nêutrons como um reator, além de outros equipamentos complexos (SAITO et al., 2005 e KICKHOFEL et al., 2011).

Desse modo, as técnicas tomográficas para escoamento trifásico oferecem em geral uma média temporal da distribuição da fase, devido à utilização de partes mecânicas móveis. A resolução no tempo de tais sistemas é limitada a poucas imagens por segundo. Só uns poucos trabalhos têm alta resolução temporal. No entanto, estas soluções são ainda complexas, custosas, perigosas para o operador e limitadas a escoamentos bifásicos. Outra limitação que elas oferecem está relacionada aos cuidados que se deve ter ao usar radiações ionizantes, o que obriga a seguir cuidadosas e exigentes recomendações de segurança.

b. Imagens de ressonância magnética

As imagens de ressonância magnética (MRI, NMRI ou MRT) são amplamente utilizadas na área da saúde. Esta técnica se baseia nos fenômenos de ressonância magnética dos

núcleos de hidrogênio. Assim, um fluido como água e hidrocarbonetos podem ser detectados facilmente. Esta técnica tem sido pouco usada em escoamentos multifásicos porque a taxa de atualização das imagens está na faixa de várias dezenas de segundos. Isto limita a técnica a escoamentos com velocidades muito baixas, por exemplo, Jiang et al. (2013) que mede a distribuição de CO₂ e água em leito fluidizado. Por outro lado, recentemente Appel et al. (2013) apresentaram o desenvolvimento de um equipamento especialmente adaptado para medir vazões volumétricas e frações de fases, incluindo trifásicos em altas velocidades. As medições de vazões e frações têm uma boa concordância com outros instrumentos, mas os autores ainda não apresentam imagens tomográficas nos resultados. Uma limitação desta técnica é que a tubulação deve ser transparente a ondas eletromagnéticas e campos magnéticos (HALL, 2005).

c. Tomografia por emissão de pósitrons

A tomografia por emissão de pósitrons (PET) e o seguimento de partículas por emissão de pósitrons (PEPT) também são amplamente conhecidas por suas aplicações em medicina. As técnicas estão baseadas no uso de um radioisótopo que ao decair emite pósitrons e estes ao reagir com elétrons produzem raios- γ , os quais são detectados pelo equipamento. Em um escoamento multifásico, uma das fases é marcada com o radioisótopo e assim é possível analisar essa fase, incluindo a velocidade. Porém, o tempo de aquisição de um sistema de PET é da ordem de minutos e é muito lento para os escoamentos de rápida evolução. Mas a técnica PEPT tem sido usada amplamente em processos industriais até anos recentes (DECHSIRI et al., 2008). Em escoamentos multifásicos tem sido usado geralmente em leitos fluidizados (FAIRHURST et al., 2001, DECHSIRI et al., 2008 e PARKER; FAN, 2008), onde conseguem seguir partículas com velocidades de até 2m/s e 50quadros/s. Em escoamento líquido-líquido esta técnica está limitada as velocidades das partículas até 0,5 m/s, Bakalis et al. (2004).

d. Tomografia óptica

A tomografia óptica usa radiação eletromagnética no espectro infravermelho, visível ou ultravioleta. Tem sido principalmente usada em escoamento sólido-líquido (KHAIRI et al., 2012) e gás-líquido (VENDRUSCOLO et al., 2014). Ela tem como vantagem a alta resolução temporal, de até milhares de frames por segundo (SCHLEICHER et al., 2008). No entanto, esses sistemas têm limitações na fração de vazio de 15% em escoamentos gás-líquido (SCHLEICHER et al., 2008) e concentração de 35% de sólidos em escoamentos sólidos-líquido (ZAIN et al., 2010 e MUJI et al., 2011). Portanto, têm limitações nos padrões de escoamento que podem ser estudados. Estes sistemas têm como vantagem seu baixo custo e como desvantagem a necessidade de tubulações e uma fase contínua transparentes.

e. Tomografia por ultrassom

A tomografia por ultrassom baseia-se nas propriedades de impedância acústica dos fluidos. A técnica tem sido usada principalmente em escoamentos bifásicos gás-líquido (AYOB et al., 2011 e MANAN et al., 2011). Existem trabalhos de simulação ou testes estáticos em sistemas trifásicos de fases separadas (ABDUL WAHAB et al., 2011 e KURNIADI; TRISNOBUDI, 2000), mas a técnica ainda não tem sido aplicada em sistemas reais. Uma vantagem da tomografia por ultrassom é a possibilidade de obter imagens dentro de objetos opacos, inclusive tubulações de aço (ABBASZADEH et al., 2013). No entanto, tem limitações devido à velocidade de propagação do som, além de elementos no escoamento que podem ter dimensões similares ao comprimento de onda do ultrassom. Isto limita a fração de vazio ou de sólidos particulados que pode ser medida e as resoluções espaciais e temporais. Assim, as frações estão limitadas a 20% e o tempo de aquisição a décimos de segundo (FAZALUL RAHIMAN, 2005, AYOB et al., 2011, e FAZALUL RAHIMAN et al., 2006). Apesar disso, a tomografia por ultrassom apresenta a possibilidade de se trabalhar com diferentes frequências, mas nesta pesquisa não se encontrou nenhum trabalho relacionado.

f. Tomografia elétrica, EIT

Um importante campo da tomografia de processos industriais é o referente à tomografia de impedância elétrica (EIT), que explora a interação de campos elétricos com a matéria. A principal tarefa do EIT é determinar as distribuições de condutividade ou de permissividade que estão ligadas às distribuições de fase em um escoamento multifásico. Assim, a EIT também é chamada de tomografia por resistência elétrica (ERT) ou tomografia por capacitância elétrica (ECT), dependendo da característica elétrica que esteja-se medindo. No entanto o termo EIT deve ser utilizado apenas quando tanto a resistência quanto a capacitância são medidas (chamada de modalidade dupla), como é descrito por Marashdeh et al. (2007) e Cao et al. (2007). Outra modalidade elétrica é a tomografia eletromagnética (EMT) ou tomografia de indutância magnética. EMT é baseada na medição da indutância mútua entre uma bobina e o fluido. A EMT é adequada para obter imagens de materiais altamente condutores ou magnéticos, tais como metais e sais minerais (PEYTON et al., 1996).

Na EIT os eletrodos estão dispostos igualmente espaçados em torno de um tubo ou recipiente a ser investigado. Para os sistemas de ECT, os eletrodos são normalmente não-invasivos, ficando por fora da parede do tubo, ou podem ser não-intrusivos, tocam, mas não penetram o meio que se pretende medir. Uma imagem é obtida através da aplicação de um campo elétrico por um eletrodo e medindo-se a respostas nos eletrodos restantes. O conjunto

completo de dados é obtido pela ativação sucessiva de cada elétron, enquanto as respostas de todos os elétrons restantes são medidas. Em ECT os sinais de excitação são gerados através da aplicação de tensões e, também, tensões são medidas. Enquanto que em ERT são injetadas correntes e tensões são medidas. A escolha da técnica depende, principalmente, do alvo de interesse. ERT tem sido utilizado para distribuição das concentrações de imagem em soro fisiológico, misturas gás-líquido e suspensões, entre outras aplicações. Uma vez que a ECT é adequada para a investigação de materiais não condutores, por exemplo, tem sido aplicada em escoamentos gás-óleo em colunas, leito fluidizado, etc. Uma revisão mais extensa se encontra em Yang; Peng (2003).

Sistemas de EIT são relativamente rápidos (até 1000 imagens por segundo), têm baixo custo e são simples de operar. A principal desvantagem do IET é a sua resolução espacial moderada da imagem resultante e o uso de algoritmos para a reconstrução da imagem. Os sinais elétricos medidos são uma função não linear das frações de fase e da configuração do escoamento. Além disso, ao contrário de raios-X ou raios- γ , os campos elétricos não podem ser confinados a um caminho estreito entre um transmissor e receptor. Isto é a chamada propriedade de campo mole da tomografia elétrica e a causa da perda de qualidade na imagem reconstruída.

g. Tomografia por microondas

A Tomografia por microondas usa os mesmos princípios da tomografia elétrica e enfrenta quase os mesmos desafios (BOLOMEY; JOFRE, 2010 e NYFORS, 2000), só que utiliza frequências entre 1 GHz e 13 GHz. Tem sido bastante usada em medicina (SEMENOV, 2009), mas quase não há aplicações em escoamentos multifásicos. McCann e Davis (2005) sugerem um sistema que poderia ser usado com diversas fases. Wu et al. (2010) explora a aplicação em escoamentos bifásicos gás-óleo, considerando viável sua aplicação. Por outro lado, Mallach e Musch (2014) exploram a aplicação em sistemas trifásicos ar-óleo-água, relatando que seria viável a sua aplicação em frequências entre 1 GHz e 3 GHz. Porém, os autores ainda não têm reportado a obtenção de imagens tomográficas com sua proposta. Ao trabalhar em frequência mais altas que os sistemas EIT, as características elétricas medidas podem ser menos sensíveis às mudanças de temperatura e os diferentes íons (átomos ou moléculas que estão eletricamente carregados) que se encontram dissolvidos na água (NYFORS, 2000). Esses sistemas têm uma resolução espacial regular (FALCONE et al., 2009) e os receptores e transmissores são mais complexos que os usados em EIT (BULYSHEV et al., 2004, MALLACH; MUSCH, 2014 e BOLOMEY; JOFRE, 2010).

h. Métodos duais

Alguns trabalhos de tomografia fundem dois métodos para melhorar a qualidade das medições. Rahim et al. (2011) usam tomografia óptica com ECT para melhorar a qualidade da imagem em escoamentos bifásicos sólido-líquido. O sistema desenvolvido ainda herda a limitação de fração das fases da tomografia óptica. Por outro lado, os autores não consideram a sua aplicação em sistemas trifásicos, o que ainda pode ser trabalho de pesquisa.

Outra técnica, relativamente recente, é a chamada de tomografia *wire-mesh* (WMT). Esta é baseada no tipo de sensor *wire-mesh* que mede propriedades elétricas dos fluidos. Esta vai ser a técnica utilizada neste trabalho e por isso suas aplicações vão ser analisadas na seção seguinte.

1.2.4. Sensor do tipo *Wire-Mesh*

Trata-se de um dispositivo com alta resolução temporal e média resolução espacial que combina medidas intrusivas e diretas de fração volumétrica para obter, entre outras, imagens tomográficas da seção transversal. Foi introduzido por Prasser et al. (1998) no Centro de Pesquisa de Dresden-Rossendorf (FZD) na Alemanha. Dessa data em diante, tem sido utilizado por vários pesquisadores para o estudo de escoamentos multifásicos, principalmente em escoamento gás-líquido (PRASSER et al., 1998; DA SILVA; SCHLEICHER et al., 2007; ROITBERG et al., 2007; PIETRUSKE; PRASSER 2007; DA SILVA et al., 2009; DA SILVA et al., 2010; HAMPEL et al., 2009 e AZZOPARDI et al., 2010), com algumas aplicações em escoamento líquido-líquido (LLAMAS et al., 2008; DA SILVA et al., 2011, RODRIGUEZ et al., 2013).

O sensor é basicamente formado por dois planos de fios, um de fios transmissores e o outro de receptores. A separação entre os dois planos é de apenas alguns milímetros (0,35-5,0 mm), enquanto a distância entre os fios de um mesmo plano varia entre 0,5-1,5 mm. Os fios de cada plano são posicionados perpendicularmente em relação aos do outro plano, formando assim uma rede de eletrodos. Essa distribuição dos eletrodos faz deste um sensor intrusivo, sendo sua maior desvantagem. Em cada eletrodo ou ponto de cruzamento entre fios são feitas medidas de resistência/conductividade elétrica ou capacitância/permisividade. Na Figura 16 pode ser observado o esquema de um protótipo de 4×4 fios. O espaço entre os pontos de cruzamento é preenchido com fluidos do escoamento. Cada fio transmissor (em marrom) é ativado em sequência e envia um sinal elétrico para o fluido. Em seguida, cada fio receptor (em azul) recebe um sinal que contém a informação para identificar as características dos fluidos presentes em cada ponto de cruzamento. Ao ser ativado o último fio transmissor, é adquirido

um conjunto completo de dados com a informação sobre o tipo de fluido ou fase para toda a seção transversal. A partir dessas frações locais instantâneas são obtidas frações médias na seção e no tempo, distribuições de fase ao longo da seção, fração volumétrica *in-situ* e imagens 3D do escoamento.

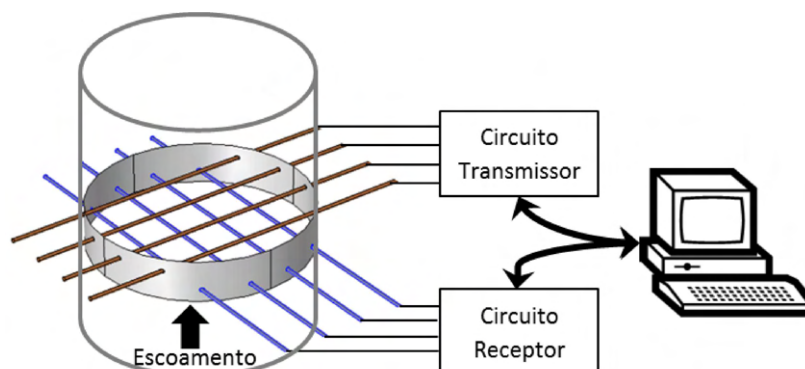


Figura 16. Representação esquemática do sensor *wire-mesh*, com a sua localização numa tubulação.

A primeira versão da técnica *wire-mesh* mede a condutividade ou resistência elétrica da mistura em cada ponto de cruzamento. A segunda versão da técnica mede a permissividade ou capacitância elétrica da mistura. Cada técnica pode ser aplicada se os fluidos que se usam têm diferença na característica elétrica que se mede. Por exemplo, as duas técnicas podem ser aplicadas em escoamentos água-ar, pois os fluidos têm diferença na sua condutividade e permissividade elétrica. Num escoamento óleo-ar a técnica condutiva não pode discriminar entre os dois fluidos, por serem substâncias de baixíssima condutividade, que escapam da sensibilidade da técnica. Mas neste escoamento a técnica capacitiva permite discriminar entre os fluidos porque existe diferença entre suas permissividades. Na seção 2.2 se dará uma descrição das duas técnicas. Uma descrição detalhada do princípio de funcionamento da técnicas condutiva e capacitiva *wire-mesh* pode ser vista em Prasser et al. (1998) e Da Silva et al. (2007), respectivamente.

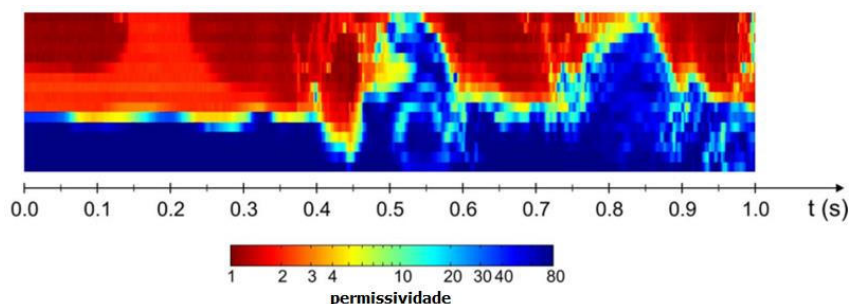


Figura 17. Imagem obtida para um escoamento trifásico através de um sensor *wire-mesh* capacitivo, fio central, Da Silva (2008).

Da Silva (2008) e Da Silva e Hampel (2013) apresentam a aplicação da *wire-mesh* capacitiva em escoamentos trifásicos através de um pequeno experimento de três fases estratificadas. O experimento consistiu em mexer uma caixa com três fluidos estratificados e obter uma imagem sobre como se misturavam as fases no tempo, Figura 17. A *wire-mesh* capacitiva pôde ser aplicada nesse caso, pois o volume de medição da célula (o ponto de cruzamento) estava preenchido com no máximo duas das fases. Ou seja, nos pontos de cruzamento só se tinha um sistema bifásico. Porém, se as três fases estão misturadas em um volume de medição não é possível obter as frações. Por exemplo, uma fração determinada de uma mistura bifásica água-gás pode ter a mesma medição de permissividade de óleo puro (por ter este um valor intermediário) ou pode também coincidir com o valor de outra concentração de óleo-água. Por isso, essa técnica só pode ser aplicada em escoamentos com fases separadas, tendo como referência à resolução espacial do sensor.

Outra técnica para escoamento trifásico é proposta por Descamps et al. (2007). É utilizado o sensor *wire-mesh* condutivo num escoamento óleo-água-ar em tubulação vertical. Devido a que esse sensor não pode distinguir as fases óleo e ar, os autores utilizam uma estratégia que consistiu em agrupar as duas fases líquidas numa só, com condutividade média σ_l , a qual é reconhecida a partir do histograma medido. Depois, determinam um valor para separá-la do ar, Figura 18. Para separar as fases líquidas, usam a função de relação de condutividade quando se tem valores superiores ao de discriminação:

$$\alpha_o = \frac{1 - \frac{\sigma_l}{\sigma_w}}{1 + 0.5 \frac{\sigma_l}{\sigma_w}}, \quad (1.35)$$

conseguindo obter a fração das três fases. É interessante notar que o resultado experimental concorda quando é comparado com a técnica de sonda de agulha óptica, para a determinação das frações de fase cordais. Isto foi possível já que o padrão estudado era Bg-Bo e sem óleo em ar (Figura 3); além de ser somente um ponto dentro do mapa de fluxo e de ter frações volumétricas de óleo e gás baixas (8% cada). Ainda assim, ao trabalhar numa só condição de escoamento, não se conhece seu desempenho em função das outras características do escoamento.

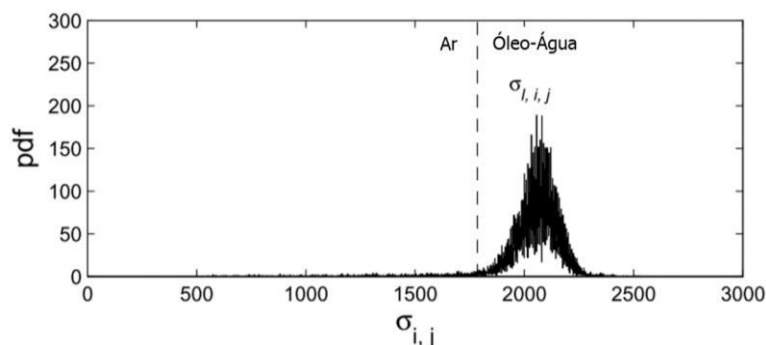


Figura 18. Sinal de condutividade usada no trabalho de Descamps et al. (2007) para separar três fases. A linha tracejada representa o nível de discriminação entre o ar e a mistura óleo-água. $\sigma_{i,j}$ representa a condutividade média da mistura para cada ponto i,j do sensor.

Outra aplicação em trifásicos consiste em achar a concentração de um componente (geralmente a fase líquida) em leitos de gotejamento. Neste tipo de aplicação se tem três fases, mas uma delas é sólida e estacionária (sem movimento), outra é geralmente um líquido (água) e a outra é geralmente um gás (ar). Llamas et al. (2008) aplica a *wire-mesh* condutiva e Schubert et al. (2010) a capacitiva. Nos dois casos se faz uma calibração dos dados medindo a característica elétrica quando o leito está sem o líquido e quando está saturado dele, obtendo os limites da medição. Então, a concentração é um valor proporcional ao valor elétrico medido, entre os limites achados previamente. Isto é possível porque a terceira fase é estacionária e só introduz um valor de deslocamento fixo aos limites, que é anulado pelo processo de calibração. Assim, a aplicação pode ser considerada como um problema bifásico.

Diferentes geometrias do sensor *wire-mesh* têm sido desenvolvidas. Cada uma delas tem aplicações especiais que podem ser aplicadas em alguns dos aspectos abordados neste trabalho. Belt et al. (2010) realizaram medições da espessura de uma película num escoamento anular co-corrente de água-ar em um tubo vertical. O sensor, Figura 19.a, permite a visualização da evolução no tempo da espessura de filme plano de tal modo que a interface do filme pode ser reconstruída. Além dessa, Damsohn e Prasser (2009) oferecem outra geometria do sensor para ser usado para medir a espessura da película de líquido (Figura 19.b). Nesse trabalho, a resolução espacial é muito melhor do que no anterior e a distribuição dos eletrodos foi otimizada para esse propósito. Assim, o campo elétrico está dirigido para medir a espessura. Nos dois casos, a propriedade medida é a condutividade de uma película de líquido em contato com os sensores, que é uma função da espessura do filme. Informação sobre a dinâmica das ondas de superfície pôde ser obtida, a qual é relevante para o estudo de padrões de escoamento anulares. Nesses casos os sensores são não intrusivos. Uma revisão ampla das diferentes aplicações do sensor *wire-mesh* foi feita em Velasco; Rodriguez (2015) como parte da revisão bibliográfica.

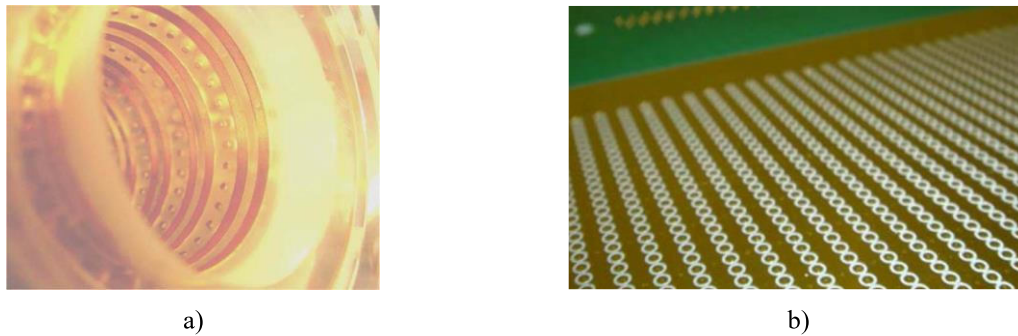


Figura 19. Imagens dos sensores desenvolvidos para a medição de espessura de filmes líquidos. a) Belt et al. (2010); b) Damsohn; Prasser (2009).

1.2.5. Comparação das técnicas

Como discutido ao longo da seção 1.2, cada uma das técnicas apresentadas tem a suas vantagens, desvantagens e limitações. Uma revisão geral sobre as diferentes técnicas é apresentada na Tabela 3, juntamente com alguns parâmetros para comparação. A escolha de uma determinada técnica depende de vários aspectos, como as propriedades do meio a ser medido, os parâmetros de interesse, condições de temperatura e pressão da aplicação, resolução temporal e espacial, custos e os riscos que oferece a segurança à saúde dos operadores. Assim, a técnica WMT se apresenta como uma tecnologia com as seguintes vantagens: baixo custo, alta resolução temporal, que não requer algoritmo de reconstrução inversa da imagem e a sua possível aplicação em escoamentos trifásicos. Ela tem como desvantagens uma resolução espacial média e ser intrusiva.

Ao longo deste capítulo se tem apresentado o estado da arte das técnicas de medição da fração das fases e tomografia em escoamentos multifásicos, discutindo suas aplicações e vantagens. O estudo de escoamentos multifásicos aplicados à indústria do petróleo precisa de instrumentação capaz de obter a distribuição espacial das fases de forma segura, isto é, uma representação objetiva e quantitativa. Ademais, essa área de pesquisa na atualidade está num ponto onde se devem incluir as múltiplas fases para melhorar o entendimento dos fenômenos que ocorrem. Quanto aos escoamentos trifásicos, evidencia-se que ainda não existe uma técnica que possa ser aplicada de maneira universal neste tipo de estudo. Pode-se ver que as técnicas de tomografia que se podem usar em escoamentos trifásicos são poucas e com limitações. Assim, esta tese usa a técnica baseada no sensor *wire-mesh* para preencher algumas lacunas que apresentam as técnicas atualmente. Se usa o sensor *wire-mesh* por ser uma técnica de tomografia com boa relação custo-benefício, alcançando taxas de aquisição de vários milhares de quadros por segundo. Se apresentará uma variação do circuito elétrico usado na técnica *wire-mesh* capacitiva para a medição da resistividade em escoamentos bifásicos com uma fase altamente

condutiva (salmoura). Também se apresenta uma técnica de medição simultânea da resistência e capacitância que pode ser usada em escoamentos trifásicos óleo-água-ar.

Tabela 3. Comparação de algumas técnicas tomográficas para escoamentos multifásicos.

Técnica	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Custo	Observações	Risco à Segurança	Tomografia trifásica
Raios-X e Raios- γ	1 mm	min, ms	\$\$\$	Radiação ionizante	Alta	↑↑
Ressonância Magnética MRI	1 mm	min	\$\$\$	Não é adequado para materiais com propriedades magnéticas e condutores de eletricidade.	Média	↑↑
Emissão de pósitrons PET	2-5 mm	min, ms	\$\$\$	Necessidade de um isótopo marcador.	Alta	↓
Ultrassom US	2-5 mm	ms	\$\$	Adequado apenas para baixas frações de vazio.	Baixa	↓
Impedância Elétrica EIT (ECT ou ERT)	>5 mm	ms	\$	Problemas com campos moles.	Baixa	↑↑
Microondas	mm	ms	\$\$	Pouco aplicada em escoamento multifásico	Média	↑
Ótica	1 mm	ms, μ s	\$	Adequado apenas para baixas frações de vazio e utilização de fases e tubulações transparentes.	Baixa	↑
Técnicas duais ECT-ótica	1 mm	ms, μ s	\$\$	Adequado apenas para baixas frações de vazio e utilização de tubulações transparentes.	Baixa	↓
Sensor Wire-Mesh WMT	2-5 mm	μ s	\$	Intrusivo. Não requer algoritmo de reconstrução inversa da imagem.	Baixa	↑↑

Custo: \$ baixo, \$\$ médio, \$\$\$ alto.

Tomografia Trifásica (Aplicabilidade): ↓ muitas limitações, ↑ poucas limitações, ↑↑ quase sem limitações.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

O capítulo apresenta os elementos teóricos que descrevem como medir as frações volumétricas das fases, em escoamentos bifásicos e trifásicos, por meio do sensor *wire-mesh*. Se apresentaram os conceitos para identificar fluidos através da admitância complexa e sua medição através do circuito ponte autobalanceada, discutindo os aspectos de sua implementação na prática. Continua-se com a apresentação das relações que existem entre a permissividade complexa e as frações das fases. Depois se apresenta e analisa a medição com o sensor *wire-mesh*, detalhando as características técnicas de medição que são compatíveis para a medição trifásica.

2.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE MISTURAS

Os fluidos podem ser classificados de acordo a suas propriedades eletromagnéticas. Neste trabalho são de interesse os fluidos que não apresentam características magnéticas. Assim, nesta seção se apresentam definições das propriedades elétricas dos fluidos e a sua medição.

2.1.1. Impedância e Admitância

A impedância descreve a oposição que um circuito ou material faz à passagem de uma corrente quando é submetido a uma tensão elétrica que não se encontra em estado estável, isto é, não é constante no tempo. Em geral, considera-se que é a relação complexa entre a tensão e a corrente elétricas num circuito com corrente alternada senoidal. Assim, aplicando uma tensão elétrica $v(t) = V \cos(2\pi ft + \theta_v)$, com frequência f , a corrente elétrica resultante deve ser $i(t) = I \cos(2\pi ft + \theta_i)$. Essa tensão elétrica tem uma representação complexa que pode ser escrita como

$$\mathbf{V} = V e^{j(2\pi f t + \theta_v)} \quad (2.1)$$

e para a corrente elétrica

$$\mathbf{I} = I e^{j(2\pi f t + \theta_i)} \quad (2.2)$$

onde $j = \sqrt{-1}$. A impedância calcula-se através da lei de Ohm na sua notação complexa

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} \quad (2.3)$$

de tal modo que a impedância é também um valor complexo

$$\mathbf{Z} = \frac{Ve^{j(2\pi f + \theta_v)}}{Ie^{j(2\pi f + \theta_i)}} = \frac{V}{I} e^{j(\theta_v - \theta_i)} = Ze^{j\theta_z} \quad (2.4)$$

A impedância pode ser apresentada nas suas coordenadas retangulares como

$$\mathbf{Z} = Z \cos(\theta_z) + jZ \sin(\theta_z) = R + jX \quad (2.5)$$

sendo R a resistência, e X a reatância.

Algumas vezes é mais conveniente usar a inversa da impedância chamada admitância

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{\mathbf{Z}} = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{V}} = Ye^{j\theta_y} = \frac{1}{Z} e^{-j\theta_z} \quad (2.6)$$

A admitância pode ser representada em coordenadas retangulares

$$\mathbf{Y} = Y \cos(\theta_y) + jY \sin(\theta_y) = G + jB \quad (2.7)$$

onde G é condutância e B é a susceptância.

A resistência e a condutância representam as perdas por efeito Joule no circuito. A reatância e a susceptância representam a energia reativa armazenada no circuito durante um período.

2.1.2. Permissividade relativa complexa

A permissividade é habilidade de um material para transmitir ou permitir um campo elétrico. A permissividade relativa complexa ϵ é uma propriedade comumente usada para caracterizar materiais.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.8)$$

onde a parte real ϵ' é chamada permissividade relativa e a parte imaginária é chamado de fator de perda.

A equação de Cole-Cole expandida, Bondet et al. (2008), descreve matematicamente o comportamento da permissividade complexa para frequências até os PHz (10^{15} Hz ou PetaHertz).

$$\epsilon = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 - (j\omega\tau)^{1-\beta}} - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (2.9)$$

onde ϵ_s é o valor da permissividade relativa para baixas frequências ou estática, σ é a condutividade estática, ϵ_∞ é o valor da permissividade para frequências óticas, τ é o tempo de

relaxamento, β é chamado de parâmetro de distribuição, ε_0 é a permissividade do vácuo, $\varepsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$ e $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular. O relaxamento é um processo no qual ε' decresce com o incremento da frequência. Esta equação descreve uma grande quantidade de materiais como gases, líquidos e sólidos, sejam condutores ou isolantes.

Para frequências menores a poucas dezenas de MHz, o processo de relaxamento não é observado, $\tau = 0$. Então, a equação de Cole-Cole pode ser simplificada

$$\varepsilon = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (2.10)$$

Onde ε será usada para representar a permissividade relativa estática, também chamada constante dielétrica.

2.1.3. Medição teórica da permissividade complexa

Para encontrar a permissividade complexa pode ser usado um circuito básico como o apresentado na Figura 20, conhecido como célula de medição. Nesse dispositivo, a admitância da célula é dada por

$$\mathbf{Y} = j\omega k_g \varepsilon_0 \varepsilon \quad (2.11)$$

onde k_g é uma constante está relacionada com a geometria da célula. Para a célula de medição da Figura 20, que é um capacitor de placas paralelas, k_g é dada por

$$k_g = \frac{l^2}{d} = \frac{A}{d} \quad (2.12)$$

Assim, a admitância de um fluido numa célula está descrita, a partir das equações (2.10) e (2.11), como

$$\mathbf{Y} = j\omega k_g \varepsilon_0 \left(\varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) = k_g \sigma + j\omega k_g \varepsilon_0 \varepsilon \quad (2.13)$$

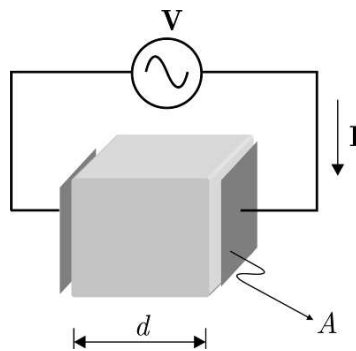


Figura 20. Exemplo de uma célula de medição. Tomado de Da Silva (2008).

Esta equação tem a mesma forma da admitância para um circuito composto de um resistor e um capacitor em paralelo. O resistor será identificado através da sua condutância G e o capacitor pela sua capacitância C , portanto

$$\mathbf{Y} = G + j\omega C. \quad (2.14)$$

Assim, podemos modelar a admitância de um fluido, identificando a condutância e a capacitância da seguinte forma

$$G = k_g \sigma \quad (2.15)$$

$$C = k_g \varepsilon_0 \varepsilon. \quad (2.16)$$

Pode-se ver na equação (2.14) que a admitância (ou a impedância) em baixas frequências está dominada pela condutividade estática ou resistência do fluido; enquanto, para frequências maiores, está dominada permissividade estática.

Um outro circuito básico para a medição da admitância (permissividade complexa), em baixas frequências, é a ponte autobalanceada, Figura 21. Este circuito está formado por um amplificador operacional retroalimentado que tem como circuito de entrada a célula de medição. A rede de retroalimentação é um circuito formado por uma resistência em paralelo com um capacitor. O resistor é identificado pela sua condutância G_f e o capacitor pela sua capacitância C_f .

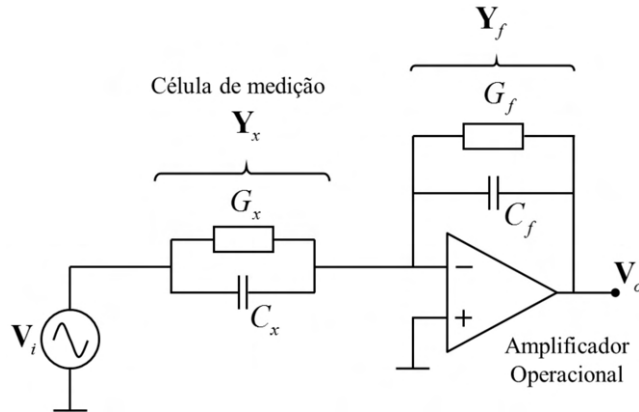


Figura 21. Ponte autobalanceada para a medição da admitância (permissividade complexa) de um fluido.

Pode-se encontrar a admitância do fluido $\mathbf{Y}_x$ se é conhecida a admitância de retroalimentação $\mathbf{Y}_f$ e o ganho de tensão $\mathbf{A}_v$ do sinal de entrada $\mathbf{V}_i$, que neste circuito estão relacionados por

$$\mathbf{A}_v = \frac{\mathbf{V}_o}{\mathbf{V}_i} = -\frac{\mathbf{Y}_x}{\mathbf{Y}_f}, \quad (2.17)$$

onde V_o é a tensão elétrica de saída e considerando o amplificador operacional ideal. Lembrando que a admitância do fluido pode ser representada como $Y_x = G_x + j\omega C_x$ e sabendo que $Y_f = G_f + j\omega C_f$ o ganho de tensão é

$$\frac{V_o}{V_i} = - \left(\frac{G_x + j\omega C_x}{G_f + j\omega C_f} \right) \quad (2.18)$$

onde $\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência de excitação. Este circuito tem uma resposta de magnitude em função da frequência dada por

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{\sqrt{G_x^2 + \omega^2 C_x^2}}{\sqrt{G_f^2 + \omega^2 C_f^2}} \quad (2.19)$$

como a mostrada na Figura 22. Esta resposta mostra duas bandas de frequência onde o ganho é plano (constante). Em frequências baixas ou platô de baixa o valor do ganho está dado pela razão

$$|A_v|_{\omega \rightarrow 0} = G_x / G_f, \quad (2.20)$$

enquanto no platô de alta o ganho está dado pela razão

$$|A_v|_{\omega \rightarrow \infty} = C_x / C_f. \quad (2.21)$$

Esses valores podem ser obtidos através da utilização do limite de ω tendendo a zero e infinito, respectivamente, na equação (2.19). Idealmente, o ganho, a frequência, G_f e C_f são conhecidos. Assim, se podem obter os valores G_x e C_x do fluido e fazer a sua identificação.

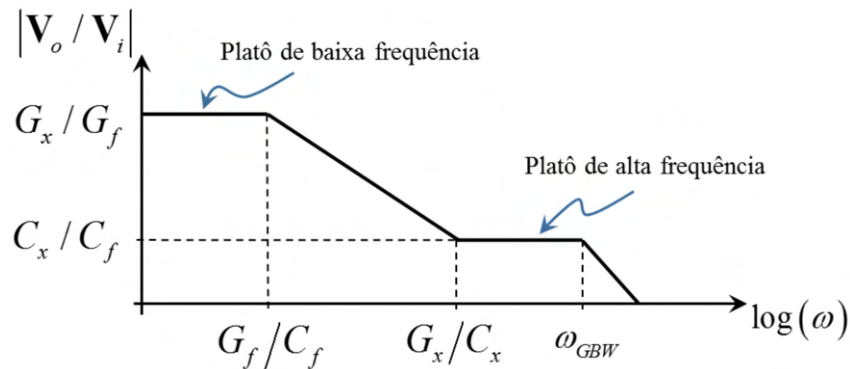


Figura 22. Resposta de magnitude simplificada para o circuito de medição ponte autobalanceada.

A Figura 22 também apresenta as frequências onde cada platô se deve apresentar. Uma destas frequências é determinada pelo denominador ou polo da equação do ganho, eq. (2.18). Portanto, essa frequência ω_f é determinada pelo circuito na retroalimentação

$$\omega_f = \frac{G_f}{C_f}, \quad (2.22)$$

sendo um valor fixo. A outra frequência está determinada pelo numerador ou zero. Isto é, depende da admitância do fluido. Essa frequência, denotada como ω_x , é dada por

$$\omega_x = \frac{G_x}{C_x} = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_0 \varepsilon_x}, \quad (2.23)$$

que em geral tem um valor variável, pois no caso de termos uma mistura que muda no tempo se espera uma mudança da condutividade e permissividade do fluido. Devido a essa variação se identificam três casos de comportamento para ω_x em relação a ω_f . A Tabela 4 apresenta os três casos e seus efeitos na resposta em magnitude e as faixas para cada platô. O caso $\omega_x > \omega_f$ é o caso ilustrado na Figura 22. Outra faixa que apresenta a Figura 22 é a de transição $\omega_f < \omega < \omega_x$ onde o ganho muda a uma razão de $\pm 20\text{dB/década}$. A última faixa $\omega > \omega_{GBW}$ se deve ao comportamento não ideal do amplificador operacional. Todo amplificador operacional tem uma limitação, dada pelo produto ganho por largura de banda (GBW). Esse tem um valor fixo, e quanto maior o ganho requerido do amplificador, menor será a largura de banda disponível. Isso impõe um polo na frequência citada.

Tabela 4. Possíveis casos de ω_x em relação a ω_f e seu efeito na resposta de magnitude do circuito ponte autobalanceada.

<i>Caso</i>	<i>Relação de ganho</i>	<i>Faixa para o platô de baixa</i>	<i>Faixa para o platô de alta</i>
$\omega_x < \omega_f$	$G_x / G_f < C_x / C_f$	$\omega < \omega_x$	$\omega > \omega_f$
$\omega_x = \omega_f$	$G_x / G_f = C_x / C_f$	-	-
$\omega_x > \omega_f$	$G_x / G_f > C_x / C_f$	$\omega < \omega_f$	$\omega > \omega_x$

A resposta de fase, em função da frequência, da ponte autobalanceada está dada por

$$|\mathbf{V}_o / \mathbf{V}_i| = 180^\circ + \tan^{-1}(\omega C_x / G_x) - \tan^{-1}(\omega C_f / G_f), \quad (2.24)$$

a está ilustrada na Figura 23. Como no caso da resposta de magnitude, se apreciam dois platôs, mas estes têm uma largura menor que na magnitude. Na faixa de transição, a fase pode subir ou descer. A frequência ω_M , onde atinge-se o valor máximo ou mínimo, é a média geométrica das frequências do polo e o zero, assim

$$\omega_M = \sqrt{\omega_x \omega_f} = \sqrt{\frac{\sigma_x}{\varepsilon_0 \varepsilon_x} \frac{G_f}{C_f}} \quad (2.25)$$

O valor desce se $\omega_x > \omega_f$ e aumenta no caso contrário. O segundo caso corresponde ao ilustrado na Figura 23. Observe que para uma escala de frequência logarítmica a resposta é simétrica ao redor de ω_M . A simetria se rompe em altas frequências devido a ω_{GBW} .

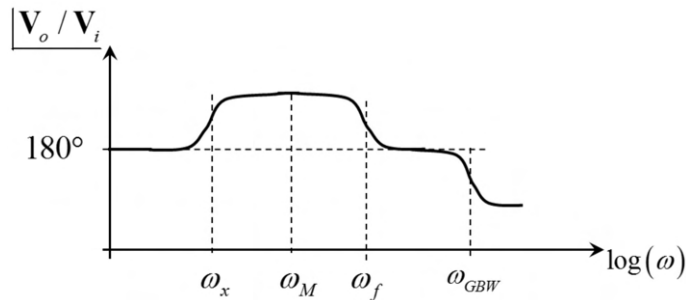


Figura 23. Resposta de fase simplificada para o circuito de medição ponte autobalanceada.

Da análise anterior se pode deduzir que a combinação que existe entre os valores da admitância da retroalimentação Y_f e os valores esperados da admitância do fluido Y_x pode mudar completamente a resposta do circuito. Portanto, a seleção dos componentes do circuito de retroalimentação é importante para um funcionamento adequado da ponte autobalanceada. Deste modo, uma simulação da resposta em magnitude e fase são apresentadas na Figura 24 e na Figura 25, respectivamente. Os fluidos usados e suas características são mostrados na Tabela 5. A tabela também apresenta as frequências do zero e média.

A Figura 26 apresenta a resposta em magnitude da ponte autobalanceada obtida por Da Silva (2008) para alguns fluidos selecionados. Em cada fluido se pode ver os dois platôs previstos pela eq. (2.19). Destaca-se que para o caso do ar e do óleo a frequência do zero aparenta estar na ordem de kHz. Isto não coincide com a resposta teórica e se explica porque se chegou ao limite inferior da tensão que o circuito é capaz de produzir. Em outras palavras, é a tensão de ruído do circuito. Também, destaca-se que a razão de ganhos entre diferentes fluidos não corresponde ao esperado. Por exemplo, a razão entre a água e o ar, em alta frequência, deve corresponder a razão entre as permissividades, isto é, $\epsilon_w / \epsilon_a = 79 / 1 = 79$. Mas da Figura 26 se estima que o valor está perto de 66 e esse valor está fora da faixa da incerteza da medição. Isto indica que no circuito real se apresentam outros fenômenos que não têm sido levados em consideração na análise do circuito teórico. Alguns das causas deste comportamento são a tensão de ruído térmico e elementos parasitas que não têm sido incluídos no modelo. Portanto, é necessário um processo de calibração para deduzir o valor real da permissividade.

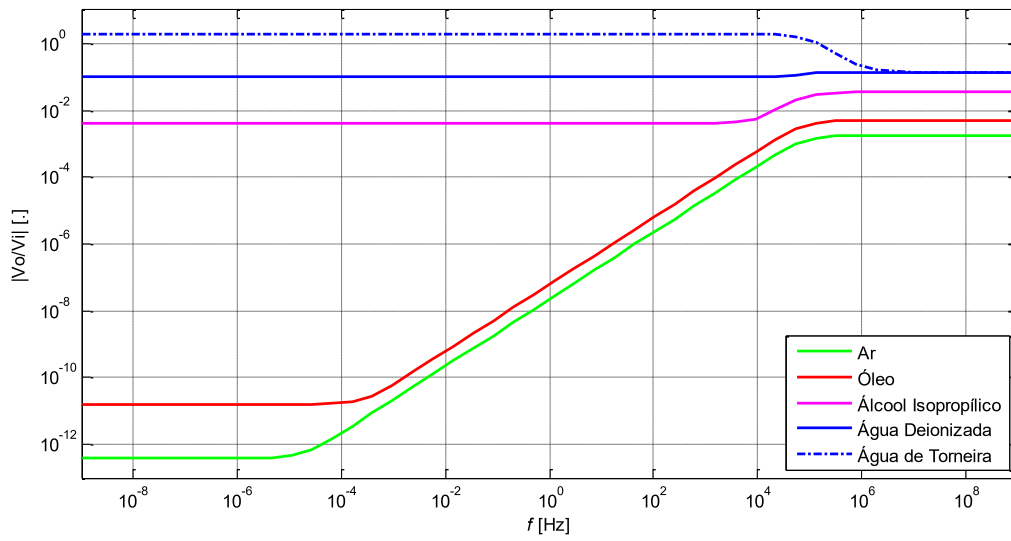


Figura 24. Resposta em magnitude, teórica, da ponte autobalanceada para fluidos selecionados, $G_f = 5 \mu\text{S}$, $C_f = 10 \text{ pF}$.

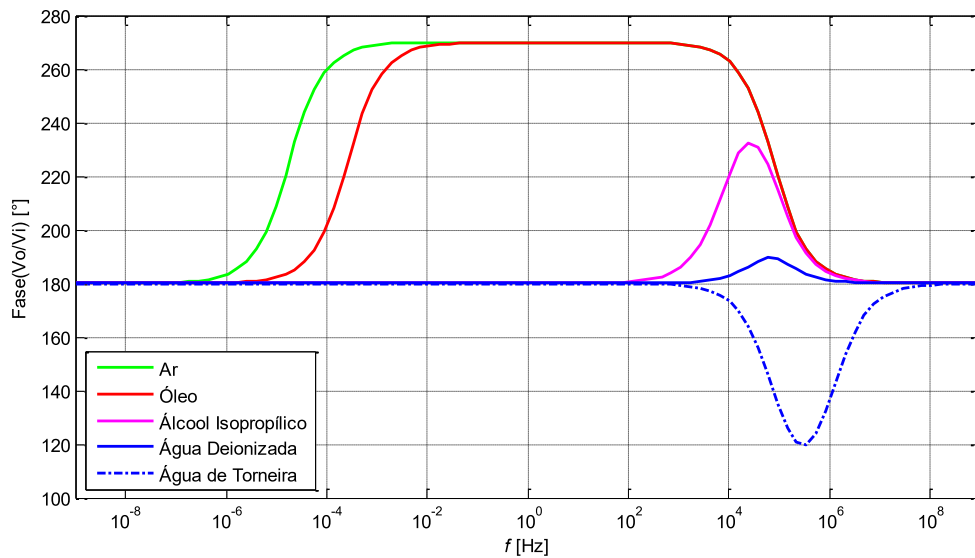


Figura 25. Resposta em fase, teórica, da ponte autobalanceada para fluidos selecionados, $G_f = 5 \mu\text{S}$, $C_f = 10 \text{ pF}$.

Tabela 5. Características elétricas dos fluidos usados na simulação da ponte autobalanceada, $G_f = 5 \mu\text{S}$, $C_f = 10 \text{ pF}$, $f_f = 79,57 \text{ kHz}$.

Fluido	Condutividade [S/m] σ_x	Permissividade Relativa [-] ϵ_x	Frequência do zero [Hz] $f_x = \sigma_x / 2\pi\epsilon_0\epsilon_x$	Frequência média [Hz] $f_M = \sqrt{\sigma_x G_f / 2\pi\epsilon_0\epsilon_x C_f}$
Ar	1×10^{-15}	1	$1,79 \times 10^{-5}$	2,99
Óleo	40×10^{-12}	2,78	$2,58 \times 10^{-4}$	11,37
Álcool Isopropílico	1×10^{-5}	19,74	$9,10 \times 10^3$	$6,74 \times 10^4$
Água Deionizada	$2,5 \times 10^{-4}$	79	$5,68 \times 10^4$	$1,68 \times 10^5$
Água de Torneira	5×10^{-3}	79	$1,13 \times 10^6$	$7,54 \times 10^5$

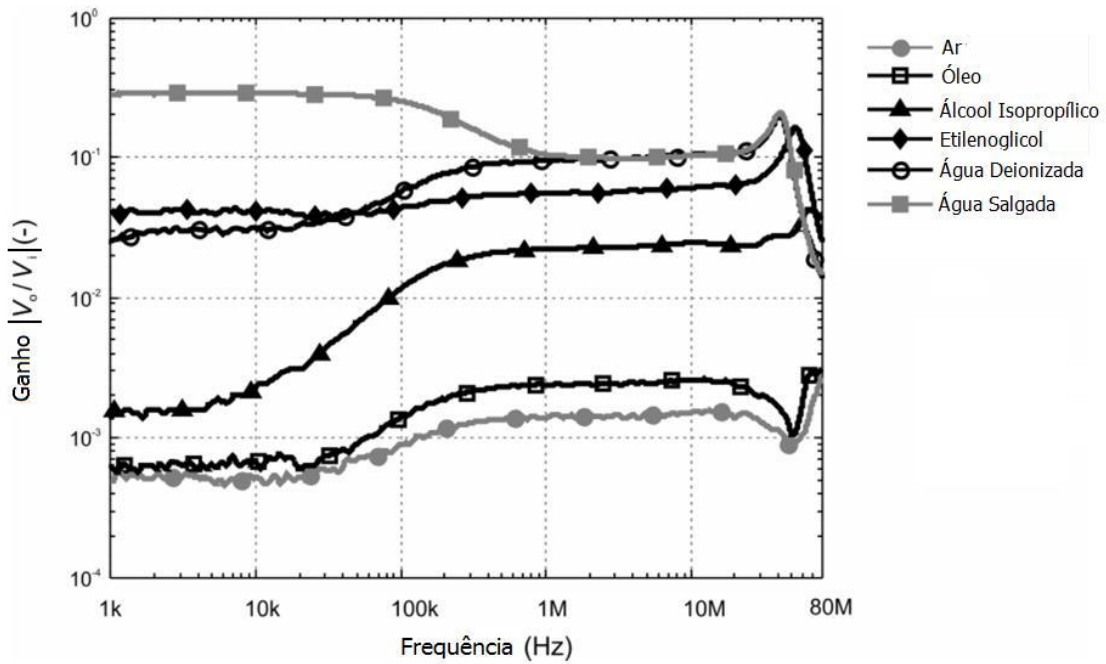


Figura 26. Resposta em frequência, obtida por Da Silva (2008), para fluidos selecionados medidos com o circuito da ponte autobalanceada da Figura 21. $G_f = 1 \mu S$ e $C_f = 10 pF$, Da Silva (2008).

2.1.4. Calibração da permissividade complexa

Devido à necessidade prática de um processo de calibração para a técnica da ponte autobalanceada, Da Silva (2008) propôs um modelo, onde se tem em conta uma admitância residual Y_R causada por capacitâncias e resistências parasitas, indutâncias dos cabos, deslocamento por temperatura, entre outros. Então, a admitância medida Y_M nos pontos de cruzamento pode ser descrita como

$$Y_M = Y_x + Y_R \quad (2.26)$$

onde Y_x é admitância dos fluidos. Assim, o ganho no circuito de medida é

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{Y_M}{Y_f} = \frac{-Y_x - Y_R}{Y_f} \quad (2.27)$$

Isolando a admitância do fluido, temos que apresenta uma relação linear com o ganho A_v ,

$$Y_x = -Y_R - A_v Y_f. \quad (2.28)$$

Lembrando que a admitância pode ser escrita em termos da permissividade complexa ϵ_x como

$$Y_x = j\omega k_g \epsilon_0 \epsilon_x, \quad (2.29)$$

onde

$$\boldsymbol{\varepsilon}_x = \varepsilon' + \varepsilon'' = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}. \quad (2.30)$$

Igualando as equações (2.28) e (2.29) temos que

$$\mathbf{Y}_x = j\omega k_g \varepsilon_0 \boldsymbol{\varepsilon}_x = -\mathbf{Y}_R - \mathbf{A}_v \mathbf{Y}_f \quad (2.31)$$

e isolando $\boldsymbol{\varepsilon}_x$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_x = -\frac{\mathbf{Y}_R}{j\omega k_g \varepsilon_0} - \frac{\mathbf{Y}_f}{j\omega k_g \varepsilon_0} \mathbf{A}_v = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{v} \mathbf{A}_v. \quad (2.32)$$

Assim, pode-se concluir que a permissividade complexa tem uma relação linear com o ganho $\mathbf{A}_v$ e uma calibração de dois pontos é suficiente para determinar as constantes complexas $\boldsymbol{\mu}$ e $\mathbf{v}$.

Assim, tomando dois fluidos conhecidos com permissividade complexa $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ e $\boldsymbol{\varepsilon}_2$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{v} \mathbf{A}_{v1} \quad (2.33)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_2 = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{v} \mathbf{A}_{v2} \quad (2.34)$$

e subtraindo a equação (2.33) e (2.34), temos que

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1 - \boldsymbol{\varepsilon}_2 = \mathbf{v} (\mathbf{A}_{v1} - \mathbf{A}_{v2}) \quad (2.35)$$

E isolando $\mathbf{v}$

$$\mathbf{v} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_1 - \boldsymbol{\varepsilon}_2}{\mathbf{A}_{v1} - \mathbf{A}_{v2}} \quad (2.36)$$

e substituindo $\mathbf{v}$ na equação (2.33) obtemos o valor de $\boldsymbol{\mu}$

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_2 \mathbf{A}_{v1} - \boldsymbol{\varepsilon}_1 \mathbf{A}_{v2}}{\mathbf{A}_{v1} - \mathbf{A}_{v2}}. \quad (2.37)$$

Então, lembrando que $\varepsilon - j\sigma / \varepsilon_0 \omega = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{v} \mathbf{A}_v$ conclui-se que

$$\varepsilon = \text{Re} \{ \boldsymbol{\mu} + \mathbf{v} \mathbf{A}_v \} \quad (2.38)$$

e

$$\sigma = -\varepsilon_0 \omega \text{Im} \{ \boldsymbol{\mu} + \mathbf{v} \mathbf{A}_v \} \quad (2.39)$$

2.1.5. Modelos de relação para escoamentos bifásicos

Para encontrar a relação entre a permissividade complexa medida $\boldsymbol{\varepsilon}_x$ (Eq. (2.32)) e a fração volumétrica de uma fase (Eq. (1.1)) é preciso usar um modelo que relacione essas duas

características. Existe uma grande quantidade de trabalhos que estimam a permissividade das misturas de fluidos e esses se concentram em misturas bifásicas gás-líquido. Jaworek; Krupa (2010) e Sihvola (1999) apresentam resumos de diferentes modelos da literatura. Cada um deles foi desenvolvido para uma geometria de sensor e um padrão de escoamento específicos. Alguns autores consideram que esses modelos são válidos considerando que a permissividade complexa é dominada pela sua parte real, isto é, para materiais isolantes. Outros autores consideram que são válidos inclusive para materiais condutores (chamados com perda), mas observam que é uma aproximação grosseira, Sihvola (1999). Mas existem modelos que têm sido especialmente desenvolvidos para materiais com perdas, com certas restrições. Esse é o caso da relação de Maxwell-Garnett.

Podem-se reconhecer duas grandes famílias de relações. A primeira faz diferença entre a fase contínua e a fase dispersa, essas relações são chamadas de não-autoconsistentes. Em quanto a outra família não faz essa distinção, sendo chamadas de autoconsistentes. Na primeira família, um exemplo típico é Maxwell-Garnett, e um exemplo de autoconsistente é o Paralelo.

Em escoamento bifásico não se precisa obter a condutividade e a permissividade, precisa-se somente de uma delas. Geralmente, se prefere medir a permissividade. Assim, na Tabela 6, apresenta-se a fração da fase dispersa α_2 como uma função da permissividade de uma mistura ε_x e as constantes ε_2 e ε_1 , que são as permissividades relativas dos fluidos que a compõem; ε_2 corresponde ao fluido da fase dispersa, e ε_1 ao fluido da fase contínua. Como se mostrará mais diante, o resultado é dependente do modelo usado. A Tabela 6 apresenta alguns dos modelos de relação mais usados na literatura e que foram usados neste trabalho, sendo dois deles não-autoconsistentes, Maxwell-Garnett e Hannai.

Algumas das relações apresentadas são casos particulares de outras relações. Por exemplo Birchak e Looyenga são casos particulares da família de Lei de potência. Outras relações podem ser ainda mais complexas do que as aqui apresentadas. Esse é o caso da equação de Maxwell-Garnett, que pode levar em consideração a polaridade que apresentam as partículas dispersas e sua geometria; assim a equação apresentada corresponde à fórmula clássica, onde a fase dispersa são gotículas perfeitamente esféricas. Os modelos Paralelo e Séries são chamados de limites de Wiener porque estabelecem os valores máximos e mínimos que pode assumir uma mistura.

Tabela 6. Modelos de relação entre a fração da fase dispersa α_2 e a permissividade de uma mistura bifásica ε_x .

Modelo	Características	Equação
Bruggeman 1	Vazios cilíndricos (padrão anular)	$\alpha_2 = \frac{(\varepsilon_x + \varepsilon_2)(\varepsilon_x - \varepsilon_1)}{2\varepsilon_x(\varepsilon_2 - \varepsilon_x)}$ (2.40)
Bruggeman 2	Vazios esféricos (padrão bolhas)	$\alpha_2 = \frac{(2\varepsilon_x + \varepsilon_2)(\varepsilon_x - \varepsilon_1)}{3\varepsilon_x(\varepsilon_2 - \varepsilon_x)}$ (2.41)
Bruggeman 3	Vazios sem ordem (padrão agitado)	$\alpha_2 = \frac{\varepsilon_2(\varepsilon_x^2 - \varepsilon_1^2)}{(\varepsilon_x^2 - \varepsilon_1\varepsilon_2)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}$ (2.42)
Bruggeman-Maxwell-Wagner	Escoamento disperso água em óleo	$\alpha_2 = \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}\right)\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_x}\right)^{1/3}$ (2.43)
Séries	Placas paralelas, escoamento estratificado	$\alpha_2 = \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_x}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}\right)\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_x}\right)$ (2.44)
Paralelo	Placas paralelas, escoamento pistonado	$\alpha_2 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_x}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}$ (2.45)
Maxwell-Garnett	Suspensão de partículas de σ_L baixa, com $\sigma_L < \sigma_H$ e $\varepsilon_L \ll \varepsilon_H$ (padrão disperso óleo em água)	$\alpha_2 = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_x)(2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(2\varepsilon_1 + \varepsilon_x)}^*$ (2.46)
Hannai		$\alpha_2 = 1 - \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_x}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}\right)\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_x}\right)^{1/3}^*$ (2.47)
Lei de potência		$\alpha_2 = \frac{\varepsilon_x^\beta - \varepsilon_1^\beta}{\varepsilon_2^\beta - \varepsilon_1^\beta}, \text{ para } 0 \leq \beta \leq 1$ (2.48)
Looyenga		$\alpha_2 = \frac{\varepsilon_x^{1/3} - \varepsilon_1^{1/3}}{\varepsilon_2^{1/3} - \varepsilon_1^{1/3}}$ (2.49)
Birchak		$\alpha_2 = \frac{\varepsilon_x^{1/2} - \varepsilon_1^{1/2}}{\varepsilon_2^{1/2} - \varepsilon_1^{1/2}}$ (2.50)
Logarítmico		$\alpha_2 = \frac{\ln \varepsilon_x - \ln \varepsilon_1}{\ln \varepsilon_2 - \ln \varepsilon_1}$ (2.51)

* Relação não-autoconsistente.

Para ilustrar a aplicação de uma relação num escoamento, mostra-se a seguir a obtenção do modelo de relação paralelo, considerando só a parte real da permissividade complexa. A Figura 27 mostra como deveria ser a topologia do escoamento bifásico para a obtenção da equação do modelo paralelo (2.45). Essa é válida se temos um escoamento com fases escoando intermitentemente entre placas condutoras paralelas. Isto é parecido com um escoamento pistonado, se o pistão ocupa toda a seção transversal A_T do tubo e está dentro do comprimento

l do sensor. Assim, a capacitância equivalente da mistura C_x poder-se-ia escrever como a soma das capacitâncias de cada parte de água e gás, pois do ponto de vista de circuitos elétricos essas se encontram em paralelo, isto é

$$C_x = C_{w1} + C_{g1} + C_{g2} + C_{g2} + C_{g3} \dots \quad (2.52)$$

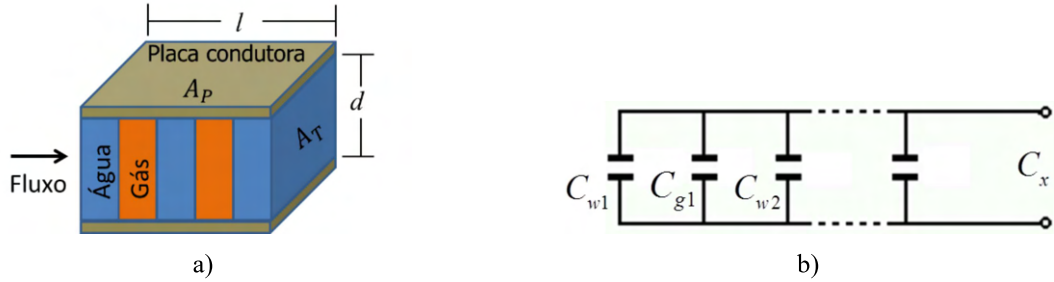


Figura 27. a) Diagrama esquemático de um capacitor de placas paralelas por onde escoar um fluxo intermitente bifásico água-gás; b) circuito elétrico equivalente.

Agora, supondo que num capacitor de placas paralelas a capacitância esteja dada segundo as equações (2.12) e (2.16), e sabendo que as placas estão separadas em uma altura d , tem-se uma área A_P e esta área é formada pela soma das áreas ocupadas por cada parte de água A_{wi} e cada parte de gás A_{gi}

$$A_P = A_{w1} + A_{g1} + A_{w2} + A_{g2} + A_{w3} \dots \quad (2.53)$$

Então, se pode escrever a capacitância equivalente da mistura C_x como

$$\frac{A_P}{d} \epsilon_0 \epsilon_x = \frac{A_{w1}}{d} \epsilon_0 \epsilon_w + \frac{A_{g1}}{d} \epsilon_0 \epsilon_g + \frac{A_{w2}}{d} \epsilon_0 \epsilon_w + \frac{A_{g2}}{d} \epsilon_0 \epsilon_g + \frac{A_{w3}}{d} \epsilon_0 \epsilon_w \dots \quad (2.54)$$

Por último, como sabemos, a área total ocupada pelo gás e pela água se podem escrever como

$$\begin{aligned} A_{g1} + A_{g2} + A_{g3} + \dots &= \alpha_g A_P \\ A_{w1} + A_{w2} + A_{w3} + \dots &= (1 - \alpha_g) A_P, \end{aligned} \quad (2.55)$$

respectivamente, então, a equação (2.54) se pode escrever como

$$\epsilon_x = (1 - \alpha_g) \epsilon_w + \alpha_g \epsilon_g \quad (2.56)$$

e isolando desta a fração de gás α_g , se tem finalmente a equação (2.45)

$$\alpha_g = \frac{\epsilon_x - \epsilon_w}{\epsilon_g - \epsilon_w}$$

Deve-se observar que na dedução dessa equação não é levado a conta que (2.12) é válida se a altura d que separa as placas é pequena para evitar a dispersão do campo elétrico pelas bordas, condição que não é cumprida numa tubulação. Também pode ser visto que a hipótese

de ter vários pistões dentro do sensor não é viável na realidade se os pistões são de grande comprimento.

As equações apresentadas na Tabela 6 só são válidas para escoamentos bifásicos, mas cada uma tem sua aplicação e responde de uma forma diferente. A Figura 28 mostra o efeito da fração de gás α_g na permissividade relativa efetiva ε_x , para uma mistura ar-água, usando alguns dos modelos citados. É evidente que escolher o modelo correto é essencial para obter o valor correto de α_g .

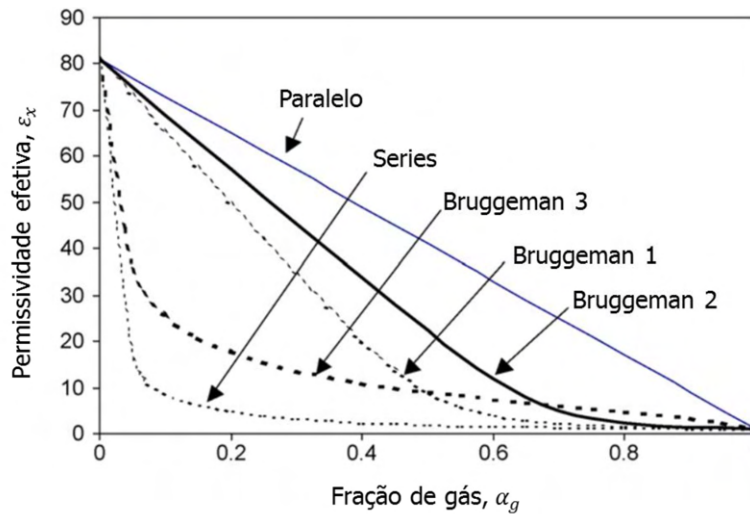


Figura 28. Efeito da fração de gás na permissividade relativa efetiva, para uma mistura ar-água, usando alguns dos modelos da Tabela 6. $\varepsilon_2 = \varepsilon_{ar} = 1$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_w = 80$. Tomado de Jaworek; Krupa (2010).

Os modelos não-autoconsistentes têm uma explicação desde um ponto de vista físico que se adapta bem as condições reais de escoamentos multifásicos. Quando se tem dois líquidos imiscíveis existem dois tipos de dispersões que se podem formar dependendo das condições da mistura. Uma dispersão de água no óleo (w/O) se forma quando a água está dispersa no óleo e a dispersão óleo na água (o/W) se forma quando o óleo está disperso na água. A inversão da fase é o fenômeno onde as fases de uma dispersão líquido-líquido intercambiam-se tal que a fase dispersa se converte na fase contínua de forma espontânea e vice-versa. As condições para o intercambio dependem das condições da mistura (PIELA et al., 2009). Portanto, os modelos não-autoconsistentes buscam explicar a fração dependendo de qual seja a fase dispersa. O modelo não-autoconsistente Maxwell-Garnett pode ser o modelo mais estudado e aplicado num grande número de experimentos nas mais diversas condições. Esse modelo foi o aplicado no trabalho de Dykesteen et al. (1985) apresentado no capítulo anterior e ilustrado na Figura 12b.

A aplicação dos modelos de relação no sensor *wire-mesh* foi feita no trabalho de Da Silva et al. (2011), realizado no NETeF. Nesse se determinou que a melhor relação para uma

mistura altamente dispersa de óleo em água é dada pelo modelo de Maxwell-Garnett w/O (água dispersa no óleo), equação (2.46), que foi desenvolvida para uma mistura semelhante à utilizada. Nesse caso, a fração do fluido com menor permissividade, nas equações, corresponde à fração de óleo α_o procurada. Os autores comparam a fração de óleo com a obtida experimentalmente, usando válvulas de fechamento rápido. Nos resultados se pôde observar que os modelos Logarítmico e Maxwell-Garnett w/O apresentaram a melhor correspondência com os resultados experimentais e a teoria. O modelo Maxwell-Garnett w/O trabalha bem entre $0,05 < \alpha_{o,QCV} < 0,3$ quando se tem óleo disperso na água (Do/W); enquanto o Logarítmico trabalha entre $0,2 < \alpha_{o,QCV} < 0,45$, quando se tem óleo disperso na água e água dispersa no óleo (Do/W&w/O). Então se tem regiões onde, dependendo do padrão de escoamento, passa-se de um modelo de permissividade para outro. Isto é semelhante aos resultados apresentados por Dykesteen et al. (1985), citado anteriormente na Figura 12b, onde se apresenta uma relação altamente não linear que depende da fase contínua, e dizer, do padrão de escoamento. Também se deve destacar que no trabalho de Da Silva et al. (2011) o modelo de Maxwell-Garnett foi usado como autoconsistente, na sua versão w/O, e a pesar disso foi o que melhor explicou a frações dos experimentos Do/W, na faixa estabelecida.

Em geral, a identificação dos fluidos é feita usando relações conhecidas entre os efeitos da condutância ou capacitância na amplitude de um sinal e a frações das fases. Mas outros autores, como Jaworek e Krupa (2010), identificam a fração das fases por meio do deslocamento da fase do sinal que produz o escoamento (Figura 29). Neste caso, o modelo de relação é entre deslocamento de fase e a fração, que pode ser mais complexo do que os já apresentados. Segundo os autores, o uso da fase melhora a precisão da detecção em misturas água-ar, em comparação com métodos de detecção baseados na amplitude do sinal.

Cada modelo de relação foi desenvolvido para certas características de distribuição das fases (padrão), forma que tem a fase dispersa, *holdup* da fase dispersa, características elétricas dos fluidos, campo elétrico e distribuição física dos eletrodos (Tabela 6). Além disso, os resultados apresentam diferenças significativas com a teoria. Então, o uso destes modelos de relação devem ter em consideração estas restrições, além de algumas outras que possam derivar de cada experimento particular, por exemplo: a mudança no padrão de escoamento, a técnica de medição e sua precisão, a presença de íons nos fluidos, entre outros.

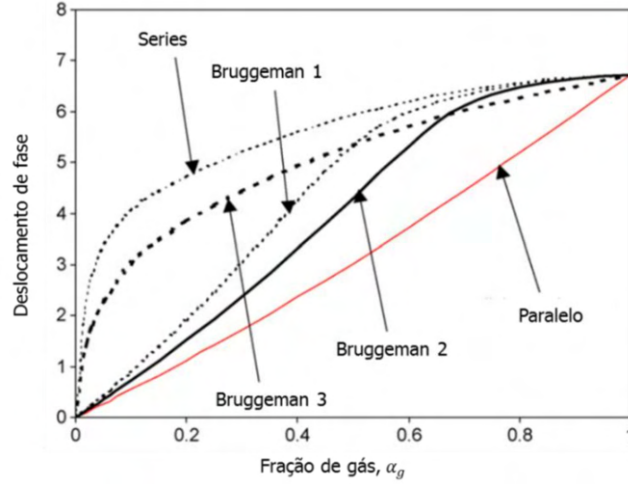


Figura 29. Deslocamento da fase, por Jaworek; Krupa (2010), entre o sinal medido a partir de um sensor capacitivo e sua referência. Experimento com uma mistura água-ar usando alguns dos modelos da Tabela 6.

2.1.6. Modelos de relação para misturas trifásicas

Na literatura se encontram poucos modelos de relação que permitam deduzir as frações das fases a partir da permissividade complexa. A seguir são apresentados os modelos Paralelo, Series, Bruggeman, Maxwell-Garnett homogêneo. Os dois primeiros modelos foram deduzidos para o presente estudo, a partir de teoria de circuitos, e os modelos de Bruggeman e Maxwell-Garnett foram extraídos de Sihvola (1999). As simulações apresentadas nesta seção foram feitas com os valores de fluidos apresentados na Tabela 5.

a. Modelo paralelo

Partindo da definição de admitâncias em paralelo, temos que

$$\mathbf{Y}_x = \mathbf{Y}_{11} + \mathbf{Y}_{21} + \mathbf{Y}_{31} + \mathbf{Y}_{12} + \mathbf{Y}_{21} + \dots \quad (2.57)$$

e considerando uma geometria de placas paralelas como na Figura 27

$$k_g \epsilon_0 \epsilon_x = k_{g11} \epsilon_0 \epsilon_1 + k_{g21} \epsilon_0 \epsilon_2 + k_{g31} \epsilon_0 \epsilon_3 + k_{g12} \epsilon_0 \epsilon_1 + \dots \quad (2.58)$$

$$k_g \epsilon_x = \epsilon_1 (k_{g11} + k_{g12} + \dots) + \epsilon_2 (k_{g21} + k_{g22} + \dots) + \epsilon_3 (k_{g31} + k_{g32} + \dots) \quad (2.59)$$

ou

$$k_g \epsilon_x = \epsilon_1 k_g \alpha_1 + \epsilon_2 k_g \alpha_2 + \epsilon_3 k_g \alpha_3. \quad (2.60)$$

Então,

$$\epsilon_x = \epsilon_1 (1 - \alpha_2 - \alpha_3) + \epsilon_2 \alpha_2 + \epsilon_3 \alpha_3, \quad (2.61)$$

onde α_i é a fração volumétrica da i -ésima fase. Como sua contraparte bifásica, este modelo é autoconsistente. A Figura 30 apresenta a resposta do modelo Paralelo para uma mistura trifásica óleo-água-ar. O modelo é independente da frequência.

Separando a parte real e imaginária podem-se deduzir a permissividade e a condutividade da mistura, seção 2.1.4, e é possível determinar as frações das fases, rearranjando a equação (2.61) como função das frações e separando-a nas suas partes real e imaginária, além de usar a equação da continuidade. Então, a equação pode ser escrita como

$$\mathbf{S} = \alpha_2 \mathbf{T} + \alpha_3 \mathbf{U}, \quad (2.62)$$

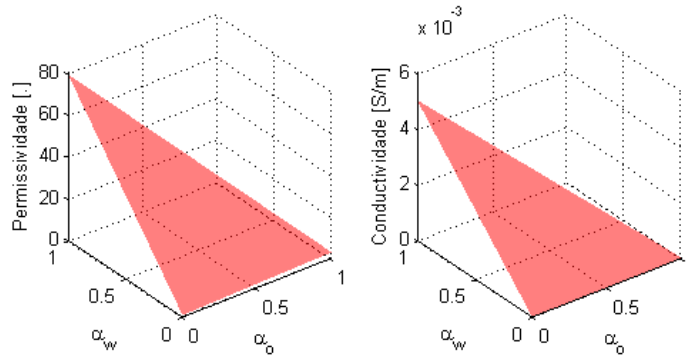


Figura 30. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo Paralelo para qualquer frequência.

onde

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\varepsilon}_x - \boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad (2.63)$$

$$\mathbf{T} = (\boldsymbol{\varepsilon}_2 - \boldsymbol{\varepsilon}_1) \quad (2.64)$$

$$\mathbf{U} = (\boldsymbol{\varepsilon}_3 - \boldsymbol{\varepsilon}_1) \quad (2.65)$$

Portanto, podemos escrever um sistema de equações

$$\begin{bmatrix} 0 & \text{Re}(\mathbf{T}) & \text{Re}(\mathbf{U}) \\ 0 & \text{Im}(\mathbf{T}) & \text{Im}(\mathbf{U}) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{S}) \\ \text{Im}(\mathbf{S}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

e resolvê-lo para obter o valor das frações

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \text{Re}(\mathbf{T}) & \text{Re}(\mathbf{U}) \\ 0 & \text{Im}(\mathbf{T}) & \text{Im}(\mathbf{U}) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{S}) \\ \text{Im}(\mathbf{S}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

onde

$$\text{Re}(\mathbf{T}) = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \quad (2.68)$$

$$\text{Re}(\mathbf{U}) = \varepsilon_3 - \varepsilon_1 \quad (2.69)$$

$$\text{Re}(\mathbf{S}) = \varepsilon_x - \varepsilon_1 \quad (2.70)$$

$$\text{Im}(\mathbf{T}) = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\omega \epsilon_0} \quad (2.71)$$

$$\text{Im}(\mathbf{U}) = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\omega \epsilon_0} \quad (2.72)$$

$$\text{Im}(\mathbf{S}) = \frac{\sigma_1 - \sigma_x}{\omega \epsilon_0}. \quad (2.73)$$

b. Modelo series

Partindo da definição de admitâncias para um circuito serie,

$$\frac{1}{\mathbf{Y}_x} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{11}} + \frac{1}{\mathbf{Y}_{21}} + \frac{1}{\mathbf{Y}_{31}} + \frac{1}{\mathbf{Y}_{12}} + \frac{1}{\mathbf{Y}_{22}} + \dots, \quad (2.74)$$

temos que chega-se a permissividade da mistura

$$\epsilon_x = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3}{\epsilon_2 \epsilon_3 + \alpha_2 (\epsilon_1 \epsilon_3 - \epsilon_2 \epsilon_3) + \alpha_3 (\epsilon_1 \epsilon_2 - \epsilon_2 \epsilon_3)} \quad (2.75)$$

A resposta deste modelo se apresenta na Figura 31 para 1MHz. Se pode ver como os elementos não condutores, óleo e ar, dominam a resposta na maior parte da superfície. O modelo Series é dependente da frequência e para os valores usados o modelo entrega valores maiores aos máximos (os valores da água) para frequências menores a 576 kHz e altas frações de água. Isto se ilustra na Figura 32 para uma frequência de 100 kHz.

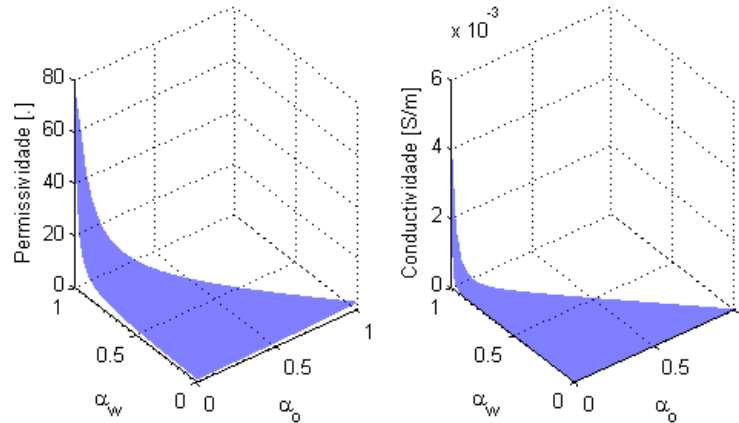


Figura 31. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo Series para uma frequência $f=1$ MHz.

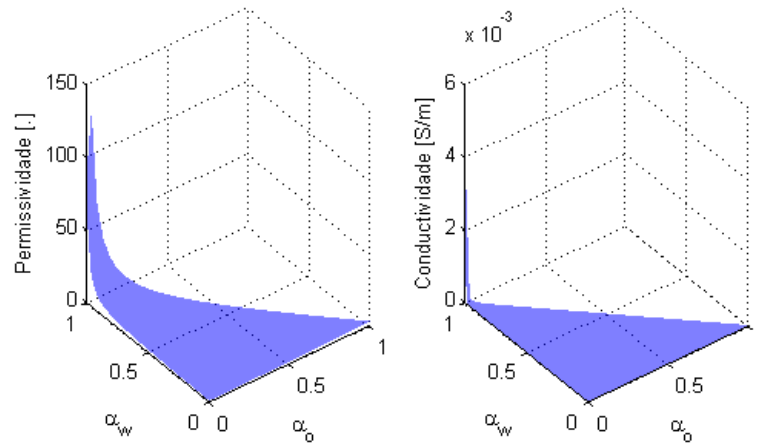


Figura 32. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo Series para uma frequência $f=100$ kHz.

A equação (2.75) pode ser escrita como

$$\mathbf{S} = \alpha_2 \mathbf{T} + \alpha_3 \mathbf{U}, \quad (2.76)$$

onde

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\varepsilon}_1 \boldsymbol{\varepsilon}_2 \boldsymbol{\varepsilon}_3 - \boldsymbol{\varepsilon}_2 \boldsymbol{\varepsilon}_3 \boldsymbol{\varepsilon}_x \quad (2.77)$$

$$\mathbf{T} = \boldsymbol{\varepsilon}_1 \boldsymbol{\varepsilon}_3 \boldsymbol{\varepsilon}_x - \boldsymbol{\varepsilon}_2 \boldsymbol{\varepsilon}_3 \boldsymbol{\varepsilon}_x \quad (2.78)$$

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\varepsilon}_1 \boldsymbol{\varepsilon}_2 \boldsymbol{\varepsilon}_x - \boldsymbol{\varepsilon}_2 \boldsymbol{\varepsilon}_3 \boldsymbol{\varepsilon}_x \quad (2.79)$$

Podemos escrever como um sistema de equações e resolver para obter o valor das frações.

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \text{Re}(\mathbf{T}) & \text{Re}(\mathbf{U}) \\ 0 & \text{Im}(\mathbf{T}) & \text{Im}(\mathbf{U}) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{S}) \\ \text{Im}(\mathbf{S}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

onde

$$\begin{aligned} \text{Re}(\mathbf{T}) &= \varepsilon_3 \varepsilon_x (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdots \\ &\dots - \frac{\varepsilon_x \sigma_1 \sigma_3 - \varepsilon_x \sigma_2 \sigma_3 + \varepsilon_3 \sigma_1 \sigma_x + \varepsilon_3 \sigma_1 \sigma_x - \varepsilon_2 \sigma_3 \sigma_x - \varepsilon_3 \sigma_2 \sigma_x}{(\omega \varepsilon_0)^2} \end{aligned} \quad (2.81)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}(\mathbf{U}) &= \varepsilon_2 \varepsilon_x (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \cdots \\ &\dots - \frac{\varepsilon_x \sigma_1 \sigma_2 - \varepsilon_x \sigma_2 \sigma_3 + \varepsilon_1 \sigma_2 \sigma_x + \varepsilon_2 \sigma_1 \sigma_x - \varepsilon_2 \sigma_3 \sigma_x - \varepsilon_3 \sigma_2 \sigma_x}{(\omega \varepsilon_0)^2} \end{aligned} \quad (2.82)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}(\mathbf{S}) &= \varepsilon_2 \varepsilon_3 (\varepsilon_1 - \varepsilon_x) \cdots \\ &\dots - \frac{\varepsilon_1 \sigma_2 \sigma_3 + \varepsilon_2 \sigma_1 \sigma_3 + \varepsilon_3 \sigma_1 \sigma_2 - \varepsilon_x \sigma_2 \sigma_3 - \varepsilon_2 \sigma_3 \sigma_x - \varepsilon_3 \sigma_2 \sigma_x}{(\omega \varepsilon_0)^2} \end{aligned} \quad (2.83)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(\mathbf{T}) = & \frac{\sigma_3 \sigma_x (\sigma_1 - \sigma_2)}{(\omega \varepsilon_0)^3} \dots \\ & \dots - \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_x \sigma_3 + \varepsilon_3 \varepsilon_x \sigma_1 - \varepsilon_2 \varepsilon_x \sigma_3 - \varepsilon_3 \varepsilon_x \sigma_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_3 \sigma_x - \varepsilon_2 \varepsilon_3 \sigma_x}{\omega \varepsilon_0} \end{aligned} \quad (2.84)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(\mathbf{U}) = & \frac{\sigma_2 \sigma_x (\sigma_1 - \sigma_3)}{(\omega \varepsilon_0)^3} \dots \\ & \dots - \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_x \sigma_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_x \sigma_1 - \varepsilon_2 \varepsilon_x \sigma_3 - \varepsilon_3 \varepsilon_x \sigma_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma_x - \varepsilon_2 \varepsilon_3 \sigma_x}{\omega \varepsilon_0} \end{aligned} \quad (2.85)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(\mathbf{S}) = & \frac{\sigma_2 \sigma_3 (\sigma_1 - \sigma_x)}{(\omega \varepsilon_0)^3} \dots \\ & \dots - \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma_3 + \varepsilon_1 \varepsilon_3 \sigma_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 \sigma_1 - \varepsilon_2 \varepsilon_x \sigma_3 - \varepsilon_3 \varepsilon_x \sigma_2 - \varepsilon_2 \varepsilon_3 \sigma_x}{\omega \varepsilon_0} \end{aligned} \quad (2.86)$$

c. Modelo Bruggeman

A partir da condição de auto consistência do Bruggeman para N fases

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_x}{\varepsilon_n - 2\varepsilon_x} = 0, \quad (2.87)$$

onde n denota a fase n -ésima, se pode deduzir a equação para três fases como

$$\alpha_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_x}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_x} + \alpha_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_x}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_x} + \alpha_3 \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_x}{\varepsilon_3 + 2\varepsilon_x} = 0, \quad (2.88)$$

e rearranjando

$$\varepsilon_x = \frac{\varepsilon_1}{3} - \frac{\varepsilon_2}{6} - \frac{\varepsilon_3}{6} - \frac{\alpha_2 \varepsilon_1}{2} + \frac{\alpha_2 \varepsilon_2}{2} - \frac{\alpha_3 \varepsilon_1}{2} + \frac{\alpha_3 \varepsilon_3}{2} + \mathbf{F} + \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{F}} \quad (2.89)$$

onde

$$\mathbf{F} = \left\{ \left[\left(\frac{\mathbf{L}^3}{27} + \mathbf{M} - \mathbf{O} \right)^2 - \mathbf{P}^3 \right]^{1/2} - \frac{\mathbf{L}^3}{27} - \mathbf{M} + \mathbf{O} \right\}^{1/3} \quad (2.90)$$

$$\mathbf{P} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{6} + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_3}{6} - \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{12} + \frac{L^2}{9} - \frac{\alpha_2 \varepsilon_1 \varepsilon_3}{4} - \frac{\alpha_3 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{4} + \frac{\alpha_2 \varepsilon_2 \varepsilon_3}{4} + \frac{\alpha_3 \varepsilon_2 \varepsilon_3}{4} \quad (2.91)$$

$$\mathbf{M} = \frac{\left(\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_3}{2} - \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{4} - \frac{3\alpha_2 \varepsilon_1 \varepsilon_3}{4} - \frac{3\alpha_3 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{4} + \frac{3\alpha_2 \varepsilon_2 \varepsilon_3}{4} + \frac{3\alpha_3 \varepsilon_2 \varepsilon_3}{4} \right) \mathbf{L}}{6} \quad (2.92)$$

$$\mathbf{O} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3}{8} \quad (2.93)$$

$$\mathbf{L} = \frac{\epsilon_2}{2} - \epsilon_1 + \frac{\epsilon_3}{2} + \frac{3\alpha_2\epsilon_1}{2} - \frac{3\alpha_2\epsilon_2}{2} + \frac{3\alpha_3\epsilon_1}{2} - \frac{3\alpha_3\epsilon_3}{2} \quad (2.94)$$

A Figura 33 e Figura 34 mostram a permissividade e a condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar para $f=500$ kHz e $f=1$ MHz, respectivamente. Para os valores considerados dos fluidos a resposta de Bruggeman é dependente da frequência. Para frequências menores de 523 kHz a resposta do modelo pode não ser única ou pode prever valores errados (iguais a zero), se a fração de água é maior a 0,34, Figura 33.

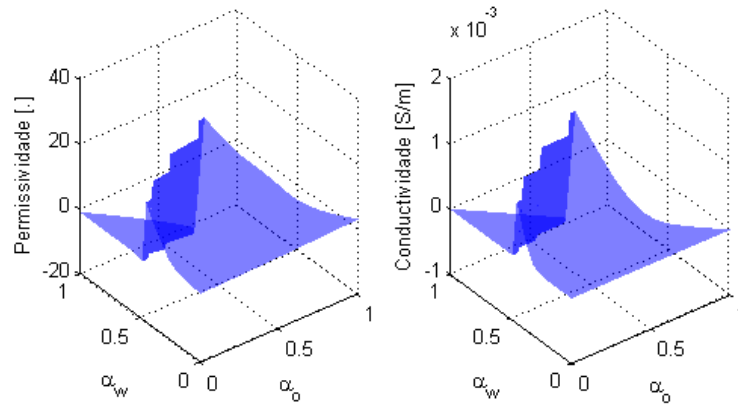


Figura 33. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo de Bruggeman para uma frequência $f=500$ kHz.

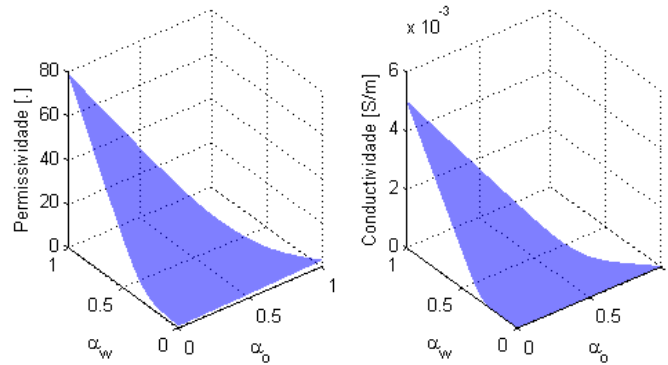


Figura 34. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo de Bruggeman para uma frequência $f=1$ MHz.

Para achar as frações da fases a equação (2.88) se pode escrever como

$$\mathbf{S} = \alpha_2 \mathbf{T} + \alpha_3 \mathbf{U} \quad (2.95)$$

onde

$$\mathbf{S} = -(\epsilon_1 - \epsilon_x)(\epsilon_2 + 2\epsilon_x)(\epsilon_3 + 2\epsilon_x), \quad (2.96)$$

$$\mathbf{T} = (\epsilon_2 - \epsilon_x)(\epsilon_1 + 2\epsilon_x)(\epsilon_3 + 2\epsilon_x) - (\epsilon_1 - \epsilon_x)(\epsilon_2 + 2\epsilon_x)(\epsilon_3 + 2\epsilon_x), \quad (2.97)$$

$$\mathbf{U} = (\epsilon_3 - \epsilon_x)(\epsilon_1 + 2\epsilon_x)(\epsilon_2 + 2\epsilon_x) - (\epsilon_1 - \epsilon_x)(\epsilon_2 + 2\epsilon_x)(\epsilon_3 + 2\epsilon_x). \quad (2.98)$$

Separando a parte real e a imaginaria e usando a equação de continuidade se obtém as frações

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \text{Re}(\mathbf{T}) & \text{Re}(\mathbf{U}) \\ 0 & \text{Im}(\mathbf{T}) & \text{Im}(\mathbf{U}) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{S}) \\ \text{Im}(\mathbf{S}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.99)$$

onde

$$\begin{aligned} \text{Re}(\mathbf{T}) = & \frac{(6\varepsilon_1\sigma_x^2 - 6\varepsilon_2\sigma_x^2 + 3\varepsilon_x\sigma_1\sigma_3 - 3\varepsilon_x\sigma_2\sigma_3 + 3\varepsilon_1\sigma_3\sigma_x \dots \\ & \dots + 3\varepsilon_3\sigma_1\sigma_x - 3\varepsilon_2\sigma_3\sigma_x - 3\varepsilon_3\sigma_2\sigma_x + 12\varepsilon_x\sigma_1\sigma_x - 12\varepsilon_x\sigma_2\sigma_x)}{(\omega\varepsilon_0)^2} - \mathbf{W}, \end{aligned} \quad (2.100)$$

$$\mathbf{W} = 3\varepsilon_x(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_3 + 2\varepsilon_x) \quad (2.101)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}(\mathbf{U}) = & \frac{(6\varepsilon_1\sigma_x^2 - 6\varepsilon_3\sigma_x^2 + 3\varepsilon_x\sigma_1\sigma_2 - 3\varepsilon_x\sigma_2\sigma_3 + 3\varepsilon_1\sigma_2\sigma_x \dots \\ & \dots + 3\varepsilon_2\sigma_1\sigma_x - 3\varepsilon_2\sigma_3\sigma_x - 3\varepsilon_3\sigma_2\sigma_x + 12\varepsilon_x\sigma_1\sigma_x - 12\varepsilon_x\sigma_3\sigma_x)}{(\omega\varepsilon_0)^2} - \mathbf{E} \end{aligned} \quad (2.102)$$

$$\mathbf{E} = 3\varepsilon_x(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)(\varepsilon_2 + 2\varepsilon_x) \quad (2.103)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}(\mathbf{S}) = & \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_x) \left(\frac{\sigma_2 + 2\sigma_x}{\omega\varepsilon_0} \right) + (\varepsilon_2 + 2\varepsilon_x) \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_x}{\omega\varepsilon_0} \right) \right] \left(\frac{\sigma_3 + 2\sigma_x}{\omega\varepsilon_0} \right) \dots \\ & \dots - \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_x)(\varepsilon_2 + 2\varepsilon_x) - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_x}{\omega\varepsilon_0} \right) \left(\frac{\sigma_2 + 2\sigma_x}{\omega\varepsilon_0} \right) \right] (\varepsilon_3 + 2\varepsilon_x) \end{aligned} \quad (2.104)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(\mathbf{T}) = & \frac{6\varepsilon_x^2\sigma_1 - 6\varepsilon_x^2\sigma_2 + 3\varepsilon_1\varepsilon_x\sigma_3 + 3\varepsilon_3\varepsilon_x\sigma_1 - 3\varepsilon_2\varepsilon_x\sigma_3 \dots \\ & \dots - \frac{3\varepsilon_3\varepsilon_x\sigma_2 + 3\varepsilon_1\varepsilon_3\sigma_x - 3\varepsilon_2\varepsilon_3\sigma_x + 12\varepsilon_1\varepsilon_x\sigma_x - 12\varepsilon_2\varepsilon_x\sigma_x \dots}{\omega\varepsilon_0} \\ & \dots - \frac{3\sigma_x(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_3 + 2\sigma_x)}{(\omega\varepsilon_0)^3} \end{aligned} \quad (2.105)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(\mathbf{U}) = & \frac{6\varepsilon_x^2\sigma_1 - 6\varepsilon_x^2\sigma_3 + 3\varepsilon_1\varepsilon_x\sigma_2 + 3\varepsilon_2\varepsilon_x\sigma_1 - 3\varepsilon_2\varepsilon_x\sigma_3 \dots \\ & \dots - \frac{3\varepsilon_3\varepsilon_x\sigma_2 + 3\varepsilon_1\varepsilon_2\sigma_x - 3\varepsilon_2\varepsilon_3\sigma_x + 12\varepsilon_1\varepsilon_x\sigma_x - 12\varepsilon_3\varepsilon_x\sigma_x \dots}{\omega\varepsilon_0} \\ & \dots - \frac{3\sigma_x(\sigma_1 - \sigma_3)(\sigma_2 + 2\sigma_x)}{(\omega\varepsilon_0)^3} \end{aligned} \quad (2.106)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}(\mathbf{S}) = & \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_x) \left(\frac{\sigma_2 + 2\sigma_x}{\omega \varepsilon_0} \right) + (\varepsilon_2 + 2\varepsilon_x) \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_x}{\omega \varepsilon_0} \right) \right] (\varepsilon_3 + 2\varepsilon_x) \cdots \\ & \cdots + \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_x) (\varepsilon_2 + 2\varepsilon_x) - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_x}{\omega \varepsilon_0} \right) \left(\frac{\sigma_2 + 2\sigma_x}{\omega \varepsilon_0} \right) \right] \left(\frac{\sigma_3 + 2\sigma_x}{\omega \varepsilon_0} \right) \end{aligned} \quad (2.107)$$

d. Modelo de Maxwell-Garnett Homogêneo

A equação de Maxwell-Garnett para misturas homogêneas para $N+1$ fases se pode escrever como

$$\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_1}{\varepsilon_x + 2\varepsilon_1} = \sum_{n=2}^{N+1} \alpha_i \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_1}{\varepsilon_n + 2\varepsilon_1} \quad (2.108)$$

onde n denota a n -ésima fase dispersa e o subscrito 1 denota a fase contínua. Essa equação corresponde a fases dispersas com forma perfeitamente esférica. Então, a permissividade complexa de uma mistura trifásica se pode expressar como

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 + 3\varepsilon_1 \frac{\alpha_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} + \alpha_3 \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\varepsilon_3 + 2\varepsilon_1}}{1 - \alpha_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} - \alpha_3 \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\varepsilon_3 + 2\varepsilon_1}} \quad (2.109)$$

O modelo de Maxwell-Garnett Homogêneo é sensível a frequência. A Figura 35 e Figura 36 apresentam as respostas para $f=10$ kHz e $f=1$ MHz, respectivamente. Estas figuras apresentam as duas superfícies possíveis dependendo da dispersão w/O ou o/W. As superfícies foram desenhadas sob a hipóteses que a fração de fase contínua é ao menos 20%, isto é, $\alpha_w \geq 0,2$ para o/W e $\alpha_o \geq 0,2$ para w/O. Comparando as duas figuras se pode ver que a maior diferença se encontra na resposta da condutividade para a dispersão w/O, em baixa frequência a superfície é totalmente plana. Também se pode notar que a resposta da dispersão o/W é semelhante ao modelo Paralelo, enquanto a w/O assemelha-se ao modelo Series.

As respostas da permissividade mostram uma relação dupla para permissividades entre 14 e 26, isto é, pode ser qualquer das duas dispersões. Porém, as duas dispersões podem ser diferenciadas pela condutividade. Desta forma, Dos Santos et al. (2013) propõem identificar a fase contínua usando a função discriminante

$$\begin{aligned} \sigma_x / \sigma_w \geq 0,14 & \rightarrow \text{dispersão o/W} \\ \sigma_x / \sigma_w < 0,14 & \rightarrow \text{dispersão w/O} \end{aligned} \quad (2.110)$$

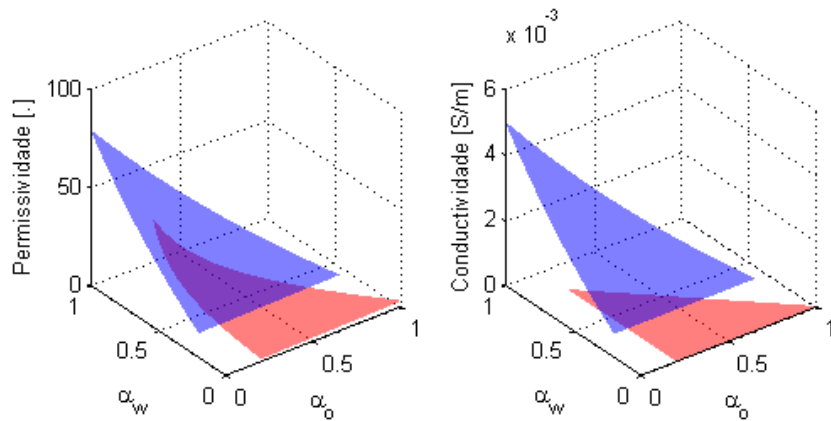


Figura 35. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo de Maxwell-Garnett Homogêneo para uma frequência $f=10$ kHz. Em azul a dispersão o/W e em vermelho a dispersão w/O. Adicionalmente as superfícies cumprem as condições $\alpha_w \geq 0,2$ para o/W e $\alpha_o \geq 0,2$ para w/O.

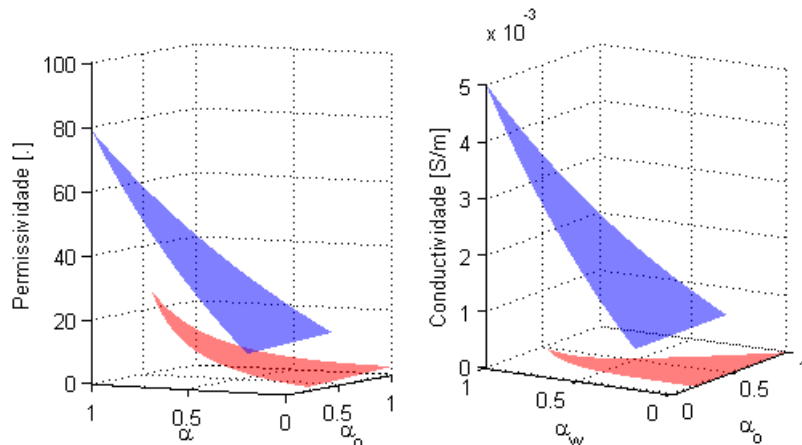


Figura 36. Permissividade e Condutividade de uma mistura trifásica óleo-água-ar, segundo o modelo de Maxwell-Garnett Homogeneo para uma frequência $f=1$ MHz. Em azul a dispersão o/W e em vermelho a dispersão w/O. Adicionalmente as superfícies cumprem as condições $\alpha_w \geq 0,2$ para o/W e $\alpha_o \geq 0,2$ para w/O.

Se deve destacar que o modelo Maxwell-Garnett, sob a hipótese de fase contínua de ao menos 20%, deixa a região $\{\alpha_w < 0,2; \alpha_o < 0,2\}$ indefinida. Além disso, esse modelo foi desenvolvido e tem sido validado para condições muito mais restritivas. Por exemplo, Mallet et al. (2005) o válida para fase contínua maior ao 60%, Van Beek (1967 apud DYKESTEEN et al., 1985) para fase contínua maior ao 75% se existe alguma fase com condutividade maior a 10^{-7} S/m (o que corresponde a água de torneira usada nesta tese) e Sihvola (1999) se a fase contínua é não condutiva e a dispersa é condutiva, mas com baixa fração volumétrica, o que seria somente a dispersão w/O. Se levarmos em consideração essas restrições a região indefinida será muito maior.

Para poder obter as frações das fases se pode reordenar a equação (2.108) como

$$\mathbf{S} = \alpha_2 \mathbf{T} + \alpha_3 \mathbf{U} \quad (2.111)$$

onde

$$\mathbf{S} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_x - \boldsymbol{\varepsilon}_1}{\boldsymbol{\varepsilon}_x + 2\boldsymbol{\varepsilon}_1} \quad (2.112)$$

$$\mathbf{T} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_2 - \boldsymbol{\varepsilon}_1}{\boldsymbol{\varepsilon}_2 + 2\boldsymbol{\varepsilon}_1} \quad (2.113)$$

$$\mathbf{U} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_3 - \boldsymbol{\varepsilon}_1}{\boldsymbol{\varepsilon}_3 + 2\boldsymbol{\varepsilon}_1} \quad (2.114)$$

Separando a parte real e a imaginaria e usando a equação de continuidade se obtém as frações

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \text{Re}(Y) & \text{Re}(Z) \\ 0 & \text{Im}(Y) & \text{Im}(Z) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \text{Re}(X) \\ \text{Im}(X) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.115)$$

sendo

$$\text{Re}(\mathbf{T}) = \frac{-2\varepsilon_1(\omega\varepsilon_0)^2 + \varepsilon_1\varepsilon_2^2 + \varepsilon_2^2(\omega\varepsilon_0)^2 - 2\sigma_1^2 + \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}{4\varepsilon_1(\omega\varepsilon_0)^2 + 4\varepsilon_1\varepsilon_2(\omega\varepsilon_0)^2 + \varepsilon_2^2(\omega\varepsilon_0)^2 + 4\sigma_1^2 + 4\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (2.116)$$

$$\text{Re}(\mathbf{U}) = \frac{-2\varepsilon_1(\omega\varepsilon_0)^2 + \varepsilon_1\varepsilon_3(\omega\varepsilon_0)^2 + \varepsilon_3^2(\omega\varepsilon_0)^2 - 2\sigma_1^2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2}{4\varepsilon_1^2(\omega\varepsilon_0)^2 + 4\varepsilon_1\varepsilon_3(\omega\varepsilon_0)^2 + \varepsilon_3^2(\omega\varepsilon_0)^2 + 4\sigma_1^2 + 4\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2} \quad (2.117)$$

$$\text{Re}(\mathbf{S}) = \frac{-2\varepsilon_1(\omega\varepsilon_0)^2 + \varepsilon_1\varepsilon_x(\omega\varepsilon_0)^2 + \varepsilon_x^2(\omega\varepsilon_0)^2 - 2\sigma_1^2 + \sigma_1\sigma_x + \sigma_x^2}{4\varepsilon_1^2(\omega\varepsilon_0)^2 + 4\varepsilon_1\varepsilon_x(\omega\varepsilon_0)^2 + \varepsilon_x^2(\omega\varepsilon_0)^2 + 4\sigma_1^2 + 4\sigma_1\sigma_x + \sigma_x^2} \quad (2.118)$$

$$\text{Im}(\mathbf{T}) = \frac{-3\omega\varepsilon_0(\varepsilon_1\sigma_2 - \varepsilon_2\sigma_1)}{(4\varepsilon_1^2 + 4\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2^2)(\omega\varepsilon_0)^2 + 4\sigma_1^2 + 4\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (2.119)$$

$$\text{Im}(\mathbf{U}) = \frac{-3\omega\varepsilon_0(\varepsilon_1\sigma_3 - \varepsilon_3\sigma_1)}{(4\varepsilon_1^2 + 4\varepsilon_1\varepsilon_3 + \varepsilon_3^2)(\omega\varepsilon_0)^2 + 4\sigma_1^2 + 4\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2} \quad (2.120)$$

$$\text{Im}(\mathbf{S}) = \frac{3\omega\varepsilon_0(\varepsilon_x\sigma_1 - \varepsilon_1\sigma_x)}{(4\varepsilon_1^2 + 4\varepsilon_1\varepsilon_x + \varepsilon_x^2)(\omega\varepsilon_0)^2 + 4\sigma_1^2 + 4\sigma_1\sigma_x + \sigma_x^2} \quad (2.121)$$

Como se pode ver, das figuras e equações apresentadas nesta seção, considerar uma mistura trifásica e suas permissividades complexas leva a equações muito mais complicadas

que no caso bifásico. Além disso, os modelos de relação trifásicos revelam que existem limitações na sua aplicação que não são consideradas nos modelos bifásicos. A mais notável delas é a faixa de frequências de aplicação. O modelo de Bruggeman mostra que existe uma frequência mínima onde pode ser utilizado, o que se reporta por primeira vez na literatura. A limitação vem de obter regiões com solução trivial para certas frequências. Estas regiões podem ser o resultado da propagação dos erros e as limitações de representação numérica associadas a precisão de todo sistema de computo discreto, como um microcomputador. Esse problema poderia ser resolvido mudando a ordem das operações matemáticas para minimizar a propagação dos erros ou mudando a escala das variáveis deste estudo, que no caso das condutividades apresentam valores muito baixos. Mas no caso do modelo Series, superar o valor da permissividade relativa da água, que é o valor máximo esperado, indica que o material condutor tem grandes perdas pela condutividade (SIHVOLA, 1999). Mas também se tem vantagens como encontrar um discriminante a partir da medição de condutividade que permita determinar a fase contínua, como apresentou Dos Santos et al. (2013), o que é útil no caso do modelo não-autoconsistente Maxwell-Garnett.

Os modelos trifásicos apresentados têm em comum a característica de que são obtidos para fases dispersas distribuídas homogeneamente na fase contínua. Mas Sihvola (1999) apresenta outro modelo de Bruggeman que considera que as fases dispersas não estão distribuídas homogeneamente. Esse modelo não é usado nesta tese porque não permite a solução da fração volumétrica por meio de uma separação das variáveis imaginária e real, como se propôs para os outros modelos apresentados. Apesar disso, se considera que sua aplicação poderia ser importante, pois um modelo com essa característica poderia representar melhor as condições dos experimentos das misturas, como se apresentará na seção 4.2.6.

2.2 SENSOR *WIRE-MESH*

Neste trabalho é aplicado o sensor *wire-mesh* para o estudo de escoamentos bifásicos e trifásicos. Na *wire-mesh* condutiva/capacitiva se usa um circuito ponte autobalanceada para medir a admitância do fluido (seção 2.1.3).

Um sensor de geometria típica está formado por dois planos de fios, um de fios transmissores e o outro de receptores. Os fios de cada plano são posicionados perpendicularmente em relação aos do outro plano, formando assim uma malha de eletrodos. Em cada ponto de cruzamento, entre fios, são feitas medidas de resistência/condutividade ou

capacitância/permissividade. O espaço entre os pontos de cruzamento é preenchido com fluidos do escoamento.

Um esquema geral do circuito proposto na literatura para a medição da admitância em cada ponto de cruzamento é apresentado na Figura 37. A admitância de retroalimentação Y_f e o sinal de excitação V_i determinam a técnica de medição, condutiva ou capacitiva. Através de um processo de comutação, cada fio transmissor (Tx) é ativado e envia um sinal elétrico ao fluido. Em seguida, o fio receptor (Rx) recebe um sinal que contém a informação para identificar o tipo de fluido presente em cada ponto de cruzamento. Ao ser ativado o último fio transmissor, é adquirido um conjunto completo de dados com a informação sobre o tipo de fluido ou fase para toda a seção transversal. Os transmissores não ativos são aterrados.

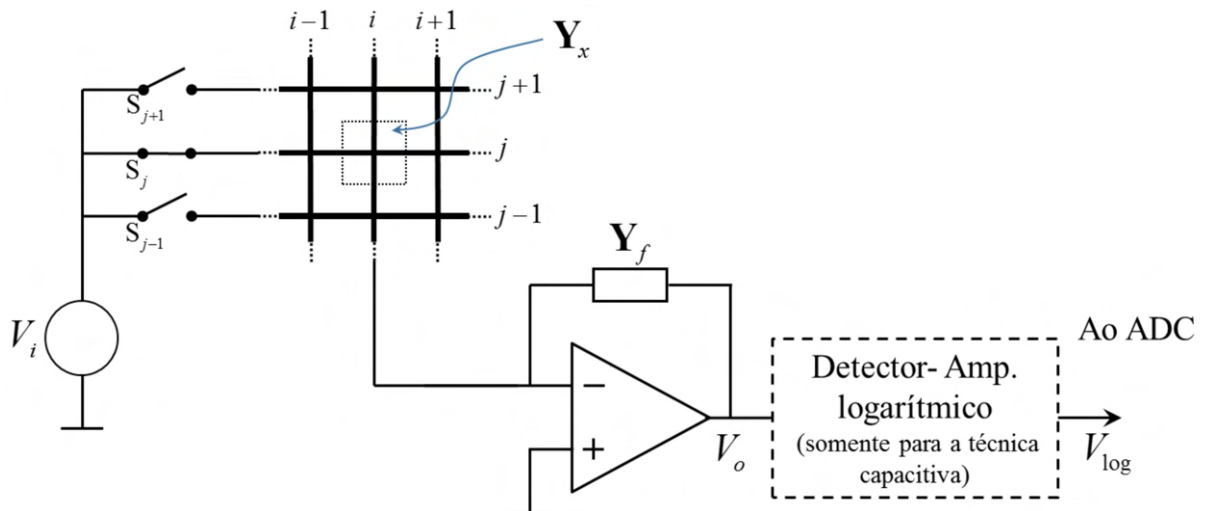


Figura 37. Esquema geral de um circuito para medida da condutividade ou permissividade usando *wire-mesh*.

A corrente que flui para cada receptor é recebida por um amplificador de transimpedância. Note que o sensor *wire-mesh* e o amplificador de transimpedância formam o circuito de ponte autobalanceada. O amplificador de transimpedância é utilizado na técnica *wire-mesh* porque apresenta duas características essenciais para o correto funcionamento da técnica. A primeira é que é possível ajustar a impedância de entrada para que seja significativamente menor que a impedância do fluido. A segunda é que assegura a tensão elétrica a zero, nos fios receptores, pela terra virtual ao ser retroalimentado negativamente. Deste modo, as correntes que cada amplificador recebe estarão inequivocamente relacionadas com o ponto de cruzamento correspondente.

2.2.1. Técnica condutiva

Para o caso da técnica condutiva o sinal de excitação é um pulso retangular e a admitância de retroalimentação é um resistor com condutância G_f . Portanto, $Y_f = G_f$ e a função de transferência ideal pode ser escrita como

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{Y_x}{Y_f} = -\frac{k_g \sigma_x + s k_g \varepsilon_0 \varepsilon_x}{G_f} \quad (2.122)$$

onde $s = j\omega$. Na Figura 38, apresenta-se a resposta simplificada ao sinal pulso. A tensão de saída V_o é amostrada quando alcança estado estável, no instante t_s e seu valor pode ser determinado como

$$V_o(t_s) = -V_p k_g \sigma_x / G_f \quad (2.123)$$

onde V_p é a amplitude do pulso, ou

$$V_o(t_s) = a \cdot \sigma_x \quad (2.124)$$

onde a é uma constante que depende do fator de geometria de cada ponto de cruzamento k_g , da admitância de retroalimentação e a tensão de entrada. Um processo de calibração é necessário para determinar o valor de a . O processo consiste em preencher o sensor com um fluido condutivo com condutividade conhecida, σ_K . Portanto, uma tensão média de referência V_K pode ser obtida como

$$V_K(i, j) = \frac{1}{N_t} \sum_{k=1}^{N_t} V_o(\sigma_K, i, j, k). \quad (2.125)$$

Nesta equação i e j são os índices de cada ponto de cruzamento, k é o índice do tempo e N_t é o número de amostras para obter a média. Assim, a é

$$a(i, j) = \frac{V_K(i, j)}{\sigma_K}. \quad (2.126)$$

Então, os valores da condutividade para cada ponto de cruzamento, σ_x , na seção transversal inteira em qualquer instante de tempo k , pode ser determinada por

$$\sigma_x(i, j, k) = V_o(i, j, k) / a(i, j). \quad (2.127)$$

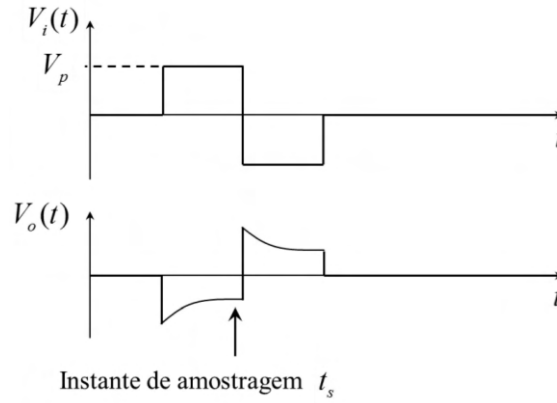


Figura 38. Sinais de excitação e resposta para a técnica condutiva.

2.2.2. Técnica capacitiva

Para o caso da técnica capacitiva, o sinal de excitação é uma senoide em alta frequência e a admitância de retroalimentação é um resistor em paralelo com um capacitor, isto é $\mathbf{Y}_f = G_f + sC_f$. Lembrando que o modulo da resposta em magnitude deste circuito pode ser expresso como

$$\left| \frac{\mathbf{V}_o}{\mathbf{V}_i} \right| = \left| \frac{\mathbf{Y}_x}{\mathbf{Y}_f} \right| = \frac{\sqrt{G_x^2 + \omega^2 C_x^2}}{\sqrt{G_f^2 + \omega^2 C_f^2}} \quad (2.128)$$

e que, a uma frequência suficientemente alta, a equação pode ser aproximada por

$$\frac{V_o}{V_i} \approx -\frac{C_x}{C_f} = -\frac{k_g \epsilon_0 \epsilon_x}{C_f}. \quad (2.129)$$

Assim, a técnica capacitiva usa frequências que se encontram no platô de alta frequência, Figura 39. Então, a tensão de saída da ponte autobalanceada somente depende da permissividade do fluido.

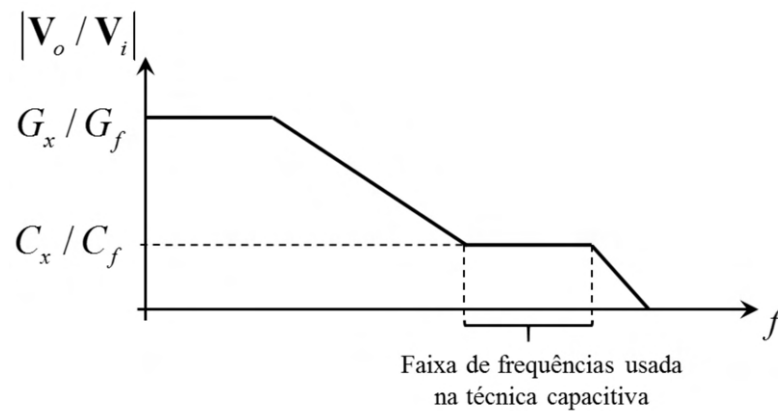


Figura 39. Resposta em frequência simplificada para o circuito de medição da admitância usado na técnica capacitiva. Tomado de Da Silva (2008).

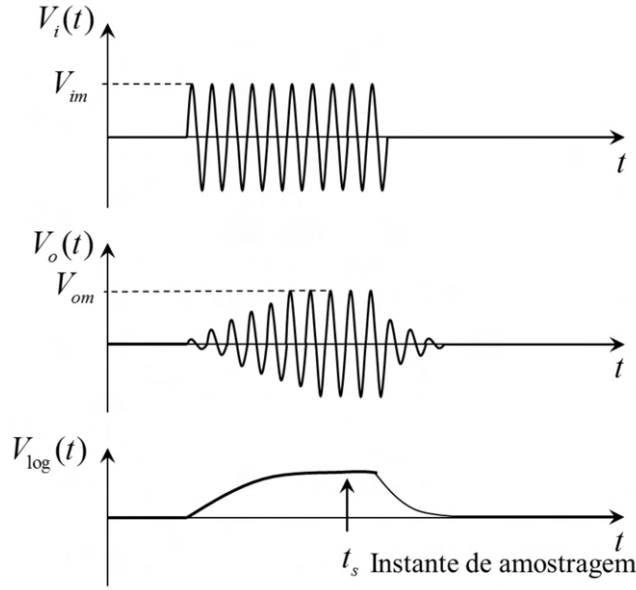


Figura 40. Sinais de excitação e resposta para a técnica capacitiva.

Para demodular e permitir a digitalização do sinal é usado um detector logarítmico. A Figura 40 mostra uma resposta esquemática do circuito. Então, o circuito entrega um sinal DC proporcional ao logaritmo da magnitude de ε_{rx} , de acordo a

$$V_{\log} = b \cdot \ln(\varepsilon_x) + c \quad (2.130)$$

onde b e c são constantes que dependem da geometria de cada ponto de cruzamento, a admitância de retroalimentação, o circuito detector, a frequência e o sinal de entrada. Por isto é preciso fazer um processo de calibração para encontrar essas constantes. A calibração consiste em medir um fluido, que preenche totalmente o sensor, com uma permissividade baixa e de valor conhecido, ε_L . Desta forma, uma matriz de tensão média no tempo é obtida e denotada como V_L

$$V_L(i, j) = \frac{1}{N_t} \sum_{k=1}^{N_t} V_{\log}(\varepsilon_L, i, j, k). \quad (2.131)$$

O processo é repetido com o sensor preenchido com outro fluido, mas com uma permissividade alta ε_H . Isto provê uma outra matriz V_H

$$V_H(i, j) = \frac{1}{N_t} \sum_{k=1}^{N_t} V_{\log}(\varepsilon_H, i, j, k). \quad (2.132)$$

Assim, aplicando a equação (2.130) nas matrizes de referência da calibração V_L e V_H é possível calcular as constantes b e c para cada ponto de cruzamento como

$$b(i, j) = \frac{V_H(i, j) - V_L(i, j)}{\ln(\varepsilon_H) - \ln(\varepsilon_L)} \quad (2.133)$$

$$c(i, j) = \frac{V_L(i, j) \ln(\varepsilon_H) - V_H(i, j) \ln(\varepsilon_L)}{\ln(\varepsilon_H) - \ln(\varepsilon_L)} \quad (2.134)$$

Finalmente, a distribuição de permissividade sobre toda a seção transversal pode ser determinada por

$$\varepsilon_x(i, j, k) = \exp\left(\frac{V_{\log}(i, j, k) - c(i, j)}{b(i, j)}\right). \quad (2.135)$$

Dadas as diferenças entre as técnicas, cada uma tem diferentes aplicações e vantagens. Na técnica condutiva é obrigatório empregar pelo menos um fluido condutor, por exemplo ar-água. Essa limitação não existe na técnica capacitiva, a qual pode trabalhar com fluidos não condutores, por exemplo ar-óleo. O uso do amplificador logarítmico ajuda a obter grandes diferenças de tensão no caso de aplicações com baixos valores de permissividade ou quando os valores esperados de ε_x estão perto de ε_L , por exemplo um spray de água em ar. Mas essa vantagem implica que a resolução não é constante.

2.2.3. Medições derivadas médias no espaço e tempo

As médias no tempo das distribuições de fase podem ser calculadas como apresentado por Prasser et al. (2002) como

$$\hat{\alpha}_i(i, j) = \frac{1}{k_{\max}} \sum_{k=1}^{k_{\max}} \alpha_i(i, j, k), \quad (2.136)$$

onde $k_{\max}$ é o número de distribuições de frações fase instantâneas medidas. A fração média total de uma fase em toda a seção transversal está dada por

$$\bar{\alpha}_i = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} \sum_{k=1}^{k_{\max}} w(i, j) \alpha_i(i, j), \quad (2.137)$$

onde $w(i, j)$ são os coeficientes de ponderação que refletem a contribuição da área na posição (i, j) à área total da seção transversal A_{sensor} (Figura 41). A fração média total $\bar{\alpha}_i$ deve corresponder ao *holdup* se o escoamento está completamente desenvolvido.

As frações de fase locais instantâneas também são usadas para obter as distribuições cordais médias no tempo de uma fase na seção transversal do tubo. As distribuições cordais verticais e horizontais das frações de água, óleo e ar são calculadas fazendo as médias no tempo das frações instantâneas sobre cada linha vertical (j) e horizontal (i), respectivamente, ao longo de toda a seção transversal.

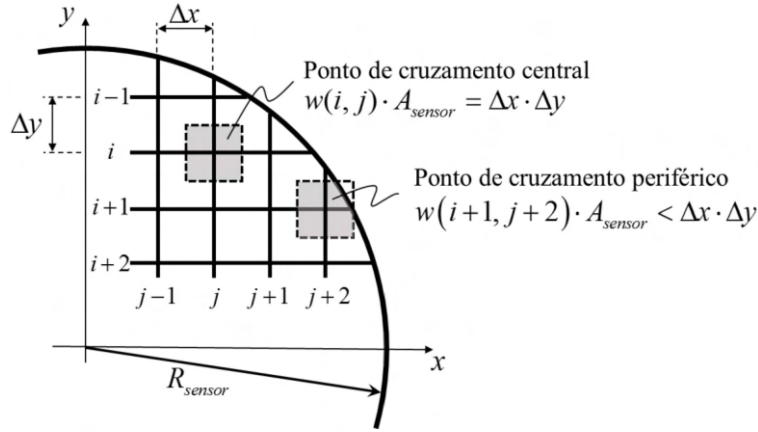


Figura 41. Coeficientes de ponderação $w(i, j)$ para medição de *holdup* na seção transversal.

A distribuição cordal vertical de uma fase $\alpha_{i,V}$ é obtida fazendo a média das frações de fase de cada ponto de cruzamento que pertence a um fio vertical determinado j . Este procedimento é repetido para todos os fios, indo de esquerda para direita sobre a seção transversal do tubo:

$$\alpha_{i,V}(j) = \frac{\sum_{i=1}^{16} w(i, j) \alpha_i(i, j)}{\sum_{i=1}^{16} w(i, j)}. \quad (1.138)$$

Por outra parte, a distribuição cordal horizontal é obtida fazendo a média das frações de fase $\alpha_{i,H}$ de cada ponto de cruzamento que pertence a um fio vertical determinado i . Novamente o cálculo é repetido para todos os fios, indo da cima para abaixo da seção transversal do tubo:

$$\alpha_{i,H}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{16} w(i, j) \alpha_i(i, j)}{\sum_{j=1}^{16} w(i, j)}. \quad (1.139)$$

As distribuições cordais são apresentadas como funções da distância normalizada pelo diâmetro interno do tubo.

2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO COMPATÍVEIS COM A TECNOLOGIA *WIRE-MESH*

Até o presente momento, o sensor *wire-mesh* está habilitado para medir escoamentos bifásicos, seja através da versão condutiva ou capacitiva, o que já tem sido reportado em uma ampla variedade de trabalhos. Entretanto, no caso trifásico poderia ser aplicada com restrições. Explica-se o problema de um ponto de vista matemático, ou seja, busca-se a solução de um sistema de equações, onde se tem três incógnitas ($\alpha_o, \alpha_w, \alpha_g$), mas só duas equações válidas

para a solução e uma terceira equação que apresenta deficiências. A primeira equação válida é a equação da continuidade, eq. (1.5). No caso da tecnologia condutiva (DESCAMPS et al., 2007), a segunda equação está dada pelo procedimento de separar gás de líquidos, o que permite calcular a fração de ar. Para a terceira variável é usada a equação de Hewitt (1.35), que só pode ser aplicada depois de obter o histograma e permite determinar a média de óleo para esse histograma, por isso não é válida para medições instantâneas de fração. Além de que só é válida para baixas frações de óleo e ar. No caso da *wire-mesh* capacitiva, esta pode ser aplicada se o volume de medição da célula (o ponto de cruzamento) estiver preenchido com uma fase somente, isto é, se as fases estão estratificadas. Como vimos, ela só pode ser aplicada em escoamentos com fases separadas ou fazendo um tratamento parecido ao caso condutivo.

Então, como foi mostrado no trabalho de Dykesteen et al. (1985), na seção 1.2.2, é preciso conhecer a impedância e não apenas a resistência ou a capacitância como fazem a maioria das técnicas atuais. Assim, se pode ter um sistema de três equações e três incógnitas; além de se requerer que as equações sejam linearmente independentes. Por isso, se propõe neste trabalho uma técnica que possa medir a admitância instantânea em cada ponto da *wire-mesh*. Deve-se ter em conta que o sistema de medição deve ter um circuito que apresente as mesmas condições do amplificador de transimpedância. Por isso a melhor opção é explorar as técnicas compatíveis com esse circuito.

Para obter a admitância se pode usar uma destas quatro técnicas:

1. Medir a amplitude em duas frequências diferentes.
2. Medir a magnitude e a fase elétrica.
3. Medir a parte real e a imaginária.
4. Fazer a identificação do sistema.

A seguir se explicam as propostas, estudando a sua viabilidade, características e vantagens. Este estudo foi realizado durante um estágio de três meses no *Swiss Federal Institute of Technology Zürich*, ETHZ, sob a orientação do Prof. Horst Michael Prasser, que desenvolveu a técnica da *wire-mesh* condutiva original.

2.3.1. Medição de magnitude em duas frequências diferentes

A primeira técnica requer uma condição especial: realizar medições em duas frequências que devem apresentar características diferentes de atenuação. Como foi mostrado nas equações (2.128), (2.129) e na Figura 39, se os dois valores de frequência utilizados forem muito altos ou muito baixos as duas equações não vão apresentar diferenças, isto é, não serão linearmente

independentes. Por isso, precisa-se de uma medição em alta frequência e outra em baixa frequência. Da Silva et al. (2012) usa esta técnica para obter a distribuição espacial de três fases (ar-água-óleo) num sensor *wire-mesh* 8×8 . As frequências escolhidas foram 75kHz e 1.85MHz, com componentes de retroalimentação $C_f = 4,7$ pF e $G_f = 0,01$ mS. Com esses valores a frequência onde começa a platô de baixas, para óleo e ar, deve estar localizado em frequências inferiores a 1 Hz. Portanto, a escolha da frequência de 75kHz não garante que a medição seja dependente exclusivamente da condutividade. Mesmo assim obtém-se bons resultados em discriminar as fases. A mesma técnica tem sido aplicada em pequenos experimentos com seções de tubos, sempre com fases estratificadas sem escoamento. Para obter uma mistura a seção de tubo é agitada. O trabalho de mestrado de Vendruscolo (2012) identifica as fases pela sua condutividade e permissividade, apresentando essas medições por separado. Enquanto Dos Santos et al. (2013) apresenta a frações trifásicas usando o modelo de Maxwell-Garnett. Os resultados deste trabalho são qualitativamente bons, mas não são validados por outra técnica de medição.

Se deve notar que quando se tem fases não condutoras, como ar e óleo, a frequência de baixa torna-se uma limitação. O sistema de medição, teria uma forte limitação na resolução temporal. Dado que para medir no platô de baixas frequências, onde espera-se frequências menores a 1 Hz, dever-se-ia esperar pelo menos 1 s para ter uma medida válida. Ainda assim é possível trabalhar esta técnica mas se deve ter em conta que se está trabalhando na região de transição onde a resposta depende da condutividade e permissividade dos fluidos. Isso deve refletir na calibração. Mas os trabalhos citados acima não contemplam esta limitação no seu desenvolvimento teórico.

Essa técnica pode apresentar outro inconveniente na situação de ter uma fase com alta condutividade, por exemplo, água muito salgada. Como a banda de alta frequência depende desse valor, a presença de uma fase muito condutiva pode levar essa banda a uma região acima das centenas de MHz, dificultando a medição.

2.3.2. Medição de magnitude e fase elétrica

No segundo caso se tem a medição numa única frequência. O que se deve garantir é que nessa frequência mudem as características de amplitude e fase da impedância dos fluidos. Nas Figura 24 a Figura 26 se pode ver que entre 10 kHz e 1 MHz a magnitude e fase da saída da ponte autobalanceada muda de valor. Isto, para os circuitos de retroalimentação considerados. Assim, um valor de frequência entre estes valores pode dar uma expressão diferente para o ganho e a fase elétrica, como é discutido a seguir.

Como foi apresentado, a resposta em magnitude da ponte autobalanceada está representada pela equação

$$\frac{V_o}{V_i} = - \left(\frac{G_x + j\omega C_x}{G_f + j\omega C_f} \right). \quad (2.140)$$

Mas esta também pode ser escrita como o ganho em tensão, assim

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \quad (2.141)$$

Se V_i é o sinal senoide de referência com uma amplitude fixa e uma fase elétrica igual a zero, podemos reescrever a equação como

$$A_v = \frac{V_o \cos(\theta) + jV_o \sin(\theta)}{V_i} \quad (2.142)$$

$$A_v = A_v \cos(\theta) + jA_v \sin(\theta) \quad (2.143)$$

Assim, o deslocamento da fase elétrica de A_v equivale à tensão de saída V_o . Com isto podemos igualar a equação (2.140) e (2.143)

$$A_v \cos(\theta) + jA_v \sin(\theta) = - \left(\frac{G_x + j\omega C_x}{G_f + j\omega C_f} \right) \quad (2.144)$$

Agora, igualando as partes real e imaginaria

$$\begin{aligned} A_v \cos(\theta) &= - \left(\frac{G_x G_f + \omega^2 C_x C_f}{G_f^2 + \omega^2 C_f^2} \right) \\ A_v \sin(\theta) &= \frac{\omega G_x C_f + \omega C_x G_f}{G_f^2 + \omega^2 C_f^2} \end{aligned} \quad (2.145)$$

podemos isolar a condutância G_x e a capacitância C_x como funções da amplitude A_v e da fase elétrica θ , as quais podem ser medidas. Como G_f e C_f são conhecidas

$$\begin{aligned} G_x &= A_v (\omega C_f \sin(\theta) - G_f \cos(\theta)) \\ C_x &= \frac{-A_v}{\omega} (G_f \sin(\theta) + \omega C_f \cos(\theta)) \end{aligned} \quad (2.146)$$

O ajuste dos valores independentes de cada ponto de cruzamento se pode fazer de maneira semelhante ao desenvolvido na seção 2.2. Entretanto, outra técnica para medir a fase do sinal é necessária.

A medição da amplitude não representa um problema, pois a metodologia usada no tipo condutivo ou capacitivo pode ser usada. Mas deve-se garantir que a amplitude do sinal para

qualquer fluido esteja na faixa de medida, especialmente em fluidos como ar ou óleo. Para a medição da fase, é preciso estudar seu comportamento. Isto permite definir os valores de G_f e C_f , para obter uma medição razoável e com boa resolução das variáveis. Isso é aconselhado por Brückner (2005 apud DA SILVA, 2008), já que se espera uma variação de uns poucos graus, em misturas bifásicas. Este último autor explora esta opção através de um circuito integrado AD8302, que tem uma resolução de $\pm 1^\circ$, o que não parece ser suficiente segundo a recomendação.

Qian et al. (2012) realizam uma simulação e apresentam uns resultados preliminares explorando esta técnica. A simulação só apresenta que é possível discriminar os fluidos segundo as condutividades e permissividades. Na parte experimental eles usam como fluidos água, óleo e ar. Para o circuito receptor é usado a técnica de medição de corrente-tensão (um divisor resistivo). Este circuito não cumpre com a condição de manter aterrados os fios receptores, pelo qual não é possível garantir que a relação entre as voltagens medidas e a permissividade estejam univocamente relacionadas. O estudo não apresenta as frações das fases ou imagens obtidas pelo sensor.

O trabalho de Dos Santos et al. (2014) mede a amplitude e fase elétrica para obter a distribuição espacial de três fases, ar, óleo de silicone e água deionizada. O experimento consiste em ter as fases estratificadas num segmento de tubulação sem escoamento. A tubulação foi agitada para conseguir a mistura das fases. A frequência de medição não foi indicada. Além disso os resultados apresentam a amplitude e a fase elétricas medidas separadamente, sem relacionar eles com a permissividade complexa ou a fração das fases. Este trabalho não apresenta resultados quantitativos. Na técnica proposta a amplitude é determinada pelo mesmo circuito usado na técnica capacitiva. Para determinar a fase elétrica se usa um circuito baseado numa comporta lógica XOR. Isto limita a medição da fase elétrica a dois quadrantes, por exemplo entre 0° e 180° . Também obriga a que cada receptor deve usar dois ADC para medir as variáveis simultaneamente.

Para estudar o comportamento da fase numa medição direta, se fez uma simulação com diferentes frequências, usando o modelo de Maxwell-Garnet, como se pode observar na Figura 42. Teoricamente, a máxima diferença na mudança da fase é 82° ($\Delta t = 2,278$ us) a 100 kHz; 36° ($\Delta t = 100$ ns) a 1 MHz ou 8° ($\Delta t = 4,444$ ns) a 5 MHz. Experimentalmente, Jaworek e Krupa (2010) acharam que a máxima mudança da fase é 14° ou $\Delta t = 39$ ns a 1 MHz e Da Silva (2008) esperava uma variação de uns poucos graus a 5 MHz em misturas bifásicas, o que coincide com as simulações. No caso de $f = 100$ kHz e 5 MHz se pode observar que para

baixas frações da água as linhas de contorno da fase se encontram muito perto umas das outras. Isto significa que se perde resolução e contraste nesses casos, fazendo muito difícil a aplicação da técnica proposta por Dykesteen et al. (1985). No caso de $f = 1$ MHz, a resolução e contraste que podem-se ter são melhores. Nesse caso a diferença máxima do tempo é $\Delta t = 100$ ns. Isso quer dizer que a frequência de amostragem deve ser de várias centenas, o inverso desse tempo, usando um circuito digital que meça o deslocamento temporal diretamente. Por exemplo, para 512 níveis, a frequência de amostragem deve ser

$$f_s = \frac{256}{\Delta t} = \frac{256}{100 \text{ ns}} = 2,56 \text{ GS/s.} \quad (2.147)$$

Isto torna o circuito requerido um equipamento com características muito exigentes, sendo que as placas de aquisição de dados desse tipo têm um custo muito elevado, além de contar geralmente com poucas entradas.

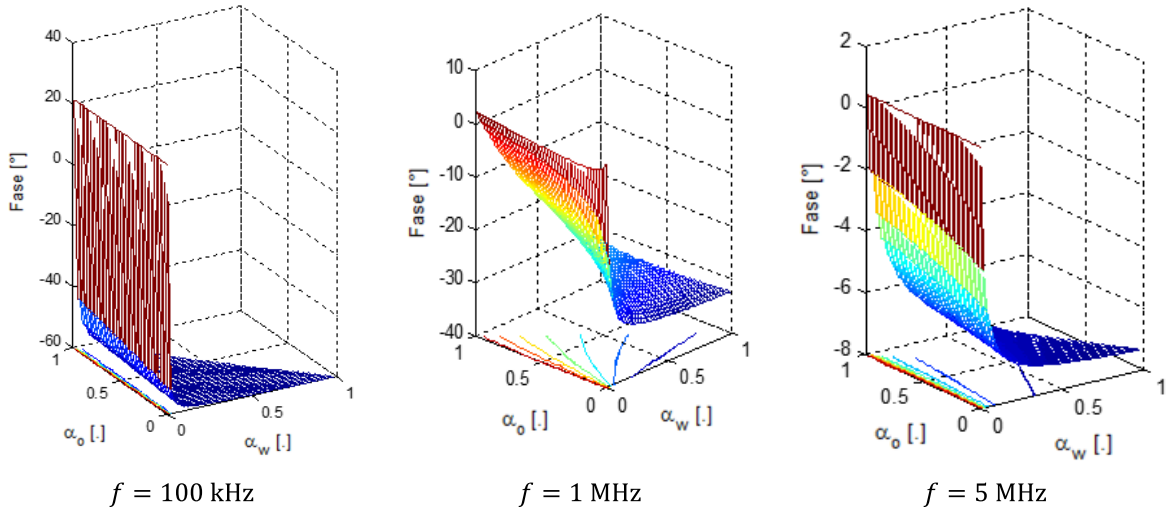


Figura 42. Mudança da fase em função da fração de água e a fração de óleo para diferentes frequências.

2.3.3. Medição da parte real e imaginária

A terceira técnica requer circuitos eletrônicos especiais como um demodulador IQ. Na prática, as versões análogas destes circuitos são desenvolvidas, na sua maioria, para frequências de centenas de MHz e superiores, o que supera a banda de frequências usadas para a medição da permissividade, pelo menos neste trabalho. Mas ainda existem circuitos integrados análogos que tem a funcionalidade desejada.

O princípio de funcionamento desses circuitos é simples, Figura 43. O sinal $\mathbf{V}_o = V_o \cos(2\pi f_o t + \theta)$ deve ser multiplicado por um sinal de referência $\mathbf{V}_r = V_r \cos(2\pi f_r t)$, assim

$$V_{IM} = V_o \cos(2\pi f_o t + \theta) V_r \cos(2\pi f_r t) \quad (2.148)$$

$$V_{QM} = V_o \cos(2\pi f_o t + \theta) V_r \sin(2\pi f_r t) \quad (2.149)$$

Que dão como resultado um sinal que pode ser representado como a soma de dois sinais senoidais, uma de baixa frequência $(f_o - f_r)$ e outra em alta frequência $(f_o + f_r)$

$$V_{IM} = \frac{V_o V_r}{2} \{ \cos[2\pi(f_o + f_r)t + \theta] + \cos[2\pi(f_o - f_r)t + \theta] \} \quad (2.150)$$

$$V_{QM} = \frac{V_o V_r}{2} \{ -\sin[2\pi(f_o - f_r)t + \theta] + \sin[2\pi(f_o + f_r)t + \theta] \} \quad (2.151)$$

Então, aplicando um filtro passa-baixo se obtém

$$V_{IF} = \frac{V_o V_r}{2} \cos[2\pi(f_o - f_r)t + \theta] \quad (2.152)$$

$$V_{QF} = -\frac{V_o V_r}{2} \sin[2\pi(f_o - f_r)t + \theta]. \quad (2.153)$$

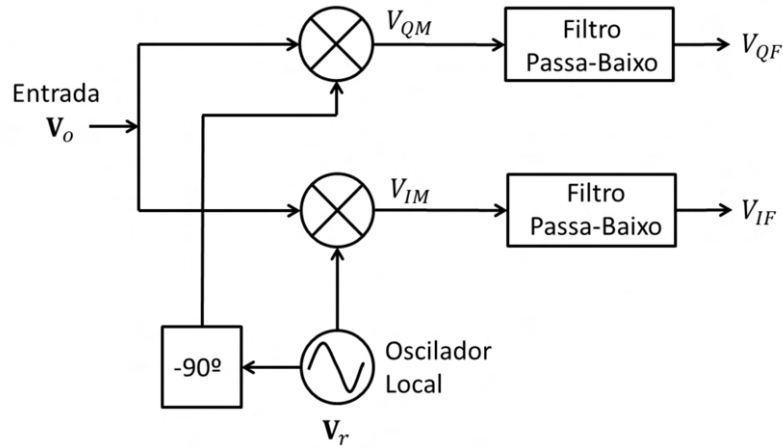


Figura 43. Diagrama de blocos funcional de um demodulador IQ. Adaptado de Jong et al. (1997).

No caso que $f_r \neq f_o$ e $V_r \neq 1$ V e isolando V_o e θ das equações (2.152) e (2.153)

$$V_o = \frac{2V_{IF}}{V_r} \sqrt{1 + \left(-\frac{V_{QF}}{V_{IF}} \right)^2} \quad (2.154)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(-\frac{V_{QF}}{V_{IF}} \right) - 2\pi(f_o - f_r)t \quad (2.155)$$

No caso que $f_r = f_o$ e $V_r = 1$ V

$$V_{IF} = \frac{V_o}{2} \cos(\theta) \quad (2.156)$$

$$V_{QF} = -\frac{V_o}{2} \sin(\theta) \quad (2.157)$$

e isolando V_o e θ das equações (2.156) e (2.157)

$$V_o = 2V_{IF} \sqrt{1 + \left(-\frac{V_{QF}}{V_{IF}} \right)^2} \quad (2.158)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(-\frac{V_{QF}}{V_{IF}} \right). \quad (2.159)$$

Ao recuperar esta informação se pode relacionar com a permissividade complexa procurada. Isto se consegue fazendo duas equivalências. A primeira é que o sinal de referência V_r corresponda ao sinal de excitação V_i . A segunda, consiste em fazer V_o corresponder ao valor A_v , garantindo que a tensão de entrada V_i do circuito tem uma amplitude constante. O erro que se introduz por essa última hipótese é compensada pela calibração, segundo se explicou na seção 2.1.4.

Outra forma de abordagem consiste em circuitos digitais. Esses circuitos apresentam alta sensibilidade para medir as características desejadas, como apresenta Jong et al. (1997). Ele faz uma implementação em FPGA programando com VHDL, e obtém uma resolução de até 0,006°. Estes circuitos podem obter rapidamente a fase de um sinal, mas a frequência de amostragem deve ser ao menos 10 vezes a do sinal analisado. Por isto, nesse modelo a frequência de amostragem pode ser da ordem de 10 MS/s, se a frequência de excitação fosse de 1 MHz.

Esta técnica se vê limitada na sua implementação principalmente pela frequência de amostragem do sistema de aquisição de dados, mas é possível sua implementação sem custos muito elevados. Então, a frequência do sinal deve permitir que se adquiram várias amostras por cada ciclo do sinal. Supondo uma frequência de amostragem de 10 MS/s, se fizeram simulações com diferentes combinações de G_f e C_f , avaliando subjetivamente o contraste e resolução dos gráficos. A Figura 44 mostra os resultados de uma combinação de $G_f = 1/100 \text{ k}\Omega$ e $C_f = 2 \text{ pF}$. Neste caso a resolução é boa, mas o contraste não é muito bom. Além disso, a capacitância encontrada está na mesma ordem da capacitância parasita que se tem entre os pinos de conexão do circuito integrado, que para um integrado tipo SOIC está ao redor de 0,8 pF. Assim, o valor do capacitor que deve ser montado seria de 1,2 pF, pois as duas capacitâncias estariam conectadas em paralelo. Isto poderia significar dependência excessiva desse valor parasita, especialmente no processo de calibração. Porém, considero que é uma técnica viável.

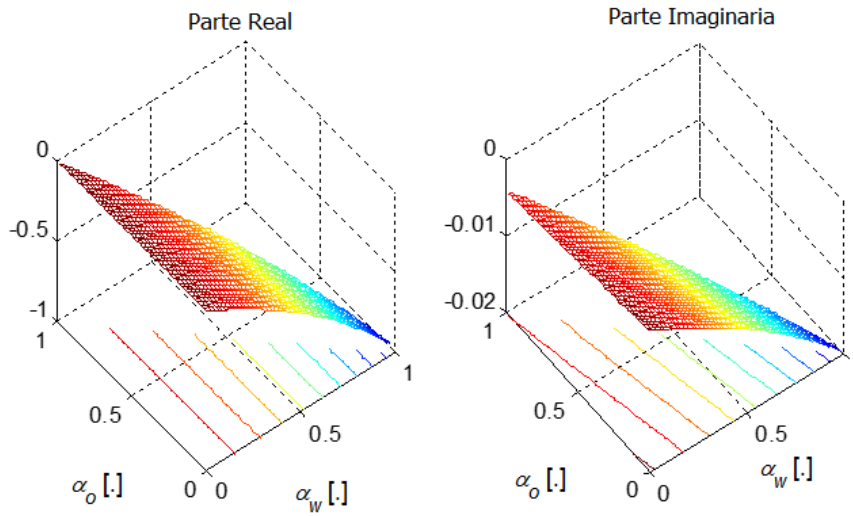


Figura 44. Mudança das parte real e imaginaria do sinal de saída da ponte autobalanceada para $G_f = 1/100 \text{ k}\Omega$ e $C_f = 2 \text{ pF}$.

2.3.4. Identificação do sistema

A quarta técnica é baseada na identificação do sistema. Aqui se reconhecem duas variações. A primeira, chamada de *Grey-Box Model*, faz uso de algum conhecimento prévio do sistema. A segunda variação, chamada de *Black-Box Model*, não usa nenhum conhecimento sobre o sistema.

Para o caso de *Grey-Box Model*, o procedimento está baseado no comportamento que apresenta a tensão de saída da *wire-mesh* condutiva, Figura 45. O valor medido da tensão é um valor proporcional a G_x e G_f , já que se espera que o circuito chegue ao estado estacionário, que só depende deles. Mas a figura apresenta um comportamento transiente. Esse comportamento é causado pelos elementos reativos no circuito, que neste caso é a capacitância equivalente do fluido, além de elementos parasitas. Das amostras de todo o ciclo se pode ter a informação da capacitância e condutância equivalentes do fluido.

Por exemplo, a resposta no tempo para o semiciclo positivo, frente a um degrau com amplitude de 1V, está representado pela equação

$$V_o(t) = -\frac{G_x}{G_f}u(t) - \left(\frac{C_x}{C_f} - \frac{G_x}{G_f} \right) e^{-\frac{G_f}{C_f}t} \quad (2.160)$$

Então, quando $t = 0$ a equação fica

$$V_o(t=0) = -\frac{C_x}{C_f} \quad (2.161)$$

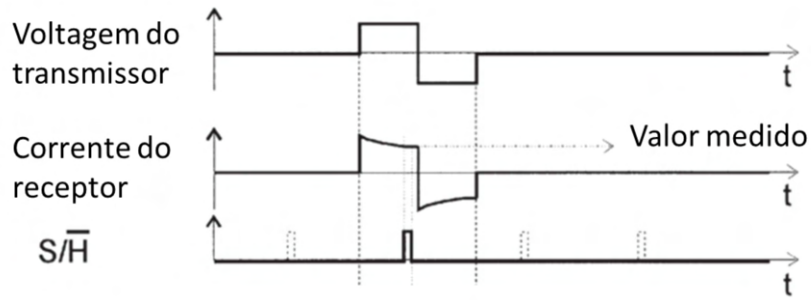


Figura 45. Parte do diagrama de sinais de controle apresentado por Prasser et al. (1998) para a *wire-mesh* condutiva. Observe que a amostra do sinal é tomada em regime estacionário.

e depois de um tempo $t = 5C_f / G_f$, chamado de tempo de estabelecimento, o sinal fica em regime estacionário e a equação pode aproximar-se de

$$V_o(t \geq 5C_f / G_f) = -\frac{G_x}{G_f} \quad (2.162)$$

Assim, o valor pico deste sinal é dado somente pelas capacitâncias e o valor em regime permanente é dado somente pelas condutâncias, e como se conhecem os valores de G_f e C_f se pode obter os valores de G_x e C_x dos fluidos, ou seja, se tem as duas variáveis procuradas. Porém, dois problemas podem ocorrer nessa proposta. Pode ocorrer que esse valor supere as voltagens de alimentação do circuito e seja truncado, dependendo das condições. Além disso, não está garantido que a resposta sempre conte com um pico, porque pode ser uma resposta crescente. Nesse caso, a informação da capacitância ainda é recuperável através da observação da curva. Assim, coletando uma boa quantidade de amostras do sinal, pode-se fazer uma reconstrução da curva e encontrar os valores relacionados a G_x e C_x . Outro problema segue sendo a diferenciação entre os valores de ar e óleo, pois o valor de regime estacionário vai ser muito baixo, ver a Figura 46. Para um circuito ponte autobalanceada, os valores da tensão de saída teóricos estão ao redor de 1 nV (se $V_i = 1V$). Na prática, a resolução de um sistema de aquisição de dados normal não poderá discriminar entre os fluidos, pois não há suficiente amplitude nem suficiente diferença de amplitude entre eles. Além disso, estes valores estão no mesmo nível da tensão de ruído que apresentam os circuitos.

Um problema dessas técnicas é a geração do sinal, que deve ser o mais perfeito possível. Além disso, estão as interferências de elementos parasitas. Na realidade, se deve fazer um estudo desses efeitos no sinal de saída e encontrar uma maneira de anulá-los. Mas ao contrário da proposta anterior, os ADC só precisam estar na ordem de 100 kHz.

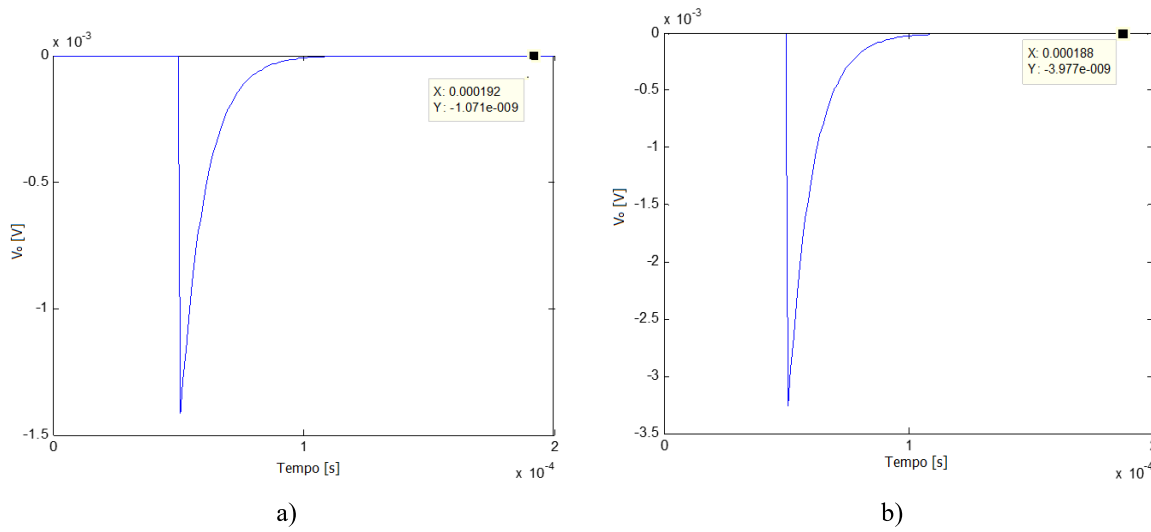


Figura 46. Simulação da resposta da tensão de saída de um circuito ponte autobalanceado para a) ar e b) óleo, usando uma *wire-mesh* típica. $k_g = 0.016$, $\sigma_{ar} = 3 \times 10^{-15} \text{Sm}^{-1}$, $\varepsilon_{ar} = 1$, $\sigma_{óleo} = 2 \times 10^{-13} \text{Sm}^{-1}$, $\varepsilon_{óleo} = 2.3$, $G_f = 1/1\text{M}\Omega$ e $C_f = 10\text{pF}$. Observe que os valores de regime estacionário são baixos, ao redor de unidades de nV, o qual torna a discriminação impossível para um sistema de aquisição normal.

A técnica pode ser melhorada ainda mais fazendo uso de um sinal impulso ou sinc e não de um degrau. Considerando que o sistema é LTI (Linear e Invariante no tempo) a resposta do circuito vai ser uma função de transferência do sistema, o que permitiria caracterizá-lo completamente. A consideração da existência de um sistema linear parece ser uma excelente aproximação da realidade, pois não se encontram elementos não lineares nos modelos dos fluidos, nem no circuito autobalanceado. A outra consideração, de invariância no tempo, não é válida, pois a mistura de fluidos pode mudar durante o período da medição. Entretanto, considerando que a medição através dessas técnicas é muito rápida, se pode fazer a aproximação da ocorrência de um sistema invariante no tempo. Este tipo de técnica corresponde à variação *Black-Box Model*.

Na prática, não é possível implementar o sinal impulso, mas ele pode ser aproximado, por exemplo, com um sinal pulso retangular. Além disso, um estudo da resposta ao impulso ideal apresentaria valores de tensão muito altos na saída para serem suportados por um circuito real, considerando um circuito típico. Assim, se deve estudar as características do sinal a ser aplicado e a resposta que vai ter o sistema. No caso em que se tenha um sinal de entrada controlado e um sinal de resposta, medidos simultaneamente, o uso de técnicas de identificação de sistemas pode fornecer uma aproximação excelente à função de transferência do sistema. Estas técnicas usam métodos estatísticos para construir os modelos matemáticos de sistemas dinâmicos a partir dos dados medidos, sem o prévio conhecimento do que acontece dentro do sistema. A Figura 47 representa uma aplicação geral recursiva para a identificação de um

sistema. A identificação do sistema está composto por um Sistema Desconhecido que tem um sinal de entrada, ou sinal de estímulo $u(k)$, e um sinal de saída, ou sinal de resposta $y(k)$. O estímulo $u(k)$ é a entrada para o Sistema Desconhecido e o Modelo Adaptativo. A resposta do sistema desconhecido $y(k)$ e a resposta do modelo adaptativo $\hat{y}(k)$ são combinadas para determinar o erro do sistema $e(k)$. O erro do sistema é definido pela seguinte equação

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k). \quad (2.163)$$

O modelo adaptativo gera a resposta previsível $\hat{y}(k + 1)$ baseado em $u(k + 1)$, depois de ajustar o vetor paramétrico $\hat{w}(k)$ baseado no erro $e(k)$. Geralmente se itera sobre este processo até que se minimiza a magnitude do erro quadrático médio. Assim, o vetor paramétrico $\hat{w}(k)$ é uma representação fiável do sistema $h(k)$. Aqui é preciso fazer um estudo detalhado dos tipos de sinais que poderiam ser usados como estímulo $u(k)$ e o algoritmo que usa o modelo adaptativo para minimizar o erro $e(k)$, já que influenciam o resultado e devem revelar os valores de resistência e capacitância do fluido.

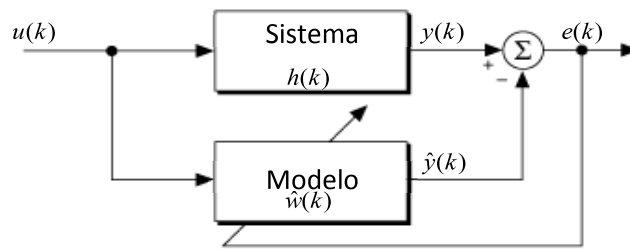


Figura 47. Esquema geral para a identificação de um sistema com um algoritmo recursivo.

Um problema dessas técnicas é a geração do sinal de estímulo, pois se são degrau ou pulso, deve ser o mais perfeito possível. Mas esses sinais podem ser alterados pelos elementos parasitas entre o gerador e o fio transmissor. Assim, se deve fazer um estudo desses efeitos no sinal de saída e encontrar uma forma de anulá-los. Nesses casos, a taxa de aquisição dos ADC precisa ser estudada cuidadosamente, mas se os tempos de resposta estão dominados pelo casal G_f - C_f , estima-se que a taxa de amostragem deve estar ao redor dos 40 MS/s.

2.3.5. Sumario das técnicas de medição compatíveis com a tecnologia *wire-mesh*

Na Tabela 7 são apresentadas as principais vantagens e desvantagens das técnicas de medida consideradas acima. São consideradas na avaliação o custo da implementação do *hardware*, a complexidade matemática das teorias envolvidas, as limitações que se tem na prática da medição (seção anterior), entre outros. O sistema implementado neste trabalho também teve de tomar em conta os requerimentos necessários para obter dados úteis para as pesquisas realizadas no NETeF. Por exemplo, as pesquisas em escoamentos altamente

turbulentos requerem imagens transversais do escoamento a uma taxa temporal alta. Isso implica que o sistema de aquisição deve determinar a permissividade complexa de cada ponto de cruzamento do sensor no menor tempo possível. Outros experimentos, como a medição de outras variáveis dos fluidos e da topologia, como a medição da espessura de filmes de água em escoamento anular, requerem um sistema de medição que seja adaptável a outras geometrias do sensor *wire-mesh*. Deste modo, um intuito é obter um sistema que alcance 5000 frames/segundo durante pelo menos 20 segundos, num sensor *wire-mesh* de 16×16 .

Tabela 7. Comparação das técnicas de medida estudadas

Técnica	Vantagens	Desvantagens	Custo
Duas Frequências Diferentes	- Método matematicamente simples - Pode usar sistemas de aquisição básicos	- Os fluidos não condutores apresentam frequências de corte $< 1\text{Hz}$	Baixo
Magnitude e Fase	- Método matematicamente simples	- Taxas de amostragem muito altas	Alto
Parte Real e Imaginária	- Método matematicamente simples - Consegue discriminar materiais não condutores a partir da amplitude da tensão elétrica - Compatibilidade com os métodos de calibração usados em sondas de impedância	- Taxas de amostragem altas - Precisa de maior capacidade de armazenagem para as amostras	Médio
Identificação de Sistemas <i>Grey-Box</i>	- Complexidade matemática média - Taxas de amostragem normais	- Qualidade do sinal de excitação - Circuito de medição complexo	Médio
Identificação de Sistemas <i>Black-Box</i>	- Identifica a função de transferência completa do fluido	- Qualidade do sinal de excitação - Complexidade matemática alta - Circuito de medição complexo - Podem requer mais tempo para obter uma medida (30 vezes maior) - Taxas de amostragem altas - Precisa de maior capacidade de armazenagem para as amostras	Médio

Devido às limitações impostas pelo sistema de aquisição de dados, só se consideram viáveis para implementação, (i) a técnica de medição em duas frequências diferentes, (ii) da parte real e imaginária e (iii) as duas técnicas baseadas na identificação do sistema. Dessas, a medição da parte real e imaginária apresenta-se como técnica com boa relação entre as vantagens, desvantagens e custo. Além disso, a implementação de um sistema de aquisição de dados compatível com esta técnica permitiria a utilização das técnicas de identificação no mesmo sistema.

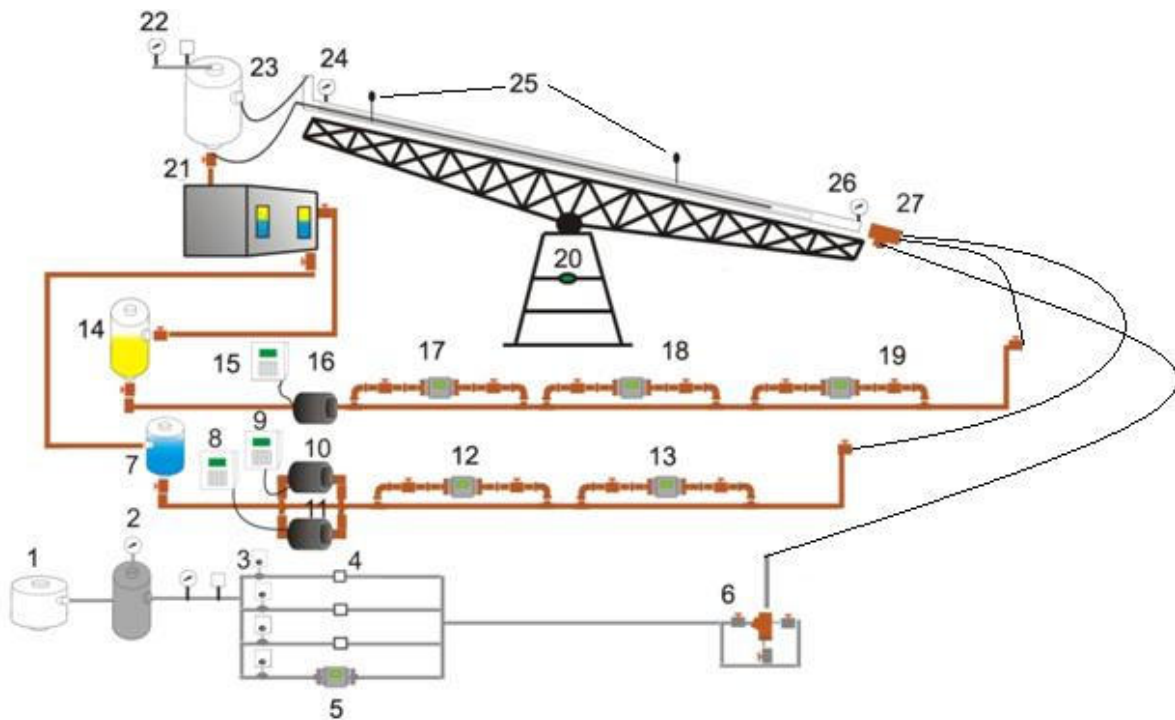
CAPÍTULO 3. CIRCUITO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será apresentado o circuito experimental do Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos (NETeF) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, (EESC-USP). Serão descritos os equipamentos utilizados e os procedimentos de coleta de dados e calibração. Além disso, será apresentado o trabalho experimental realizado no circuito multifásico do NETeF, assim como as seguintes etapas do trabalho. O circuito experimental já existente no NETeF foi utilizado, com algumas modificações. As modificações empreendidas foram o projeto e montagem de uma nova linha de teste em acrílico de 12 metros de comprimento e 26 mm de diâmetro, projetada para a geração de escoamento do tipo gás-líquido, líquido-líquido ou gás-líquido-líquido, no caso ar, água e óleo, na horizontal ou com inclinação. Além disso, a linha foi preparada para a instalação do sensor *wire-mesh*.

Os componentes básicos utilizados do circuito do NETeF são:

- Compressor;
- Separador de água e óleo, com capacidade de 2200 litros;
- Bombas para óleo e água;
- Transdutor de pressão diferencial;
- Medidores de vazão de óleo, água e ar;
- Válvulas solenóides para corte e desvio rápido de fluxo;
- Linha auxiliar de *bypass*;
- Dispositivos de segurança para calibração e controle dos instrumentos de medida (válvulas, sensores, etc.);
- Computador de comando.
- Linha de teste horizontal.
- Linha de teste vertical

Os fluidos de teste utilizados nos experimentos foram óleo mineral, com valores aproximados de viscosidade de 220 mPa s e densidade 860 kg/m³ e água a 25 °C. Os valores de densidade e viscosidade adotados para a água foram 1000 kg/m³ e 1,0 mPa s, respectivamente. A Figura 48 apresenta o esquema do circuito experimental, equipamentos e instrumentação.



Número	Equipamento	Número	Equipamento	Número	Equipamento
1	Reservatório de gás	10	Bomba de Água helicoidal	19	<i>Bypass</i> – Medidor óleo Flowpet
2	Compressor Schulz	11	Bomba de Água centrífuga	20	Inclinômetro
3	Controladores eletro-pneumáticos de ar	12	<i>Bypass</i> - Medidor de água OGT	21	Separador Bifásico de placas
4	<i>Bypass</i> - Medidores de vazão de ar, de turbina	13	<i>Bypass</i> - Medidor de água Ex Delta	22	Medidor de Pressão
5	<i>Bypass</i> - Medidor gás GAL50 Oval	14	Reservatório de óleo	23	Separador de gás intermediário
6	Válvula de um sentido	15	Variador de Frequência para bomba de óleo Helicoidal	24	Válvula de fechamento rápido - jusante
7	Reservatório de água	16	Bomba de óleo helicoidal	25	Medidor de Pressão Valydine
8	Variador de Frequência para bomba de água centrífuga	17	<i>Bypass</i> – Medidor óleo FLOWPET-EG LS5376 Oval	26	Válvula de fechamento rápido - montante
9	Variador de Frequência para bomba de água Helicoidal	18	<i>Bypass</i> – Medidor óleo LSF45 Oval M-III	27	Misturador

Figura 48. Esquema do circuito experimental horizontal.

3.1 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

3.1.1. Sistema de suprimento de ar

Um compressor do tipo parafuso da Schulz Modelo 3030 com uma potencia de 30 hp, é responsável pelo suprimento de ar para o sistema (Figura 49). Operando com uma vazão efetiva de 3511 L/min. e pressão de saída (de trabalho) de 7,5 bar, o compressor alimenta um reservatório de ar que equaliza a variação de pressão do sistema, evitando assim variações de pressão inconvenientes para testes em regime permanente. Depois, o ar é refrigerado por um trocador de calor, seguindo por uma ramificação de três vias contendo uma válvula de controle elétrica em cada. Esse sistema de válvulas é responsável pelo controle da vazão de ar que chega às linhas de teste.



Figura 49. Compressor de ar Schulz 3030.

3.1.2. Sistema de suprimento de água e óleo

A água e o óleo mineral ficam armazenados separadamente em reservatórios ou tanques de polipropileno, e são bombeados para a linha de teste através de bombas de deslocamento positivo helicoidais do tipo parafuso. Elas são acionadas remotamente por inversores de frequência de 12 kW (Figura 50). Para o bombeamento de água foi utilizada uma bomba helicoidal Weatherford de 15 CV e potência absorvida de 10 CV, contando com um coeficiente de segurança; e para o de óleo uma bomba helicoidal do tipo parafuso Weatherford modelo 2WHT 53/F, com potência de 10 CV. A Figura 51 mostra as bombas helicoidais de óleo e água utilizadas, respectivamente, Rodriguez (2009).



Figura 50. Inversores de Frequência.



Figura 51. Bombas helicoidais de alimentação de água e óleo, Rodriguez (2009).

Óleo e água são bombeados dos tanques de armazenamento, passando por tubulações em PVC de 2” até alcançar as diferentes seções de teste. O ar chega às seções de teste através uma tubulação em PVC de 1”. Após cada seção de teste, a mistura água-óleo-ar passa por um tanque separador de gás intermediário e depois os líquidos chegam a um separador do tipo placas coalescentes. Uma vez separados, cada líquido segue para o reservatório respectivo por ação da gravidade.

Tanto os inversores de frequência, quanto a rotação do motor da bomba, e válvulas elétricas para o ar são controlados remotamente por um programa em plataforma LabView®, através do protocolo CAN de comunicação, sob uma rede ethernet, e transdutores 4-20 mA.

3.1.3. Separador de placas coalescentes

Um separador de placas coalescentes com uma capacidade de 2200 litros é utilizado para o processo de separação da mistura de água e óleo proveniente das seções de teste. O

revestimento interno das placas é feito com uma resina especial à base de poliéster para melhorar sua afinidade com a água e repulsão ao óleo em uma das faces (face hidrofílica e oleofóbica). Fenômeno recíproco deve ocorrer na face oposta da mesma (face hidrofóbica e oleofílica), esta em PVC. Assim, ele pode operar com misturas de óleo em água e também com misturas de água em óleo. O separador está dividido em três câmaras, como pode ser observado no diagrama esquemático da Figura 52. A primeira, na entrada, possui quatro chicanas para regularizar o escoamento da mistura antes deste chegar até as placas separadoras. Na segunda câmara, onde ocorre efetivamente a separação, encontram-se as placas corrugadas que realizam a separação dos fluidos. O princípio de separação consiste em facilitar a aglutinação ou coalescência das gotas de água ou óleo que se encontram misturadas em uma dispersão homogênea, formando gotas cada vez maiores e aumentando assim sua velocidade de ascensão ou descenso, conforme a lei de Stokes. Estas bolhas se separam naturalmente devido à diferença de densidade entre os fluidos. A seguir, a terceira câmara serve apenas para armazenar os volumes de água e óleo, que retornam por gravidade para os tanques de armazenamento respectivos, Rodriguez (2009). A Figura 53, mostra o separador de placas coalescentes.

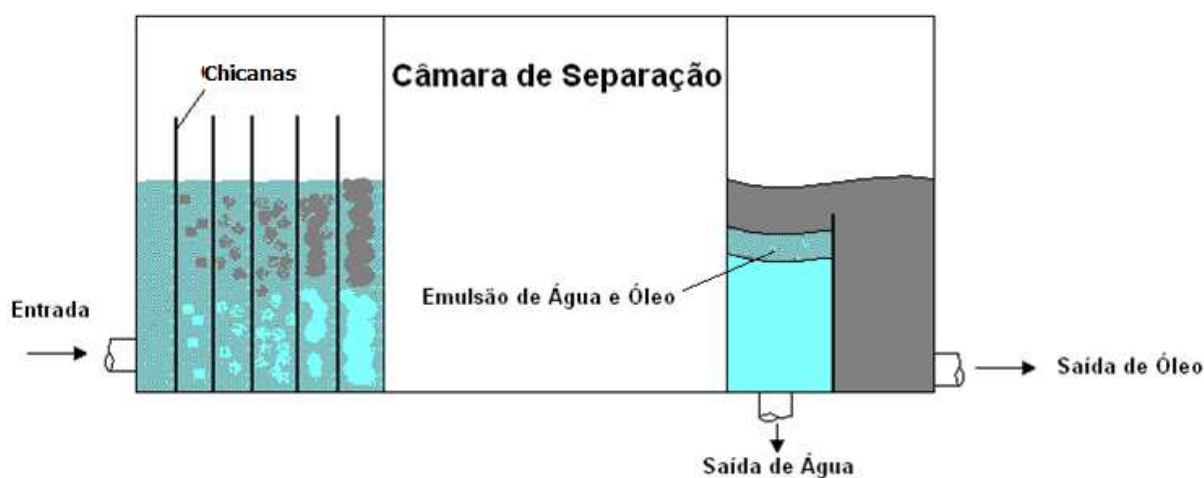


Figura 52. Diagrama esquemático do separador de placas coalescentes, Rodriguez (2009).

3.1.4. Medidores de vazão

Para a medição de vazão de água foram usados dois medidores. Para baixas vazões de água, um medidor de engrenagens modelo OGT da Oval. Para vazões altas, foi usado um medidor vórtex Modelo EX-DELTA VXW1050 da Oval. Com a intenção de atingir vazões altas o suficiente para observar o padrão disperso, o medidor usado na maioria dos testes foi o EX-DELTA da Oval. Na Figura 54a e b podem ser observados os medidores de água de alta e de baixa vazão, respectivamente. O medidor EX-DELTA funciona pelo princípio da oscilação da esteira de Von Karman.



Figura 53. Separador de água e óleo do tipo placas coalescentes.



a)



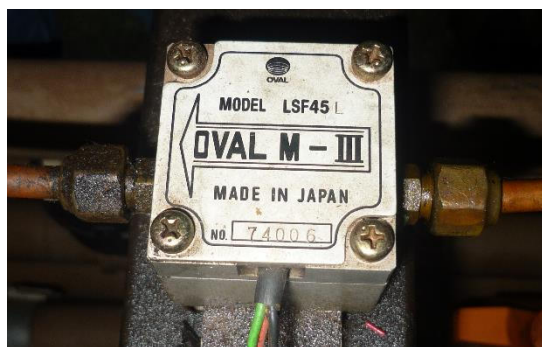
b)

Figura 54. Medidores de vazão de água. a) Alta vazão; b) Baixa vazão.

Para medição de vazão de óleo também foram usados dois medidores. Para vazões altas um medidor FLOWPET-EG LS5376 da Oval, Figura 55.a. Esse funciona pelo princípio de engrenagens, ou seja, é de deslocamento positivo e tem uma incerteza relativa de $\pm 0,5\%$ da medição. Já para vazões baixas foi usado um medidor modelo LSF45 Oval M-III, Figura 55.b.



a)



b)

Figura 55. Medidores de vazão de óleo. a) Altas vazões; b) Baixas vazões.

Para medição de vazão do ar, foram utilizados quatro medidores. Para vazões médias, é usado um medidor GAL50 da Oval, Figura 56.a., que funciona pelo princípio de engrenagens. Para vazões baixas, médias e altas se usam medidores de turbina da Contech modelos SVTG3/8", SVTG1" e SVTG2.1/2", Figura 56b à d. Para fazer correções no cálculo da vazões, devido à compressibilidade do ar, a instalação conta com um transdutor de pressão de 0-5 bar (com uma incerteza do 0,5% FS) e um termopar tipo K (calibrado entre -20 e 40 °C). A instalação destes equipamentos foi dirigida pelos alunos de doutorado Marcelo Souza de Castro e Fernando Alves Mendes. A faixa e incerteza de medição para os oito medidores citados podem ser vistas na Tabela 8; enquanto a faixa de velocidades superficiais medida para cada linha pode ser vista na Tabela 9.



a)



b)



c)



d)

Figura 56. Medidores de vazão de ar. a) GAL50 Oval; b) SVTG3/8" Contech; c) SVTG1" Contech; d) SVTG2.1/2" Contech.

O sinal de saída de todos os medidores é adquirido, tratado e convertido em sinal de vazão através de um sistema de aquisição de dados que integra um programa desenvolvido na plataforma LabView® e uma placa de aquisição modelo PCI-6224 da *National Instruments*. A mesma tem uma velocidade de 250 kHz e uma resolução de medida de 16 bits. Possui 48 portas digitais e 32 entradas analógicas. As entradas analógicas foram utilizadas para ligar toda a instrumentação. Os atuadores que controlam as vazões de água, ar e óleo são acionados via sistema CAN.

Tabela 8. Faixas de medição dos medidores de vazão de água, óleo e ar.

Medidor	Fluido	Vazão	Incerteza (% do valor medido)
OGT Oval	Água	1,0 – 35 L/min	$\pm 1,25$
EX-DELTA VXW1050 Oval	Água	33,33-1300 L/min	$\pm 1,0$
LSF45 Oval M-III	Óleo	0,05-8,0 L/min	$\pm 1,0$
FLOWPET-EG LS5376 Oval	Óleo	2,5 - 106, 7 L/min	$\pm 0,5$
GAL50 Oval	Ar	180 – 1200 L/h	$\pm 1,0$
SVTG3/8” Contech	Ar	0,8-8 m ³ /h	$\pm 0,3\%$
SVTG1” Contech	Ar	8-80 m ³ /h	$\pm 0,3\%$
SVTG2.1/2” Contech	Ar	80-800 m ³ /h	$\pm 0,3\%$

Tabela 9. Faixas de velocidades superficiais dos medidores de vazão de água, óleo e ar, para as linhas horizontal e vertical.

Medidor	Fluido	Velocidade superficial na linha horizontal (m/s)	Velocidade superficial na linha vertical (m/s)
OGT Oval	Água	0,03 - 1,0	0,00848 - 0,297
EX-DELTA VXW1050 Oval	Água	1,0 - 40	0,28 - 11,03
LSF45 Oval M-III	Óleo	0,00152 - 0,25	0,000424 - 0,0679
FLOWPET-EG LS5376 Oval	Óleo	0,078 - 3,35	0,0212 - 0,905
GAL50 Oval	Ar	5,65 - 37,66	1,527 - 10,185
SVTG3/8” Contech	Ar	0,41 - 4,18	0,113 - 1,131
SVTG1” Contech	Ar	4,18 - 41,85	1,131 - 11,317
SVTG2.1/2” Contech	Ar	41,85 - 418,55	11,317 - 113,176

a. Calibração dos medidores de vazão

Os medidores vieram com uma calibração de fábrica, ou seja, já vieram com um fator de conversão pulso para volume. Entretanto, todas as calibrações de fábrica são verificadas regularmente através da técnica gravimétrica (balança e cronômetro), no caso de água e óleo, para garantir que o erro de medição seja pequeno. Para tal, a vazão lida pelo medidor é comparada com a vazão “real”, dada pela razão entre a massa ou volume, deduzidos através da leitura da balança e pelo conhecimento da densidade do fluido, e o tempo, marcado pelo cronômetro.

Segundo a última verificação, feita em janeiro de 2012, as vazões lidas pelos medidores em comparação à vazão “real”, obtida pela técnica gravimétrica, apresentaram diferenças de no máximo 5%.

3.2 MONTAGEM DA SEÇÃO DE TESTE HORIZONTAL

Nesta seção será descrita a montagem da linha de acrílico. Informações sobre aquisição de materiais, fabricação de peças e instalação da instrumentação serão apresentadas.

Para a montagem da tubulação de acrílico de 12 m foram utilizados tubos de 2 m com diâmetro interno de 26,4 mm. O comprimento mínimo garante o desenvolvimento completo da hidrodinâmica do escoamento. A união entre os tubos foi feita através de peças em PVC. Cada união consiste de uma peça cilíndrica e 2 flanges. Entre as uniões foram colocados *orings* para impedir vazamentos. As peças para união dos tubos foram dimensionadas com a ajuda do aluno de iniciação científica Vitor Daudt de Mello e fabricadas no laboratório pelo técnico Helio J. D. Trebi. A fixação dos tubos de acrílico na estrutura metálica inclinável (gangorra) foi feita através de abraçadeiras de alumínio. Cada união foi suportada por uma abraçadeira fixada a duas chapas de aço, as quais por sua vez foram fixadas na estrutura. Este tipo de peça permite um ajuste lateral do local de fixação do suporte, assim como também regulagem de altura. As chapas possuem quatro furos, permitindo a fixação na estrutura sem grandes deslocamentos laterais. Além das uniões, foram colocadas outras peças em PVC ao longo da linha para dar maior suporte e estabilidade à linha. Estas peças estão suportadas por uma abraçadeira fixada diretamente na estrutura metálica da gangorra. Detalhes sobre as uniões e suportes em PVC já devidamente instalados podem ser observados na Figura 57. As linhas de óleo e água são tubulações em PVC que interligam os respectivos reservatórios à linha de teste.

Antes de dar início ao processo de instalação do misturador, as válvulas solenoides de fechamento rápido foram instaladas. As válvulas foram fixadas na estrutura metálica e as conexões elétricas foram ligadas. Com as válvulas instaladas, o misturador foi montado a montante da tubulação. O misturador consiste em uma tubulação tipo “Y” de PVC (Figura 58) e foi montado de forma que a fase líquida menos densa (óleo) entre pela região superior e a fase líquida mais densa (água) entre pela parte inferior. A instalação da linha foi realizada pelo técnico José Roberto Bogni e o aluno de iniciação científica Vitor Daudt de Mello. Na Figura 59 pode ser observada a linha em acrílico, montada especialmente para este projeto sobre a estrutura metálica inclinável e ao lado da linha de vidro previamente existente.

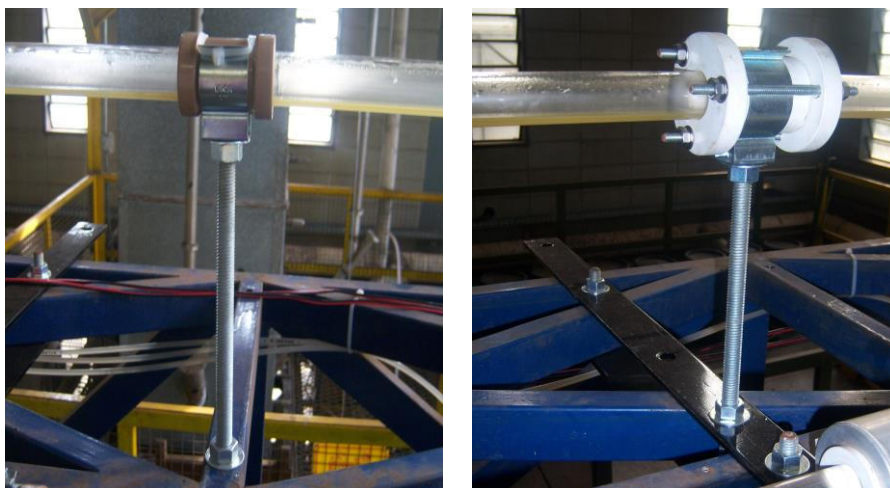


Figura 57. Suportes dos tubos da seção de teste.



Figura 58. Misturador óleo-água-ar, Rodriguez (2009).

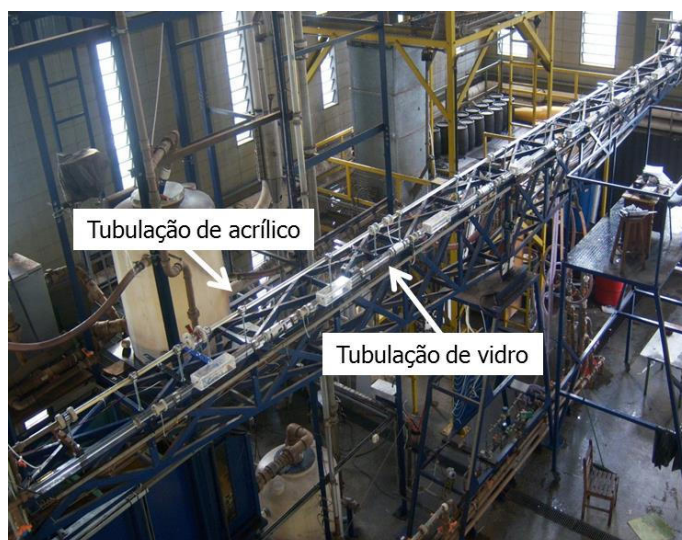


Figura 59. Tubulação de acrílico de 12m montada sobre a estrutura metálica inclinável.

3.2.1. Sensor *wire-mesh* linha horizontal

O protótipo utilizado nos experimentos na horizontal foi desenvolvido na Alemanha, no Centro de Pesquisa de Dresden-Rossendorf, com as mesmas dimensões do tubo de testes do NETeF. O sensor consiste em dois planos de 8 fios de 0,12 mm de diâmetro cada. Os planos são separados entre si por 1,6 mm e os fios de cada plano estão separados por uma distância de 3,0 mm. Na Figura 60, pode ser observado o protótipo alemão do sensor *wire-mesh* 8×8. A separação entre fios de um plano determina a resolução espacial do sensor, neste caso $3 \times 3 \text{ mm}^2$, que, embora seja média (Tabela 3), ainda é sensível à passagem de estruturas com dimensões menores. Assim, cada ponto de cruzamento realmente é sensível às mudanças das características elétricas num volume de $3 \times 3 \times 1,6 \text{ mm}^3$, com centro no ponto de cruzamento, Da Silva (2008).

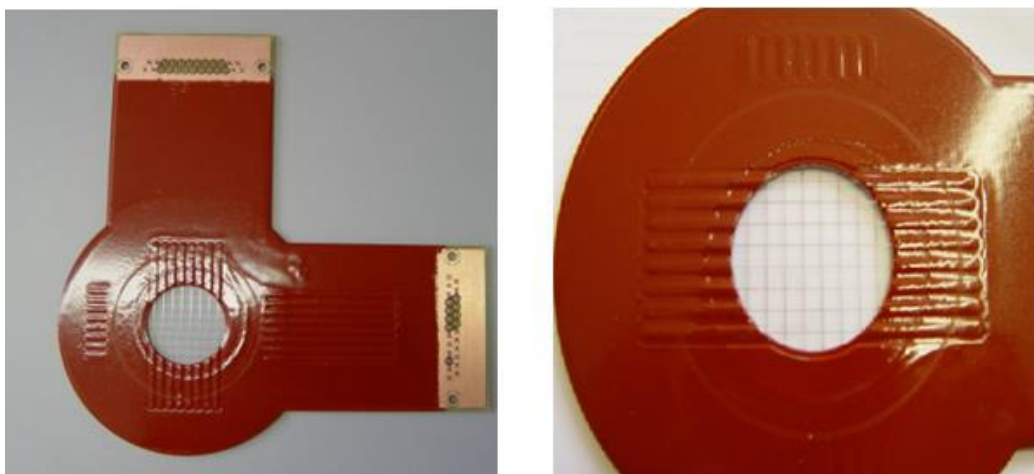


Figura 60. Sensor do tipo *wire-mesh* (configuração 8x8), Rodriguez (2014).

Iniciamos o projeto de instalação do sensor *wire-mesh* dimensionando e fabricando os flanges para fixação do sensor na linha. Os flanges consistem em duas peças acrílicas e duas peças de PVC, cujo objetivo é prensar a sonda. As peças em PVC e acrílico, que compõem o flange, podem ser observadas na Figura 61.

As peças em acrílico possibilitam a visualização do escoamento a montante e a jusante do sensor. As peças em PVC permitem a fixação do flange na tubulação. Alguns detalhes dos flanges podem ser vistos na Figura 62, onde observamos que as peças em PVC sofrem o aperto por três parafusos e a vedação é feita através de *o-rings*. Finalmente, foi realizada a devida instalação do sensor na linha a 10 m a jusante do início da seção de teste. O sensor devidamente instalado na seção de teste pode ser observado na Figura 63. A Figura 64 mostra a instalação completa do sistema na linha horizontal. A fabricação dos flanges foi feita pelo técnico do laboratório Helio J. D. Trebi e a instalação pelo técnico José Bogni.

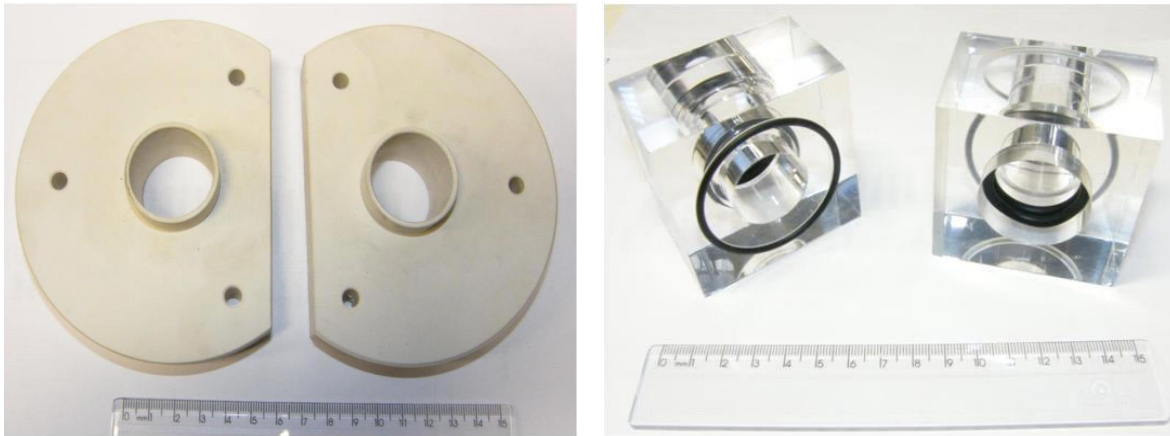


Figura 61. Peças utilizadas para fabricação do flange.

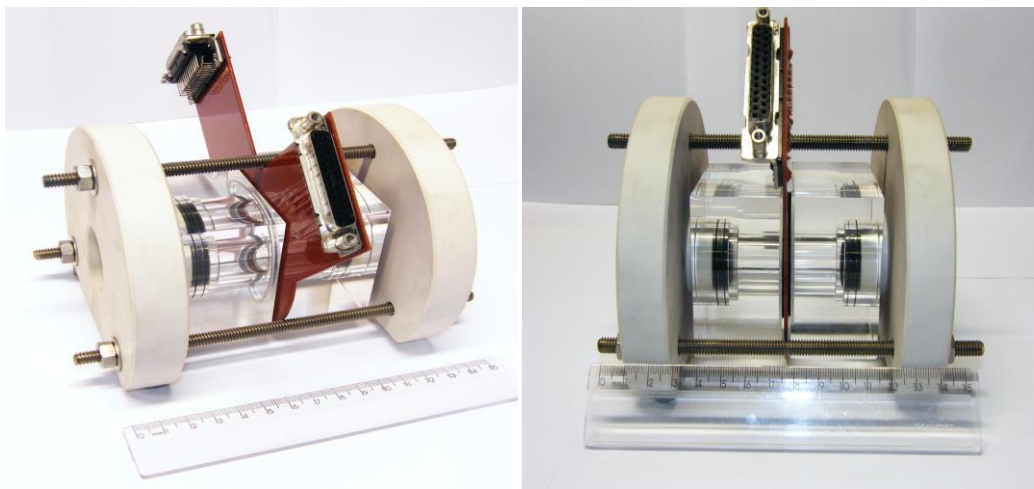


Figura 62. Detalhes da montagem do flange, com caixa de visualização.

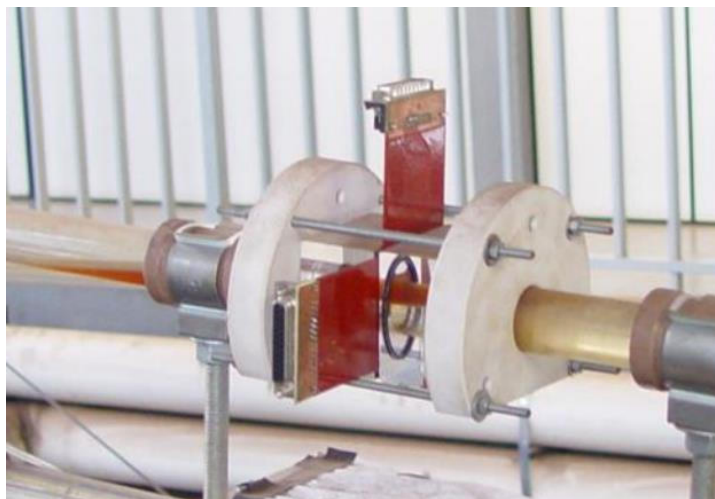


Figura 63. Sensor *wire-mesh* instalado na linha de teste de acrílico, Rodriguez (2014).

3.2.2. Transdutor de pressão (linha horizontal)

Para obtenção das medidas de queda de pressão, foi usado um transdutor de pressão diferencial da marca Validyne modelo DP-15 com incerteza de 0.5% do fundo de escala (Figura 65). O fundo de escala, que a partir de agora será mencionado pela sigla FS, refere-se à pressão

máxima medida. Este tipo de transdutor tem apenas um elemento sensível à pressão, o diafragma (Figura 65), que pode ser substituído, possibilitando o uso do mesmo transdutor para a medida de diferentes faixas de pressão.



Figura 64. Fotografia do sistema WMT implementada na linha horizontal no NETeF.

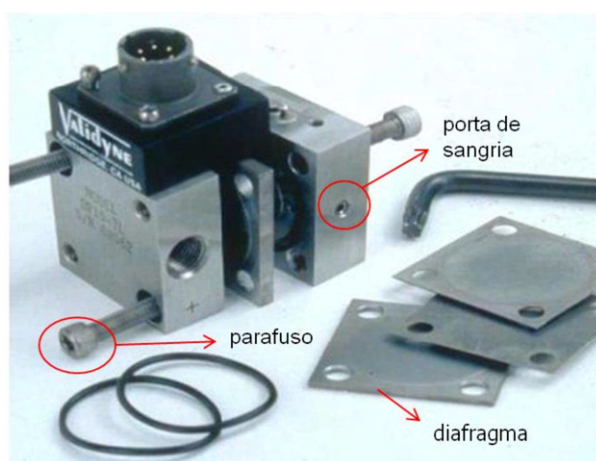


Figura 65. Transdutor de pressão diferencial da marca Validyne, Rodriguez (2014).

Na Tabela 10 pode ser vista a escala de pressão (FS) para seleção do diafragma. Estes dados foram retirados do manual do equipamento. Para conectar o transdutor à linha foram usadas duas mangueiras e duas tomadas que foram instaladas na seção de teste. A primeira tomada de pressão foi colocada a 2,8 m do início da seção. As tomadas distaram 5 m uma da outra.

Tabela 10 Escala de pressão para seleção de alguns diafragmas.

Diafragma no	psi	kPa	mm Hg
28	0,8	5,5	41,4
30	1,25	8,6	65
32	2	14	103
34	3,2	22	165
36	5	35	258
38	8	55	414
40	12,5	86	650

a. Calibração do transdutor de pressão

Antes da montagem, é feita a calibração do transdutor. Para o procedimento de calibração foi necessária a construção de uma coluna de mercúrio (Figura 66). A curva de calibração do transdutor com o diafragma 38 (FS 55 kPa) é apresentada na Figura 67. Para todos os diafragmas utilizados foi obtida uma curva de calibração do mesmo tipo.



Figura 66. Coluna de mercúrio.

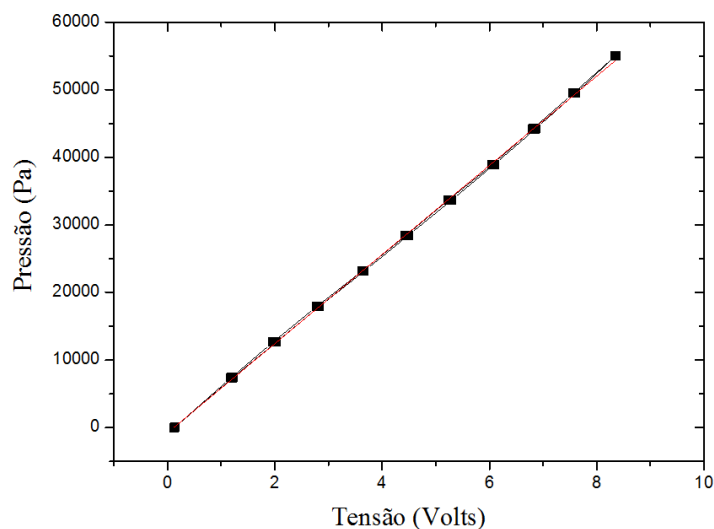


Figura 67. Curva de calibração do transdutor de pressão diferencial (diafragma 38), Rodriguez (2009).

b. Montagem

Após o procedimento de calibração, o transdutor foi apropriadamente instalado, fazendo conexões de tubos que permitem a sua fácil remoção para desmontagem, troca de diafragma e procedimentos de manutenção e limpeza. Na Figura 68 pode ser visto o esquema de válvulas instaladas (válvulas de dreno, de fechamento e a válvula de passagem). Antes e depois de cada medição, foram seguidos os adequados procedimentos de pressurização e despressurização (retirados do manual do equipamento) da seguinte maneira: para pressurizar o transdutor de pressão, as válvulas de dreno eram fechadas e a válvula de passagem aberta. Então, as válvulas de fechamento eram abertas para aplicar a pressão em ambos os lados do transdutor. Finalmente, válvula de passagem era fechada. Depois de realizada a medição, o processo de despressurização era feito abrindo a válvula de passagem, fechando as válvulas de fechamento e abrindo as válvulas de dreno.

c. Troca de diafragma

Para troca de diafragma, o seguinte procedimento foi seguido: as mangueiras das tomadas de pressão eram desconectadas do transdutor. Os dois parafusos de cada lado (Figura 65) eram removidos com uma chave Allen. Assim, as duas metades da caixa eram separadas e o diafragma removido cuidadosamente. Logo em seguida, era efetuada a limpeza do diafragma e as metades da caixa. Após isso, a remontagem do transdutor era feita.

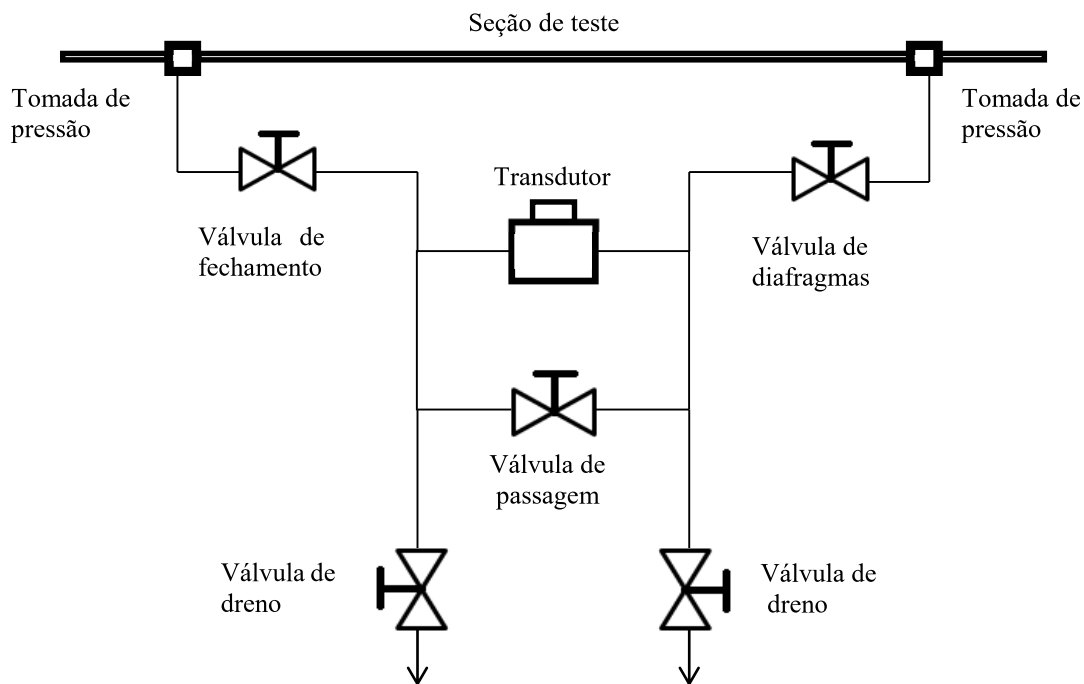


Figura 68. Esquema do arranjo de válvulas do transdutor de pressão diferencial, Rodriguez (2014).

d. Sangria

Para garantir uma medição correta é importante garantir que não existam bolhas de ar nas mangueiras das tomadas e nas cavidades de pressão. Para isso o transdutor da Validyne é equipado com portas de sangria (Figura 65) para facilitar a limpeza e preenchimento das cavidades de pressão. Essa porta é fechada por pequenos parafusos. Assim, antes de iniciar as medições, foi sempre feita a sangria do transdutor. O indicado é afrouxar os parafusos uma ou duas voltas para expelir as bolhas. Devido ao grande comprimento das mangueiras utilizadas para instalação das tomadas na estrutura metálica (gangorra) foi necessário sempre a remoção dos parafusos e a sangria por alguns minutos para garantir a expulsão das bolhas e, assim, uma medição correta da queda de pressão.

3.2.3. Medição da fração volumétrica *in situ* de óleo através da técnica das válvulas de fechamento rápido

Depois de obter as medidas por WMT, um sistema de *bypass* previamente instalado viabilizou a medição de fração volumétrica *in situ* de óleo (*holdup*) com o uso de válvulas solenoides de fechamento rápido, as quais foram instaladas na linha como descrito na Seção 3.2. A Figura 69 mostra o esquema da tubulação *bypass*. Em um escoamento em regime permanente, as válvulas solenoides número V1 e V2 encontram-se abertas permitindo a passagem livre de fluido pela seção de teste. A válvula na linha auxiliar de *bypass* (V3) deve estar totalmente fechada, impedindo o desvio de fluido. Para isso, V3 deve ser mantida

energizada, juntamente com a V2 que é normalmente fechada. Energizando V1 e desenergizando V2 e V3 simultaneamente, fechamos a linha de teste e abrimos a passagem para o *bypass*, fazendo com que todo o escoamento se desloque pela válvula V3. Deste modo é realizado o aprisionamento da mistura na linha de teste para um posterior esgotamento e medição da fração volumétrica. As válvulas se fecham em 0,1 segundo.

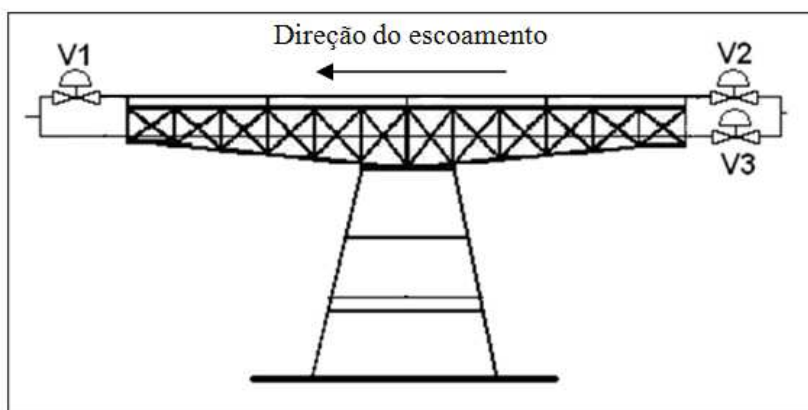


Figura 69. Esquema do sistema *Bypass*, Rodriguez (2014).

O procedimento empregado para a medição de fração volumétrica *in-situ* foi o seguinte: após a estabilização do padrão de escoamento, as válvulas de fechamento rápido V1 e V2 eram fechadas e o escoamento aprisionado. Em seguida, o esgotamento da linha era feito e os volumes de água e óleo eram mensurados através de quatro buretas de 2000 mL (com precisão de 10mL). O tempo de esgotamento para todos os testes foi de no mínimo 4 horas. A água, por ser menos viscosa, é esgotada com mais facilidade e uma quantidade considerável do óleo presente é esgotado juntamente com a água. No entanto, um pequeno volume de óleo ainda permanecia no tubo, aderido à parede do mesmo depois do esgotamento. Tal erro foi suprimido supondo que, após o período de esgotamento, a diferença entre o volume total da linha (6363 mL) e o volume coletado era composta pelo óleo não esgotado, aderido às paredes do tubo.

3.3 MONTAGEM DA SEÇÃO DE TESTE VERTICAL

A linha vertical conta com uma tubulação de vidro borossilicato de 12 m, construída com tubos de 1,5 m e diâmetro interno de 50 mm. A união entre os tubos foi feita através de luvas em PVC padronizadas de 60 mm. O sistema de geração e controle das vazões é o mesmo da Figura 48, para a linha horizontal. Através de registros manuais, se desconecta a linha horizontal e se redirecionam os fluidos até o injetor da linha vertical.



Figura 70. Imagem do poço invertido vertical.

O "poço invertido" do NETeF dispõe de válvulas de fechamento rápido, para medição da fração volumétrica de cada uma das fases que compreendem o escoamento bi ou trifásico. Também tem um sensor de pressão diferencial Valydine, como o da linha horizontal. A seção da linha principal também possui um *bypass*. Quando o escoamento é aprisionado, pelas válvulas de fechamento rápido, o escoamento continua pelo *bypass*. Esta instalação foi feita pelo aluno de doutorado Marcelo Castro de Souza. A instrumentação associada a essa instalação foi calibrada por dois alunos de iniciação científica, Lucas Silva Yoshida e Alex Colmanetti.

Para a geração e controle dos diferentes padrões trifásicos, os alunos Marcelo Castro de Souza e Bernardo Bergantini Botamede (Iniciação científica) desenvolveram um sistema injetor de ar composto de três válvulas de diferente geometria, através do qual é possível controlar a forma e tamanho das bolhas de ar que entram na tubulação. No caso de baixas vazões o sistema usa um filtro poroso, para médias vazões uma válvula agulha e para altas vazões um bocal de $\frac{1}{4}$ ", Figura 71. O dispositivo tem válvulas retentoras que evitam o retorno de líquido para a linha de ar (à montante).



Figura 71. Dispositivo para geração de padrões instalado na linha vertical (seta inferior) e válvulas para seleção manual do injetor de ar (as tres setas em vermelho).

3.3.1. Sensor *wire-mesh* linha vertical

O protótipo que será utilizado nos experimentos foi desenvolvido no NETeF. O sensor consiste em dois planos de 16 fios de 0,1 mm de diâmetro cada. As lâminas são separadas entre si por 1,0 mm e os fios de cada plano estão separados por uma distância de 3,0 mm. Na Figura 72, pode ser observado o protótipo *homemade* do sensor *wire-mesh* 16×16.

Inicia-se o projeto de instalação do sensor *wire-mesh* pelo dimensionamento e fabricação dos flanges para fixação do sensor à linha. Os flanges consistem em duas peças de alumínio e duas peças de acrílico transparente, cujo objetivo é prensar a sonda. As peças em alumínio e acrílico, que compõem o flange, podem ser observadas na Figura 73. As peças em acrílico possibilitam a visualização do escoamento a montante e a jusante do sensor. As peças em alumínio permitem a fixação do flange na tubulação. Na Figura 73 também observamos que as peças em alumínio sofrem o aperto por quatro parafusos e a vedação é feita através de *O-rings*. Finalmente, foi realizada a devida instalação do sensor na linha a 5,5 m a jusante do bocal injetor e a 1 m a jusante do início da seção de teste. O sensor devidamente instalado na seção de teste pode ser observado na Figura 74. O sistema implementado pode ser visto com detalhes na Figura 75. A fabricação e instalação dos flanges e equipamentos foi feita pelos técnicos do laboratório Helio J. D. Trebi e José Bogni.

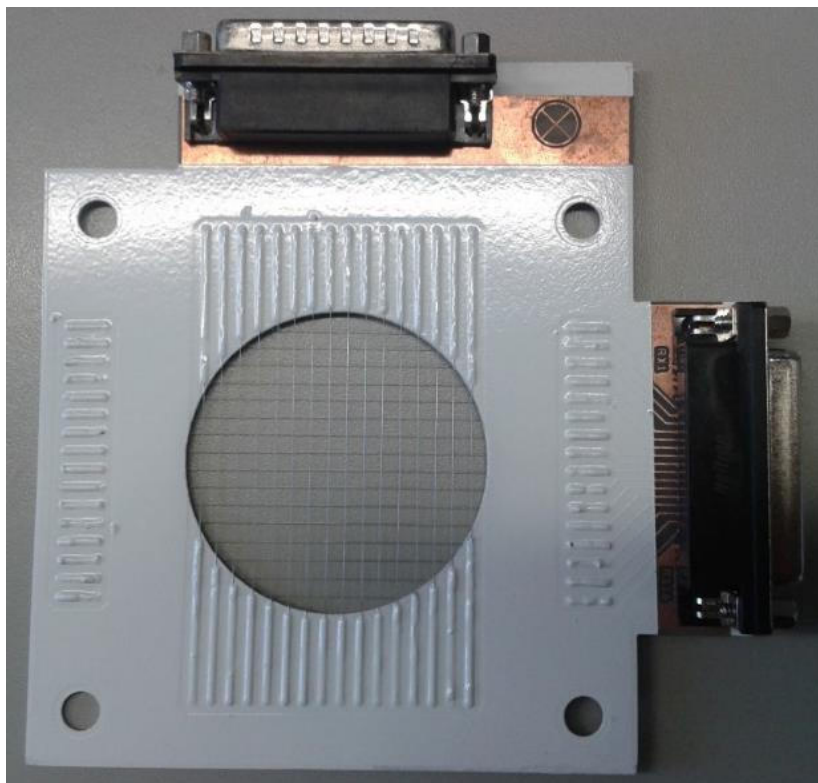


Figura 72. Sensor *homemade* do tipo *wire-mesh* usado na linha vertical (configuração 16×16).

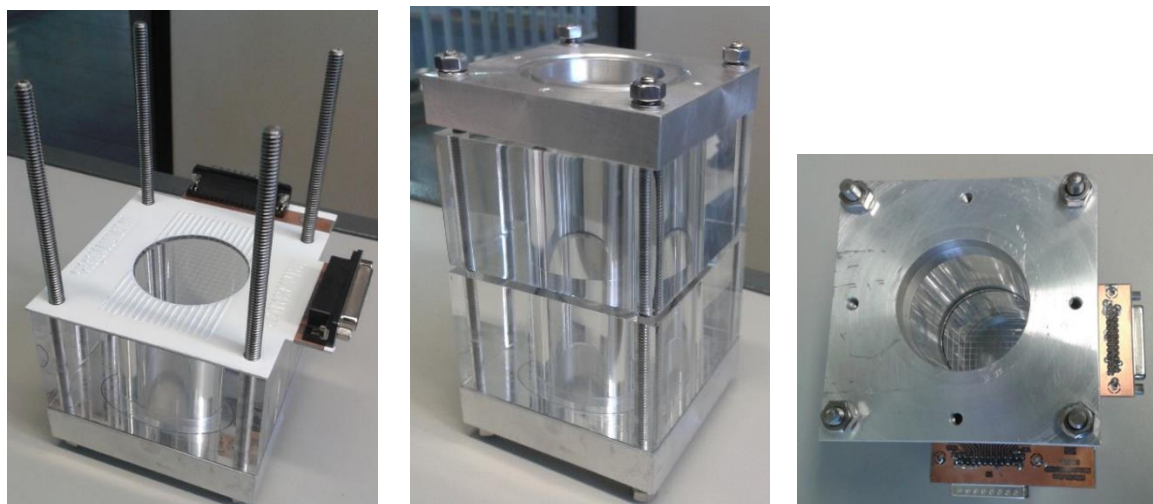


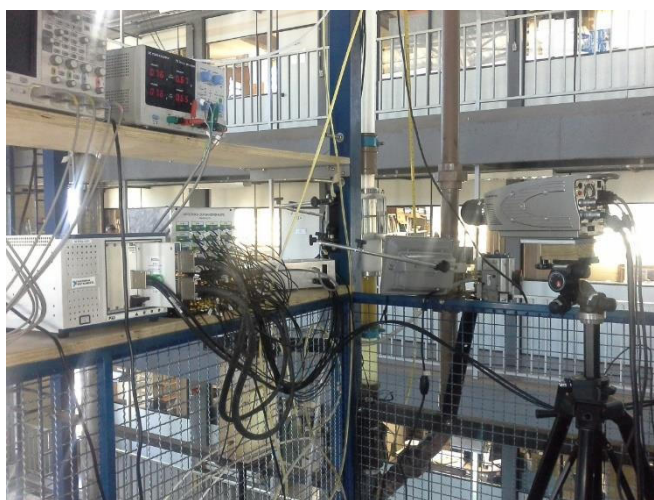
Figura 73. Peças utilizadas para fabricação do flange.



Figura 74. Montagem do flange, com caixa de visualização e *wire-mesh* na linha vertical.



a)



b)

Figura 75. Montagem experimental na linha vertical. a) Vista geral e b) detalhe

3.4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Tendo como principal objetivo o estudo da topologia de escoamentos trifásicos óleo-água-ar através do sensor *wire-mesh*, foram coletados dados da distribuição da fração das fases na seção transversal. Em alguns casos também se trabalha em escoamentos bifásicos óleo-água. Foram feitas medições de fração volumétrica *in situ (holdup)* com o uso de válvulas de fechamento rápido para calcular o deslizamento entre as fases. O sensor *wire-mesh* foi usado para obtenção de distribuição das fases, identificação de padrões e comparação com a fração volumétrica obtida através das válvulas de fechamento rápido.

Os pontos experimentais foram coletados em função das velocidades superficiais das fases para escoamento óleo-água em linha horizontal e óleo-água-ar em linha vertical. Com o intuito de observar todos os padrões de escoamento, os mapas de fluxo para escoamento vertical de Bannwart et al. (2005) foram utilizados como referência, Figura 5c, Tabela 11. Isto também permite a comparação, essencialmente qualitativa, com esses trabalhos. Devido às limitações do circuito experimental, como os equipamentos responsáveis pelo suprimento de óleo, água e ar, a faixa de trabalho ficou limitada a somente um padrão, Ig-Bo.

Para os experimentos, uma velocidade constante de água foi fixada e, em seguida, variar-se-á a velocidade superficial do óleo e depois a de ar. Então, pontos experimentais para o padrão de escoamento Ig-Bo, como o exemplificado na Figura 3f, foram testados. Se procede à aquisição dos sinais, uma vez o sistema entre em regime permanente. Se considerou regime permanente a partir de 20 segundos após a constatação de que a medição da velocidade superficial não variava mais de $\pm 0,01$ m/s. Nesse momento, medidas de fração das fases (através do sensor *wire-mesh*) são feitas, depois se faz a medição da fração das fases pelas válvulas de fechamento rápido; outros dados, como pressão na linha e temperatura dos fluidos, são coletados.

Tabela 11. Faixas de velocidades superficiais trabalhadas em escoamento vertical.

Fluido	Neste trabalho	Vertical, Bannwart et al. (2005)
óleo	$0,02 < J_o < 0,51$ m/s	$0,02 < J_o < 1,2$ m/s
água	$0,1 < J_w < 1,3$ m/s	$0,04 < J_w < 0,5$ m/s
ar	$0,01 < J_g < 1,8$ m/s	$0,04 < J_g < 9$ m/s

Um dos casos estudados é o escoamento óleo-água no padrão disperso homogêneo altamente turbulento. Esses testes são úteis para a validação do sensor e serão realizados em cooperação com a doutoranda Iara Hernandez Rodriguez do NETeF. A metodologia é basicamente a mesma descrita anteriormente.

Outro caso de medição bifásica é referente a um escoamento estratificado ondulado óleo-água. Neste experimento se quer obter uma imagem transversal da interface para confirmar novos modelos fenomenológicos do comportamento da superfície interfacial, desenvolvidos por Rodriguez; Baldani (2012) e em colaboração com o trabalho do aluno de doutorado Ricardo Pereira do NETeF. A metodologia é similar à descrita e responde às necessidades desse trabalho.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados e discutidos os resultados de diferentes experimentos que permitiram aprofundar no conhecimento e avançar na aplicação das metodologias referentes ao sensor *wire-mesh*. Inicia-se mostrando simulações por elementos finitos de um sensor *wire-mesh* em misturas bi e trifásicas. Depois, se apresentam experimentos estáticos de misturas bi e trifásicas, para determinar as melhores condições de medição. A seguir, apresentam-se os resultados de experimentos bifásicos óleo-água, destacando uma adaptação para a medição de escoamentos que incluam uma fase com alta condutividade. Finalmente, mostram-se o sistema implementado e os resultados obtidos para a medição em escoamentos trifásicos.

Para a avaliação quantitativa das técnicas de medição, foi usado o erro relativo médio (ARE) definido como

$$ARE = \frac{\text{Valor experimental} - \text{Valor referência}}{\text{Valor referência}} \times 100\% \quad (4.1)$$

onde o valor de referência corresponde ao valor teórico ou o valor medido com outra técnica. Outro parâmetro usado é a diferença definida como

$$\text{Diferença} = (\text{Valor experimental} - \text{Valor referência}) \times 100\%. \quad (4.2)$$

4.1 SIMULAÇÕES COM ELEMENTOS FINITOS

Um software de simulação de elementos finitos junto com o software comercial de cálculo numérico Matlab[®] foram usados para simular um sensor *wire-mesh* 5×5. O Matlab foi usado para variar os parâmetros da simulação enquanto o software simulação de elementos finitos foi usado para simular o comportamento da admitância frente a variação de diferentes parâmetros. Para este problema particular, obtém as soluções para a corrente elétrica no domínio da frequência, apresentadas a seguir.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = Q \quad (4.3)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}_e \quad (4.4)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (4.5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} \quad (4.6)$$

onde $\mathbf{J}$ é a densidade da corrente elétrica, Q é a carga elétrica, $\mathbf{E}$ é o campo elétrico, σ é a condutividade, $\omega = 2\pi f$ onde f é a frequência, $\mathbf{D}$ é o deslocamento elétrico, $\mathbf{J}_e$ é a corrente elétrica gerada externamente, V é a diferença de potencial, ε_0 é a permissividade do vácuo e ε_r é a permissividade relativa. No caso da eq. (4.6) se considera que os materiais são lineares e isotrópicos.

O sensor modelado no estudo consiste em 10 fios de aço inoxidável de 0,05 mm de raio, 10 mm de comprimento, 2 mm de separação entre os fios do mesmo plano e uma distância entre planos de 1,5 mm, Figura 76. O espaço de simulação é uma caixa de $12 \times 12 \times 8 \text{ mm}^3$. A malha foi formada por aproximadamente 925000 elementos tetraédricos. Como a malha é fixa e as gotículas mudam de tamanho, se requer que o tamanho dos elementos finitos sejam várias vezes menores ao menor tamanho das gotículas, para obter uma simulação mais exata. Assim, a malha é mais fina num cubo de $4 \times 4 \times 4 \text{ mm}^3$, centrada no ponto de cruzamento. As simulações foram realizadas em computadores com processadores Intel i7 com mínimo 8GB de RAM. Esta parte do trabalho foi feito em colaboração com o aluno de iniciação científica Carlos Gonzalez.

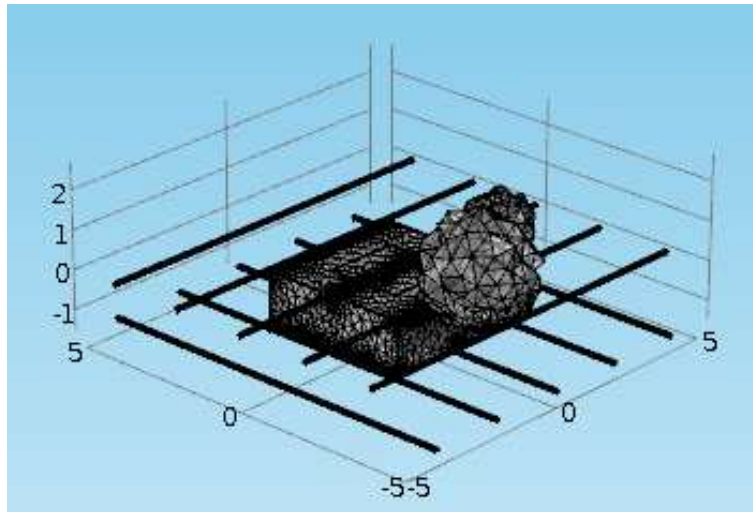


Figura 76. Sensor *wire-mesh* de 5×5 simulado com software FEM. O raio dos fios é 0,05 mm, a separação entre os fios é de 2 mm e a separação entre os planos é de 1,5 mm.

Em escoamento trifásico, para padrões de escoamento onde as fases estão separadas, como estratificado, em cada ponto de cruzamento da *wire-mesh* existirá geralmente só um fluido. Além disso, é possível a presença de no máximo dois fluidos, o que torna o problema bifásico. Assim, a simulação está orientada a recriar as condições de um padrão de bolhas ou gotas finamente dispersas, onde pequenas gotículas (da ordem de separação entre fios) consigam estabelecer um problema trifásico no ponto de cruzamento.

Cada simulação consiste em estabelecer um dos fluidos como meio contínuo, e várias regiões esféricas simulam as gotículas dos fluidos dispersos, criando uma condição de mistura particular. As gotículas variam em raio desde 0,8 mm até 2,5 mm e são localizadas em posições aleatórias dentro do espaço de simulação. Em seguida, o fio transmissor central é excitado, enquanto todos os outros são mantidos aterrados. Cada condição de mistura é simulada para 50 frequências diferentes, entre 1000Hz e 5MHz, divididas logaritmicamente. Os parâmetros de saída das simulações são a admitância no ponto transmissor central-receptor central e os valores do volume dos fluidos contidos dentro da região de máxima sensibilidade espacial do sensor. Essa região foi determinada por Richter et al. (2002) como o cubo de dimensões $d_w \times d_w \times d_z$, centrado no ponto de cruzamento, para o sensor condutivo (d_w é a distância que separa os fios de um plano e d_z é a separação entre os planos). Isto é confirmado por Da Silva (2008) para o sensor capacitivo, baseado em simulações com FEM.

Cada fluido é simulado através de três substâncias diferentes, definindo para cada um a condutividade elétrica e permissividade relativa. A primeira substância envolve todo o domínio e tem as propriedades do meio contínuo. A segunda e terceira substância (a última só no caso trifásico) são atribuídas aos volumes de fluidos dispersos. O quarto material é atribuído aos fios, sendo sempre de aço. As condições de contorno foram estabelecidas da mesma forma que no trabalho de Da Silva (2008) para o sensor capacitivo. Assim, os transmissores e receptores estão aterrados (tensão de 0 V), exceto o transmissor central que tem uma tensão de 1 V. As faces superior e inferior do cubo são aterradas (são a referência de zero volts) e as quatro faces laterais são estabelecidas para ter um componente normal do deslocamento elétrico igual a zero, $\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = 0$. As propriedades elétricas dos materiais usados podem ser vistas na Tabela 12.

Tabela 12. Propriedades elétricas dos materiais usados nas simulações trifásicas.

Material	Condutividade, σ (S/m)	Permissividade relativa, ϵ (-)
Ar	1×10^{-15}	1
Água	$4,12 \times 10^{-3}$ (trifásico) 5×10^{-3} (bifásico e cálculo de k_g)	79
Óleo	$0,04 \times 10^{-15}$	3
Aço	$6,21 \times 10^6$	1

Para obter a permissividade complexa ϵ_x a partir da admitância Y_x simulada, é preciso conhecer a constante k_g do sensor. Para esse fim foram feitas simulações, onde em todo o

domínio de simulação foi atribuída a substância água e, posteriormente, óleo. Lembrando que a admitância está dada pela equação

$$\mathbf{Y}_x = j\omega k_g \varepsilon_0 \varepsilon_x = k_g \sigma_x + j2\pi f k_g \varepsilon_0 \varepsilon_x, \quad (4.7)$$

foi calculado o valor de k_g a partir da parte real e da parte imaginária da admitância simulada e dos valores conhecidos do fluido simulado. Os resultados da simulação para água são mostrados na Tabela 13 e para óleo na Tabela 14. Se pode notar que para a água o valor deduzido de k_g se mantém constante para qualquer frequência, seja derivado da parte real ou imaginária. Para o caso do óleo, o valor k_g pode ser obtido da parte imaginária e da parte real, mas somente em baixas frequências, pois a simulação só consegue encontrar uma resposta completamente imaginária para altas frequências. Ainda assim, nos casos onde se pôde derivar, esse valor coincide com os valores encontrados para água. Então, o valor de k_g foi calculado como sendo a moda do valor das duas simulações, para todas as frequências de excitação (10 frequências entre 1 kHz e 5 MHz, distribuídas logaritmicamente). Desse modo, o valor de k_g do sensor simulado é de 0,002243 m.

Tabela 13. Admitância simulada para o sensor preenchido de água e cálculo de k_g .

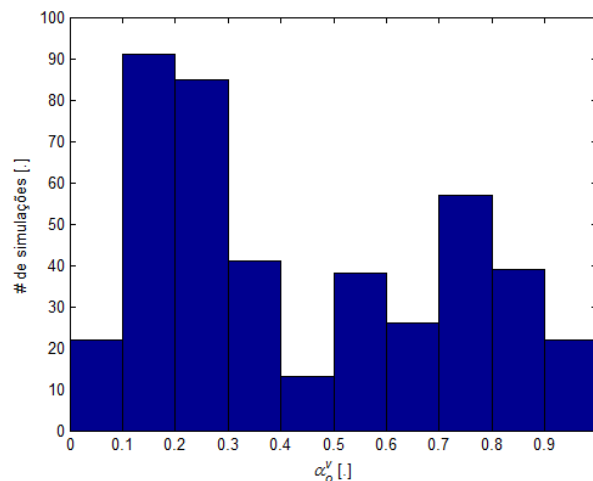
Frequência [Hz]	$\mathbf{Y}_x$ [S]	$k_g = \text{Re}(\mathbf{Y}_x) / \sigma_w$ [m]	$k_g = \text{Im}(\mathbf{Y}_x) / 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_w$ [m]
1000	$1,1214 \times 10^{-5} + j9,8565 \times 10^{-9}$	0,002243	0,002243
2576,3	$1,1214 \times 10^{-5} + j2,5394 \times 10^{-8}$	0,002243	0,002243
6637,3	$1,1214 \times 10^{-5} + j6,5422 \times 10^{-8}$	0,002243	0,002243
17100	$1,1214 \times 10^{-5} + j1,6855 \times 10^{-7}$	0,002243	0,002243
44054	$1,1214 \times 10^{-5} + j4,3423 \times 10^{-7}$	0,002243	0,002243
$1,14 \times 10^5$	$1,1214 \times 10^{-5} + j1,1187 \times 10^{-6}$	0,002243	0,002243
$2,92 \times 10^5$	$1,1214 \times 10^{-5} + j2,8821 \times 10^{-6}$	0,002243	0,002243
$7,53 \times 10^5$	$1,1214 \times 10^{-5} + j7,4252 \times 10^{-6}$	0,002243	0,002243
$1,94 \times 10^6$	$1,1214 \times 10^{-5} + j1,9129 \times 10^{-5}$	0,002243	0,002243
$5,00 \times 10^6$	$1,1214 \times 10^{-5} + j4,9283 \times 10^{-5}$	0,002244	0,002243

Tabela 14. Admitância simulada para o sensor preenchido de óleo e cálculo de k_g .

Frequência [Hz]	Y_x [S]	$k_g = \text{Re}(Y_x) / \sigma_o$ [m]	$k_g = \text{Im}(Y_x) / 2\pi f \epsilon_o \epsilon_o$ [m]
1000	$9,0146 \times 10^{-14} + j3,7434 \times 10^{-10}$	0,002254	0,002243
2576,3	$9,0821 \times 10^{-14} + j9,6440 \times 10^{-10}$	0,002271	0,002243
6637,3	$9,2558 \times 10^{-14} + j2,4846 \times 10^{-9}$	0,002314	0,002243
17100	$9,7034 \times 10^{-14} + j6,4012 \times 10^{-9}$	0,002426	0,002243
44054	$j1,6491 \times 10^{-8}$		0,002243
$1,14 \times 10^5$	$j4,2487 \times 10^{-8}$		0,002243
$2,92 \times 10^5$	$j1,0946 \times 10^{-7}$		0,002243
$7,53 \times 10^5$	$j2,8200 \times 10^{-7}$		0,002243
$1,94 \times 10^6$	$j7,2651 \times 10^{-7}$		0,002243
$5,00 \times 10^6$	$j1,8717 \times 10^{-6}$		0,002243

4.1.1. Simulação de mistura bifásica água-óleo

A simulação de mistura água-óleo foi realizada mantendo a água como a fase contínua. As gotículas de óleo variam entre 0,8 e 2,0 mm de raio e o número delas entre 5 e 15, para cada simulação. Na Figura 77 é apresentado um histograma que mostra a distribuição das frações de óleo geradas nas simulações, dividindo a fração de água em 10 intervalos iguais. Fizeram-se simulações até a obtenção ao menos 10 resultados em cada intervalo. Assim, foram realizadas 434 simulações de misturas de água-óleo.

Figura 77. Histograma da fração volumétrica de óleo α_o para a simulação de mistura água-óleo.

Na Figura 78, mostram-se os resultados da condutividade da mistura σ_x e a fração volumétrica do óleo α_o frente a frequência f . Se pode observar que o valor da condutividade não depende da frequência. Mas a Figura 78b apresenta como a condutividade pode assumir

diferentes valores em função da fração de água. Isto é, a condutividade muda dependendo do arranjo geométrico que tem as fases no ponto de cruzamento. Os resultados da permissividade relativa e a fração de água em função da frequência se podem ver na Figura 79.

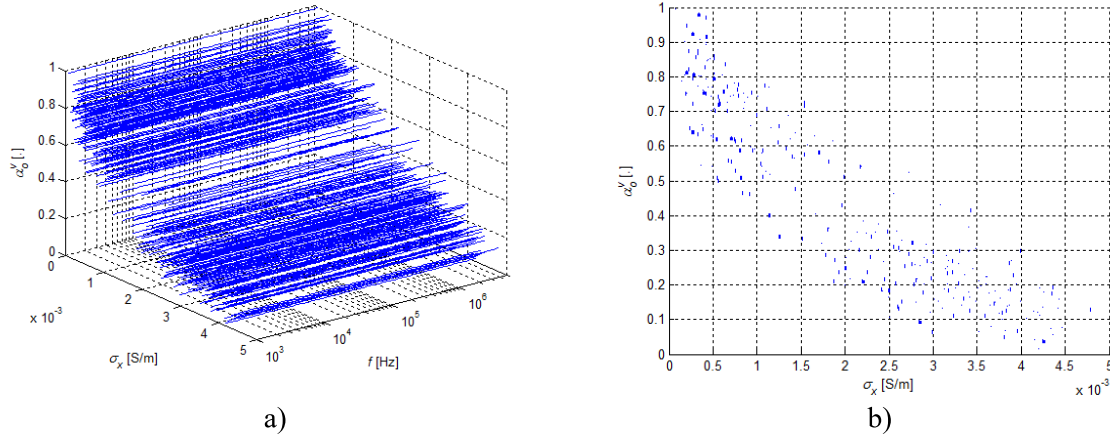


Figura 78. a) Frações de óleo α_o e Condutividade da mistura σ_x água-óleo para diferentes frequências e b) vista lateral (α_o em função de σ_x).

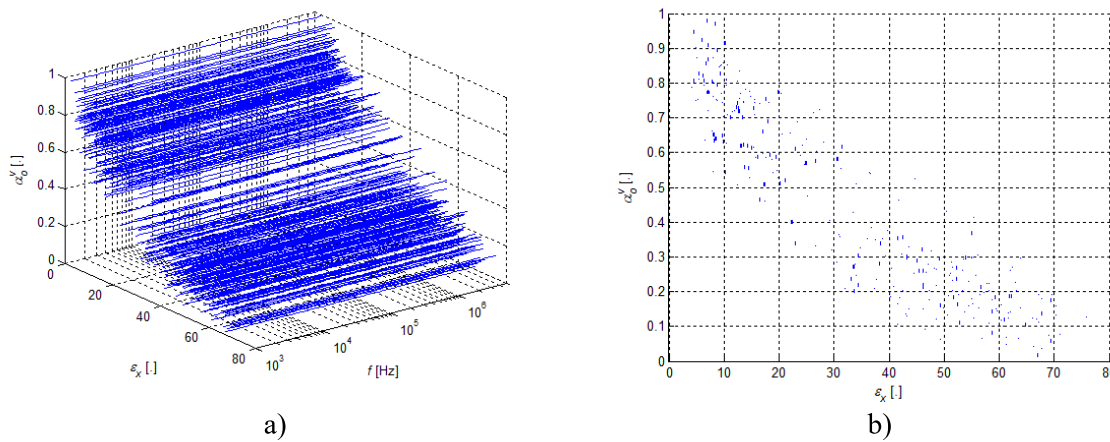


Figura 79. a) Frações de óleo α_o e Permissividade relativa da mistura ϵ_x água-óleo para diferentes frequências e b) vista lateral (α_o em função de ϵ_x).

A Figura 78b e Figura 79b mostram que a relação entre a frações e a condutividade ou a permissividade se mantem dentro dos limites de Wiener, os modelos Paralelo e Series. Só em poucos casos a relação sai deles. Ressalta nos resultados que os valores acima de frações de óleo de 0,8 tem pouca sensibilidade. A permissividade apresenta um comportamento muito similar em comparação com o da condutividade. Por exemplo, o valor da permissividade não depende da frequência. Além disso, a distribuição da permissividade em função da fração de

óleo apresenta comportamento similar, Figura 79b. Assim, a permissividade muda dependendo do arranjo geométrico das fases no ponto de cruzamento.

4.1.2. Simulação de mistura trifásica óleo-água-ar

Para fazer a simulação de misturas trifásicas (óleo-água-ar) se variou o meio contínuo entre as três fases. Os raios das bolhas das fases dispersas variaram entre 0,8 mm e 2,2 mm. O número de bolhas entre 5 e 20 para cada fase dispersa. Cada condição de mistura é simulada para 40 frequências diferentes, entre 1000 Hz e 5 MHz, espaçadas logaritmicamente. Mas, como no caso da simulação da mistura bifásica, não se encontrou relação entre a permissividade/condutividade e a frequência. Se fizeram simulações até a obtenção de ao menos 5 resultados em cada intervalo. Assim, foram realizadas 1374 simulações de misturas de óleo-água-ar. Na Figura 80 é apresentado o histograma que amostra a distribuição das frações de água e de óleo.

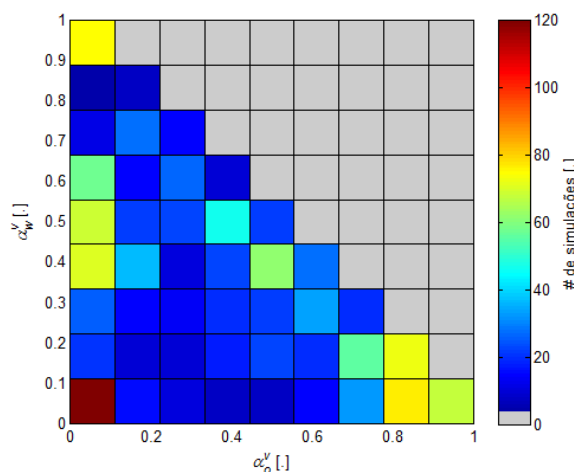


Figura 80. Histograma de frações de água e de óleo.

Na Figura 81 e Figura 82, apresentam-se os resultados de condutividade e permissividade, respectivamente, das misturas trifásicas simuladas em função das frações volumétricas de água e óleo para uma frequência de 950 kHz. Se pode notar a grande semelhança que existe entre as duas distribuições. Também, nos dois casos, parece existir uma relação não consistente. A tendência desta mistura coincide com o modelo Series para frações de água menores a 0,8 e modelo Paralelo em frações maiores.

Os resultados apresentados nesta seção mostram que a medição da permissividade complexa através de um sensor *wire-mesh* dependem principalmente do arranjo geométrico que tem as fases na região de maior sensibilidade. Devido a isso, as relações que se tem não são unívocas.

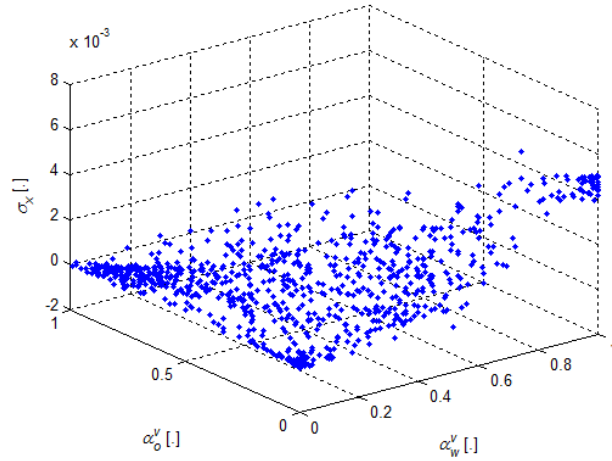


Figura 81. Condutividade das misturas trifásicas simuladas, $f=950$ kHz.

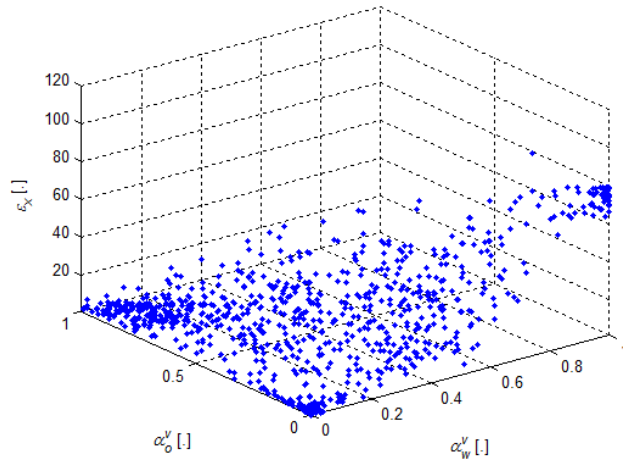


Figura 82. Permissividade das misturas trifásicas simuladas, $f=950$ kHz.

4.2 EXPERIMENTOS COM MISTURAS

Foram feitos experimentos com misturas em bancada para estudar o comportamento da técnica proposta na prática. Enquanto as simulações apresentam as relações que existem entre a permissividade complexa e as frações volumétricas, elas não conseguem prever a melhor frequência de medição. Por exemplo, as simulações não contêm informação acerca do comportamento real do circuito, como se apresentou na seção 2.3. Também, a simulação não considera outros fenômenos como os íons que estão presentes nas substâncias. Assim, as equações que ela resolve não contêm toda a informação necessária para representar o sistema de medição.

Usaram-se diferentes misturas bifásicas e trifásicas. As misturas foram colocadas em recipientes de 300 mL. Os fluidos usados nos experimentos foram água de torneira, água deionizada, óleo mineral, álcool isopropílico e hexano. As características dos fluidos usados são apresentadas na Tabela 15. Cada mistura foi preparada colocando sempre primeiro a água

no recipiente. No caso da mistura trifásica, o hexano foi colocado por último. Uma vez colocados os volumes desejados, os fluidos foram mesclados por um misturador mecânico até obter-se uma mistura homogênea. A medição do volume foi feita com uma proveta graduada com intervalo de 2 mL. Depois de obter a mistura homogênea, um sensor *wire-mesh* de 1×4 foi inserido na mistura para fazer as medições estáticas, Figura 83, sem parar o misturador. O sensor tem uma separação entre planos de 1,4mm e separação entre fios de 3 mm, o diâmetro dos fios é de 0,2 mm. De esta forma se tem um sensor com geometria similar aos usados nos experimentos em tubulações. As misturas foram preparadas com ajuda do doutorando Marlon Hernandez e o aluno de iniciação científica Sergio Gomez.

Tabela 15. Características dos fluidos usados nos experimentos de misturas.

Fluido	Condutividade [S/m]	Permissividade relativa [-]	Densidade [kg/m ³]	Viscosidade [mPa.s]
Hexano	0.04×10^{-15}	1,6	654	0.29
Água da torneira	4.12×10^{-3}	79	1000	1
Água deionizada	0.25×10^{-3}	79	1000	1
Óleo mineral	0.04×10^{-15}	2,5	860	200
Álcool Isopropílico	10×10^{-6}	19,67	790	1.96

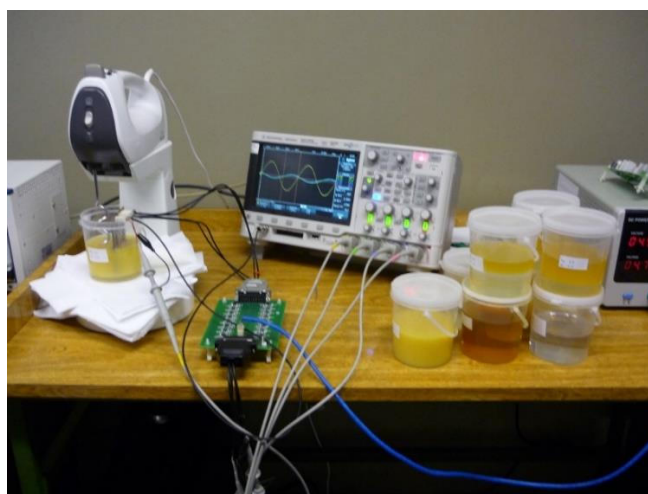


Figura 83. Mistura de água-óleo sendo medidos com uma *wire-mesh* 1×4.

O sistema usado consistiu de um osciloscópio com gerador Agilent MSOX2014 e os circuitos de medição foram baseados em amplificadores operacionais OPA656 da Texas Instruments. Na realimentação foram usados um capacitor de 20pF e uma resistência de 200kΩ. Para cada mistura do experimento, foi realizada uma varredura em frequência entre 7000 Hz e 20 MHz. Um total de 60 frequências espaçadas de forma logarítmica foram aplicadas. Para cada frequência foram feitas 128 medições no tempo. Uma média das medições de entrada e saída foi feita e estas foram processadas para obter o ganho e a diferença de fase elétrica. Como a amplitude esperada na saída nos casos de baixas condutividades e baixas frequências eram da

4.2.1. Mistura de Água de Torneira-Álcool.

A resposta da mistura água de torneira-álcool se apresenta na Figura 84. Nesta se pode ver como muda o ganho e a fase com as mudanças de fração de água e frequência. Pode-se observar na resposta de ganho (Figura 84a), como a água apresenta os dois platôs que eram esperados segundo a teoria, Figura 22. Devido ao limite inferior das frequências, o álcool só apresenta o platô de altas frequências, o que mostra que o platô de baixas está por abaixo deste limite. A resposta devida ao produto ganho-largura de banda do amplificador operacional usado ainda não é visível.

A resposta da fase é ilustrada na Figura 84b. Pode-se ver como para a água em 7 kHz a resposta começa perto dos 180° , se desloca até um mínimo perto de 300 kHz e depois começa a voltar aos 180° . Mas nas frequências mais altas volta a diminuir novamente, desta vez devido à resposta do amplificador operacional. Isto coincide com o antecipado pela teoria. No caso do álcool, a fase em 7 kHz é de $238,5^\circ$, chegando ao máximo ao redor dos 15,7 kHz e depois aos 180° . O mesmo que no caso da água, nas altas frequências a fase é dominada pela resposta do amplificador operacional e desce. Este comportamento do Álcool confirma que em 7 kHz ainda não se tem chegado ao platô de baixa frequência. E mais, como a resposta deve ser simétrica ao redor da frequência de deslocamento máximo, 15,7 kHz, se conclui que a frequência onde começa o platô de baixas frequências está mais de uma década abaixo. Isso corresponde a frequências na ordem de centos de Hz.

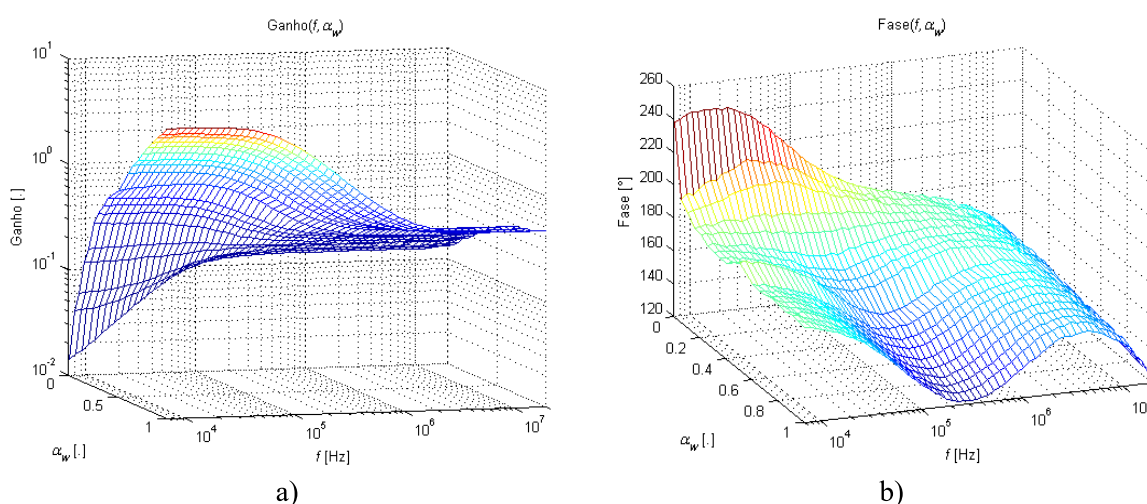


Figura 84. Resposta em frequência, a) Ganho e b) Fase para uma mistura água de torneira-álcool.

É de ressaltar que a resposta em fase consegue apresentar o limite de ganho-largura de banda do amplificador operacional, o que não é possível para o ganho, na faixa de frequências analisada Figura 84a. Também se pode ver que as superfícies dessa mistura mudam suavemente

e coincidem muito bem com os valores esperados teoricamente. Isto se deve a que se considera que os dois fluidos são altamente polares e miscíveis, o que permite obter uma emulsão estável.

A condutividade e permissividade para diferentes frações de álcool são mostradas na Figura 85 e Figura 86, respectivamente. Essas foram obtidas a partir das medições e por meio da estratégia de medição da seção 2.1.4, usando como calibração água e álcool puros. Um ajuste dos valores é feita via regressão polinomial e o valor R^2 é apresentado nas figuras. No caso da condutividade se pode ver uma relação fortemente não linear. Enquanto para a permissividade se apresenta uma relação linear. Os resultados são muito similares ao experimento realizado por Da Silva et al. (2007); mas diferentemente desse, o modelo que explica melhor o comportamento da permissividade é o paralelo e não o de Birchak, mas os dois tem um bom ajuste.

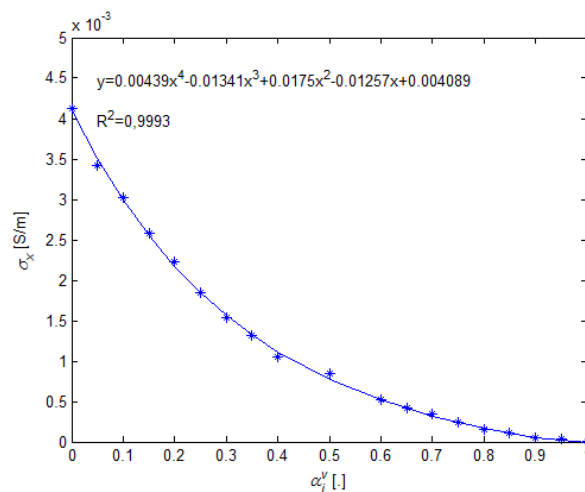


Figura 85. Condutividade da mistura água de torneira-álcool para diferentes frações de álcool, $f=204$ kHz. Medições da condutividade (*) e ajuste polinomial (linha).

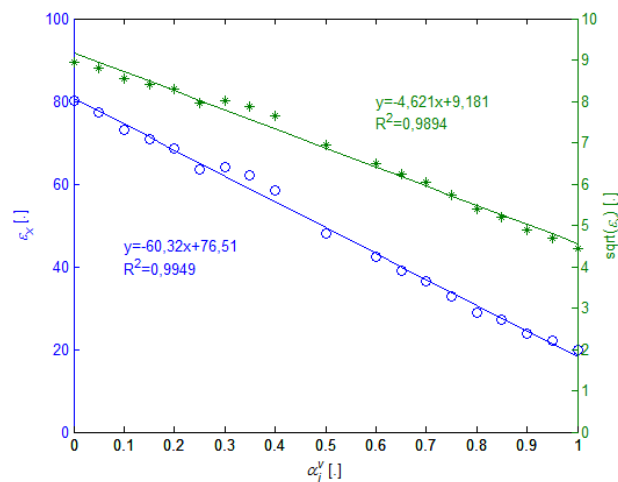


Figura 86. Permissividade da mistura água de torneira-álcool para diferentes frações de álcool, $f=204$ kHz. Medições da permissividade (o), raiz quadrada da permissividade (*) e ajuste polinomial para as duas (linha).

4.2.2. Mistura de Água deionizada-Óleo mineral.

A Figura 87 apresenta a resposta em frequência para a mistura água deionizada-óleo mineral. Nessa se pode ver como o óleo só apresenta o platô de alta frequência, sendo confirmado pela resposta de fase elétrica. Além disso, considerando que a resposta de fase para o óleo ainda não chegou a seu máximo e a simetria que deve ter esta, se pode prever que a frequência para o início do platô de baixas frequências está na ordem de dezenas de Hz ou inferior. Isto coincide com o valor esperado teoricamente. Por outro lado, a água deionizada apresenta uma resposta quase totalmente plana. Isto indica que as frequências ω_f e ω_x de corte são iguais.

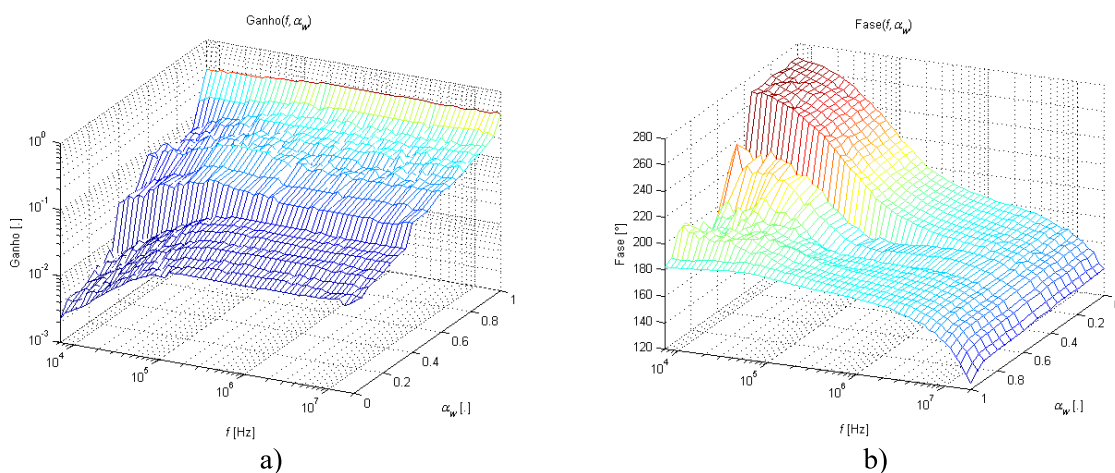


Figura 87. Resposta em frequência, a) Ganho e b) Fase para uma mistura água deionizada-óleo mineral (WD-AH).

Na Figura 87a destaca a mudança rápida dos valores do ganho para $0,35 < \alpha_w < 0,4$. Esta mudança só foi observada nessa mistura e indica uma mistura não-autoconsistente como Maxwell-Garnett. Mas nenhum dos modelos de relação estudados consegue explicar satisfatoriamente a permissividade complexa medida. Uma comparação dos resultados obtidos com alguns modelos de relação é apresentada na Figura 88. A condutividade tem uma variação forte, Figura 88a, passando de ajustar bem nos extremos ($\alpha_w \leq 0,35$ e $0,9 \leq \alpha_w$) aos modelos Maxwell w/O e Series a ter valores perto dos modelos Maxwell o/W e Paralelo na faixa central ($0,4 \leq \alpha_w \leq 0,6$) e com a faixa restante que não encaixa em nenhum dos modelos. Para a permissividade, Figura 88b, pode-se ver como o modelo de Maxwell-Garnett w/O coincide muito bem com as medições para $\alpha_w < 0,35$, como seria de esperar para esta faixa de frações, onde espera-se que o óleo seja a fase contínua. Em contraste, o modelo de Maxwell-Garnett o/W se encontra muito separado para as frações maiores, onde a água deveria ser a fase

contínua. Ainda assim, o melhor modelo a acompanhar os valores foi o modelo Maxwell-Garnett considerando só w/O.

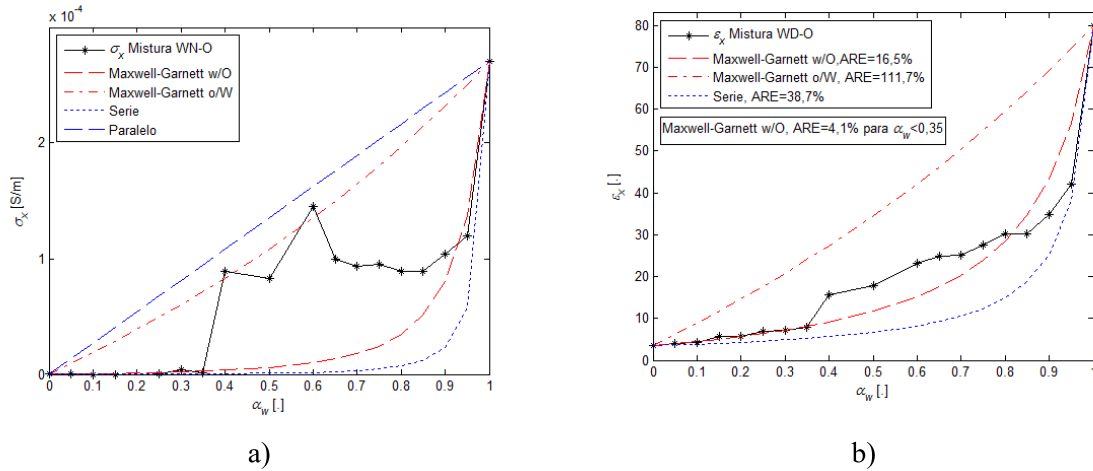


Figura 88. a) Condutividade e b) Permissividade da mistura água deionizada-óleo mineral para diferentes frações de água. A medição foi feita para $f=204$ kHz.

4.2.3. Mistura de Água de Torneira-Óleo Mineral.

Os resultados da resposta em frequência para a mistura água de torneira-óleo Mineral são apresentados na Figura 89. Comparando esta resposta com a de água deionizada-óleo mineral, Figura 88, a resposta não apresenta uma mudança rápida para qualquer fração de água em particular. Por outro lado, se observa que o comportamento das superfícies medidas já não é tão suave como nas misturas apresentadas anteriormente. Se considera que isto se deve a que os fluidos não são miscíveis. Isto é, apesar de ter-se uma mistura homogênea desde uma perspectiva macroscópica (centímetros), desde uma perspectiva microscópica o ponto de cruzamento estaria preenchido com uma fase somente, causando uma maior incerteza da medição.

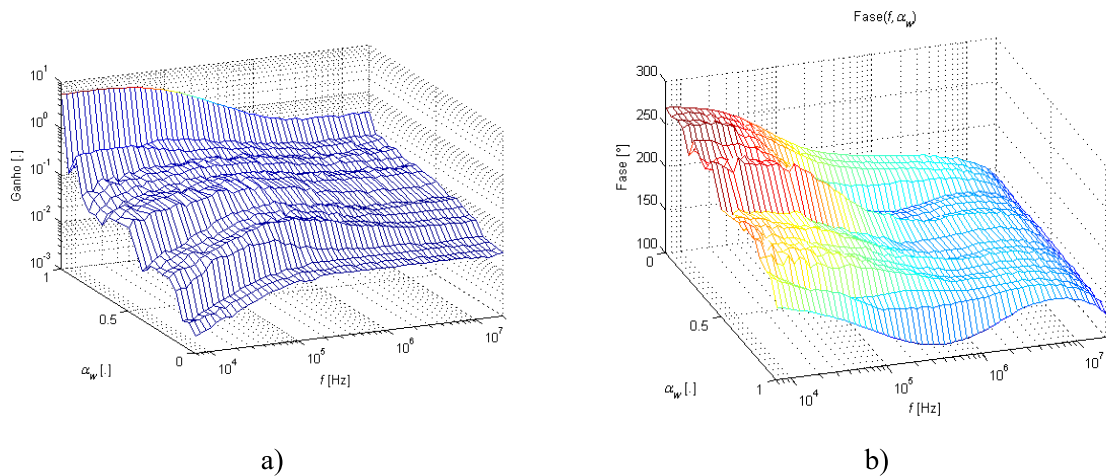


Figura 89. Resposta em frequência, a) Ganho e b) Fase para uma mistura água de torneira-óleo.

A condutividade e permissividade para diferentes frações de água são apresentadas na Figura 90. Nos dois casos, se pode ver como a relação é fortemente não linear, inclusive mais intensamente que nas duas misturas anteriores. Em particular, a condutividade está sendo dominada pelo óleo em quase toda a faixa de frações Figura 89a. Uma hipótese é que parte do óleo ficaria aderido aos fios, criando assim uma película isolante que afetaria a medição da condutividade.

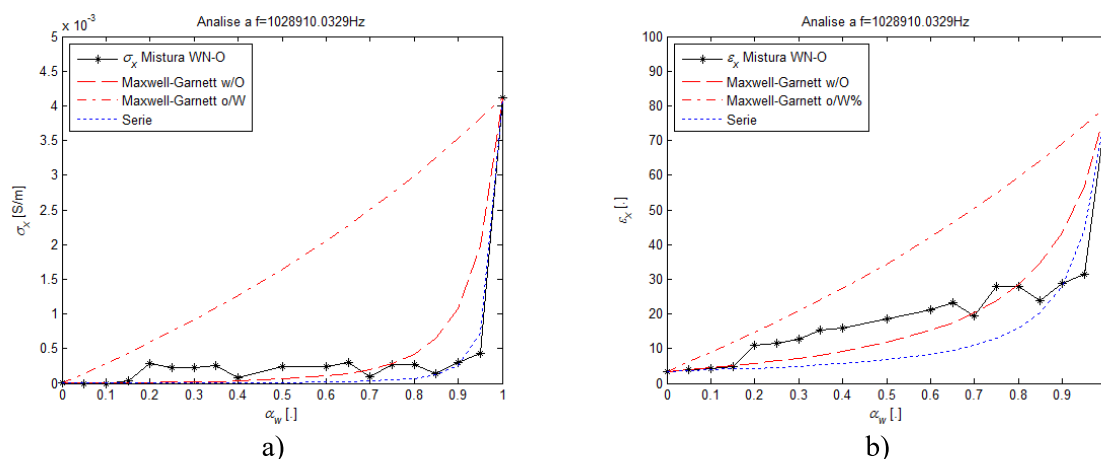


Figura 90. a) Condutividade e b) Permissividade da mistura água de torneira-óleo para diferentes frações de água, $f=1,03\text{ MHz}$.

4.2.4. Mistura de Água de Torneira-Hexano.

Na Figura 91 se apresenta a resposta em frequência para a mistura água de torneira-hexano. Na resposta do ganho, Figura 91a, se pode ver como o hexano apresenta somente o platô de alta frequência, sendo confirmado pela resposta de fase, Figura 91b, coincidindo com a teoria. Nas respostas de ganho e fase se pode ver que, diferentemente da mistura água-álcool, se apresentam mudanças bruscas dos valores, especialmente em baixas frequências, ainda maiores que no caso água de torneira-óleo mineral. Neste caso os dois fluidos também não são miscíveis, separando-se rapidamente se o misturador era desligado. Além disso, a misturas apresentavam as bolhas da fase dispersa maiores, em comparação com as outras misturas, especialmente quando o hexano era a fase dispersa. Então, se considera que a mudanças bruscas se devem realmente a que no momento das medições se tinha somente a presença de uma fase no ponto de cruzamento.

4.2.5. Mistura de Óleo-Hexano.

A resposta em frequência para a mistura óleo mineral-hexano se apresenta na Figura 92. Pode-se ver, Figura 92a, que o ganho no caso do óleo é ligeiramente superior do que o do hexano para frequências maiores de 1 MHz . Nessa frequência, o ganho depende idealmente só da permissividade relativa; então a relação dos ganhos deve corresponder a relação das

permissividades. A relação de ganhos é de $A_o / A_h = 0,3 / 0,22 = 1,36$, enquanto a relação de permissividades é $\varepsilon_{ro} / \varepsilon_{rh} = 3 / 1,6 = 1,875$. Isto revela que existe a necessidade de fazer uma calibração dos dados. A resposta de fase, Figura 92b, não apresenta nenhuma diferença significativa.

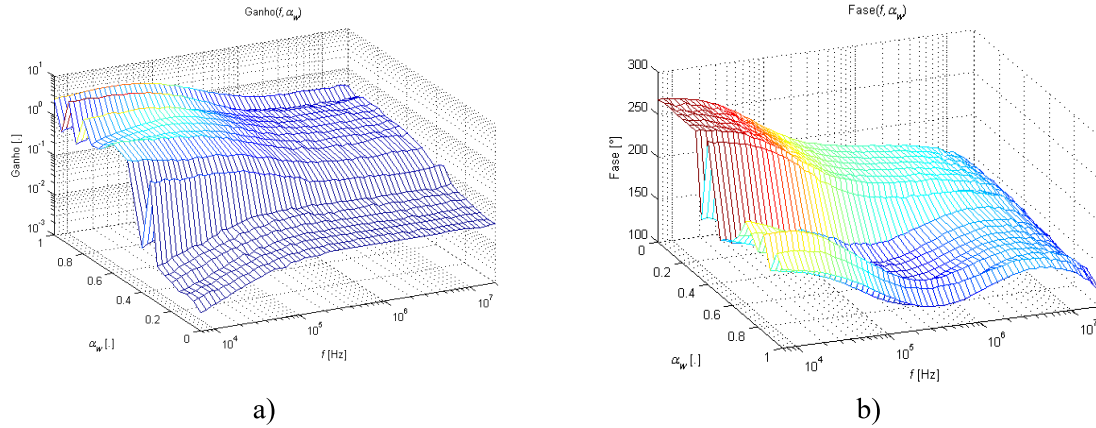


Figura 91. Resposta em frequência, a) Ganho e b) Fase para uma mistura água de torneira-hexano.

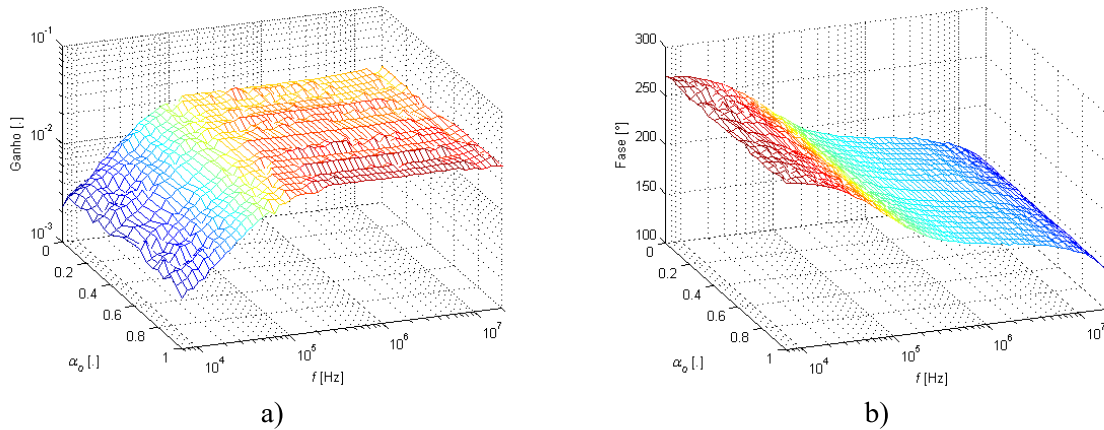


Figura 92. Resposta em frequência, a) Ganho e b) Fase para uma mistura óleo-hexano.

4.2.6. Mistura de Água de Torneira-Óleo Mineral-Hexano.

a. Medições de ganho e fase

Os resultados das medições de ganho e fase para uma mistura de água-óleo-hexano são apresentados na Figura 93. Vê-se o comportamento frente a varredura em frequência para diferentes frações de água e óleo. Para o ganho, Figura 93 a) c) e) e g), se pode observar que para baixa frequência os valores são maiores que para altas. Isto se deve a que o ganho em baixa frequência está intimamente relacionado com a condutividade e, para o caso dos fluidos usados, está dominada pela condutividade da água, o único fluido condutor. A Figura 93a apresenta um pico para frações de água altas e é uma superfície plana nos outros casos, confirmando o comportamento esperado teoricamente. Mas como se tinha comentado na análise teórica, uma superfície com essas características não é desejável para as medições, pois na região plana não

haverá suficiente contraste para permitir distinguir entre as diferentes frações. As superfícies começam a ter as características desejadas ao elevarem-se as frequências, melhorando quanto maior sejam.

Quanto à fase elétrica, Figura 93 b) d) f) e h), se pode observar um comportamento similar ao já relatado para o ganho, mas há um maior nível de mudanças bruscas. Além disso, nas frequências de 7 kHz e 204 kHz a resposta é plana para valores altos de frações de óleo e hexano. Esse comportamento melhora ligeiramente para as frequências de 1,03 MHz e 5,19 MHz. Mas também a diferença máxima da fase vai se reduzindo ao aumentar a frequências.

b. Medições das partes real e imaginária

Quanto às superfícies das partes real e imaginaria, os resultados são apresentados na Figura 94. É visível que a parte real apresenta valores negativos para qualquer frequência, em concordância com a teoria. Enquanto que a parte imaginaria apresenta valores positivos, exceto para a frequência de 7 kHz. Isto aconteceu para $\alpha_o = 0$, isto é, para a mistura água-hexano que apresenta maiores incertezas de medição por ser uma mistura imiscível. Também se pode ver como as superfícies apresentam regiões planas para frações baixas de água, que são maiores em baixas frequências. Este comportamento melhora em altas frequências, mas como era esperado a diferença entre os valores máximos e mínimos se reduz.

c. Medições de condutividade e permissividade relativa

Os valores de permissividade relativa e condutividade, calculados a partir das medições, podem ser vistos na Figura 95. Para a frequência de 7 kHz os valores de condutividade apresentam valores perto de zero, exceto para frações de água altas. Também apresenta mudanças bruscas novamente para $\alpha_o = 0$, inclusive, para $\alpha_w = 0,9$ o valor é maior que o valor máximo. Apesar de que alguns modelos, como Series, predizem esse comportamento, considera-se que esse ponto, em particular, pode ter sido um erro na medição, pois deveria acontecer para $\alpha_w > 0,99$. Os valores de permissividade, em geral, se mantêm dentro dos limites, mas para frações de água altas os valores estão por fora dos limites em várias ordens de grandeza. Para a frequência de 204 kHz não se tem valores por fora dos limites, mas os valores de permissividade apresentam mudanças bruscas de valor para quase toda a faixa de frações. Já na frequência de 1,03 MHz, os valores de condutividade e permissividade apresentam um comportamento correto, conforme previsto pela teoria. Para a frequência de 5,19 MHz os valores têm um comportamento correto, mas a superfície de condutividade aprecia-se mais

plana, com um pico próximo de $\alpha_w = 1$. Inclusive, o cálculo deste valor falha para frequências maiores do que 8 MHz, onde apresenta valores negativos para todos os pontos, exceto os de calibração, Figura 96.

Assim, verifica-se que a determinação dos valores de calibração e a frequência de excitação do circuito têm grande relevância na medição correta dos valores de permissividade. Enquanto para frequências baixas se mede melhor a condutividade, em frequências altas se mede melhor a permissividade; o que era esperado já que justamente estão nos platôs onde são mais sensíveis. Podemos concluir que a frequência de excitação não pode ser muito baixa ou muito alta, pois a medição da permissividade ou condutividade poderia ser comprometida. Dos valores apresentados, a frequência de 1 MHz apresenta o melhor comportamento. Isto coincide com a teoria.

Os resultados desta seção mostram que as misturas de relevância para esta tese têm um comportamento que se ajusta ao modelo Series, da mesma forma do que foi encontrado nas simulações. Uma hipótese para explicar esse comportamento é que devido à alta viscosidade do óleo, os fios ficam impregnados dele. Portanto, os valores baixos de permissividade e condutividade poderiam estar relacionados a esse fato. Sendo o modelo Series a relação que melhor representa os experimentos, se apresenta uma maior dificuldade da medição. Esse modelo tem regiões onde a resolução é ruim. Apesar disso, defende-se que a técnica *wire-mesh* é capaz de realizar as medições pretendidas. As medições podem ser realizadas se a técnica de medição é desenhada para ter a melhor resolução possível e os circuitos têm a suficiente sensibilidade.

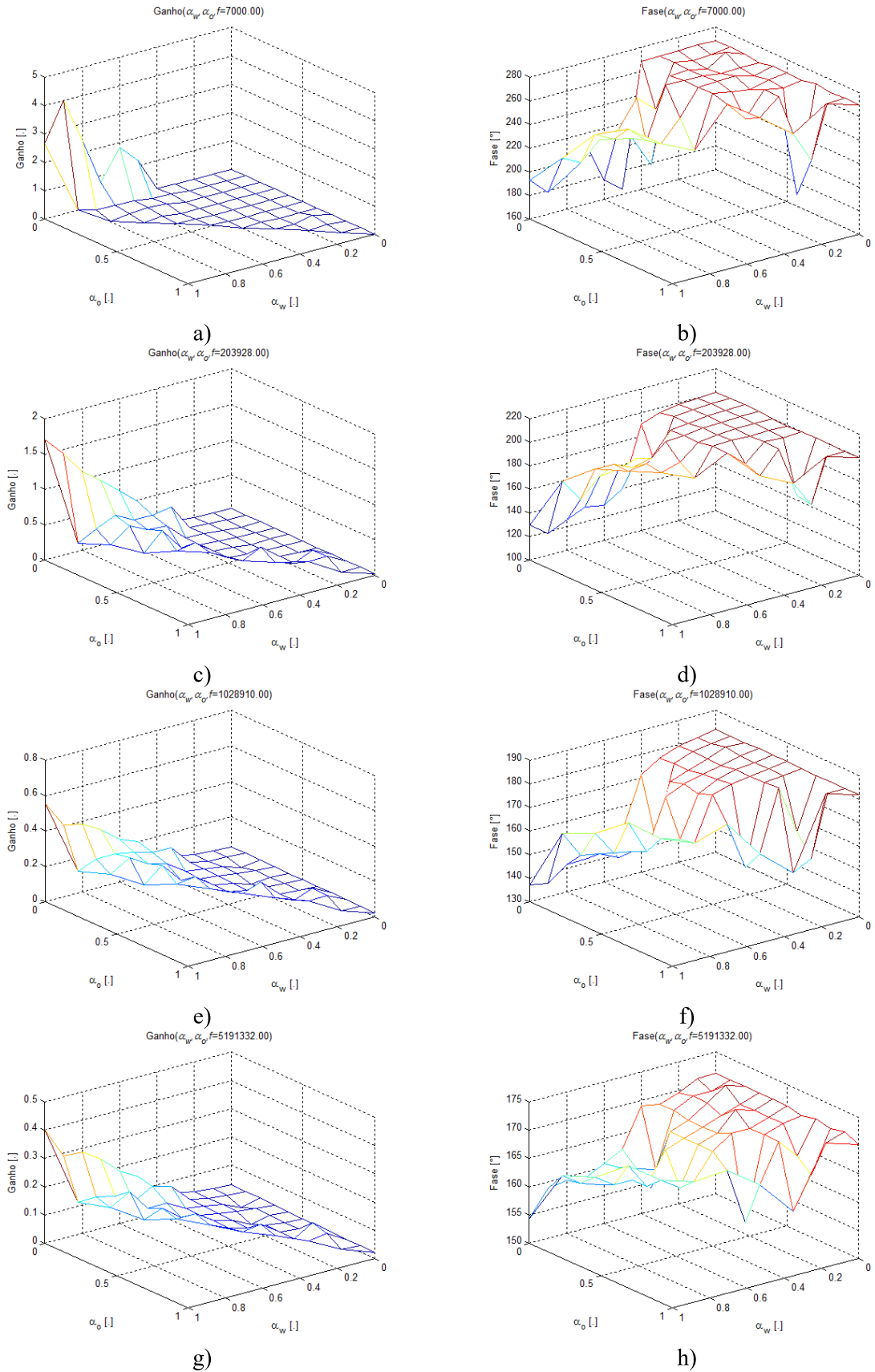


Figura 93. Ganho (a, c, e e g) e Fase (b, d, f e h) para uma mistura água-óleo-hexano em diferentes frequências, $f=7$ kHz (a e b); 204 kHz (c e d); 1,03 MHz (e e f); 5,2 MHz (g e h).

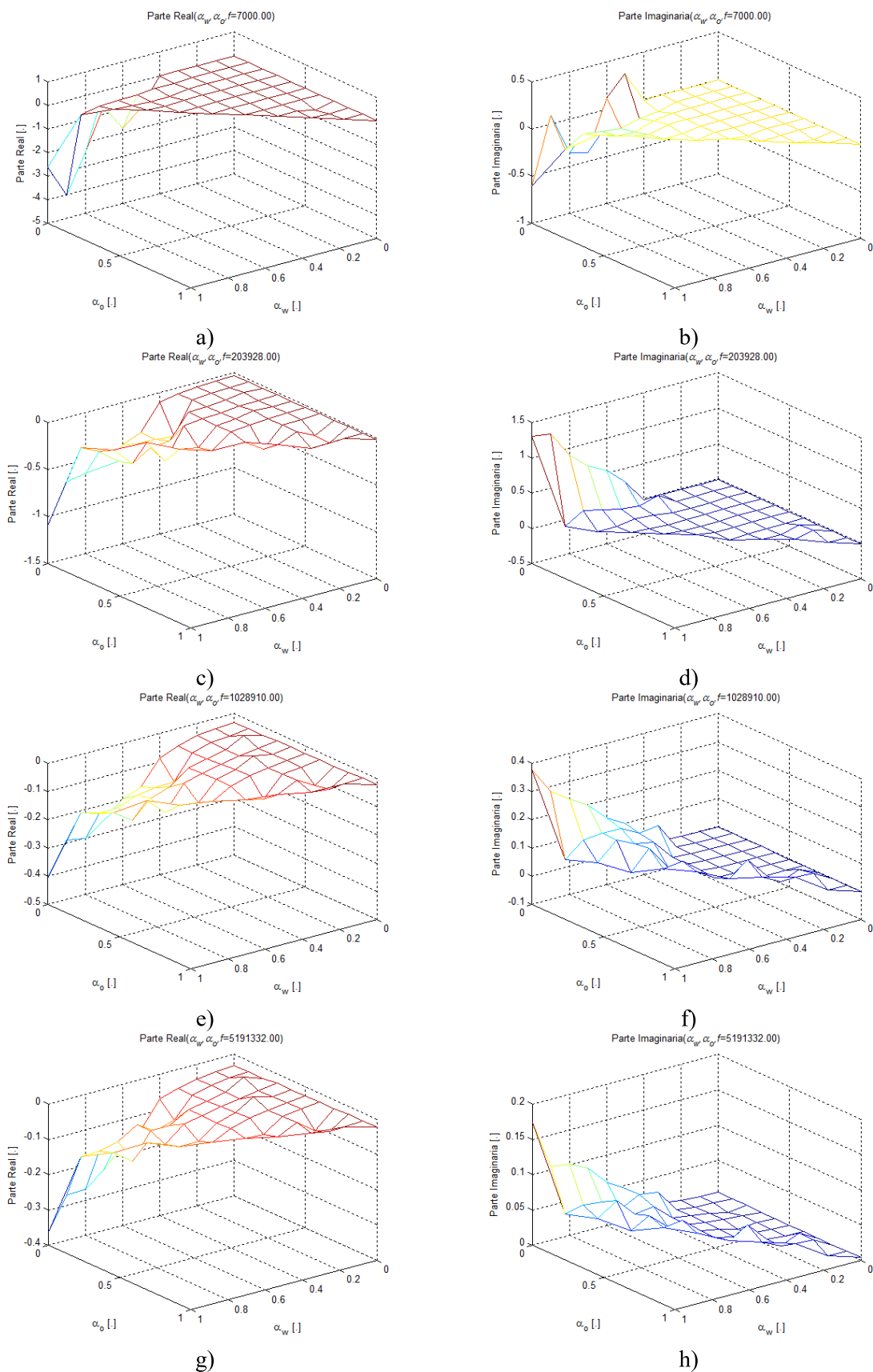


Figura 94. Parte Real (a, c, e e g) e Imaginária (b, d, f e h) para uma mistura água-óleo-hexano em diferentes frequências, $f=7$ kHz (a e b); 204 kHz (c e d); 1,03 MHz (e e f); 5,2 MHz (g e h).

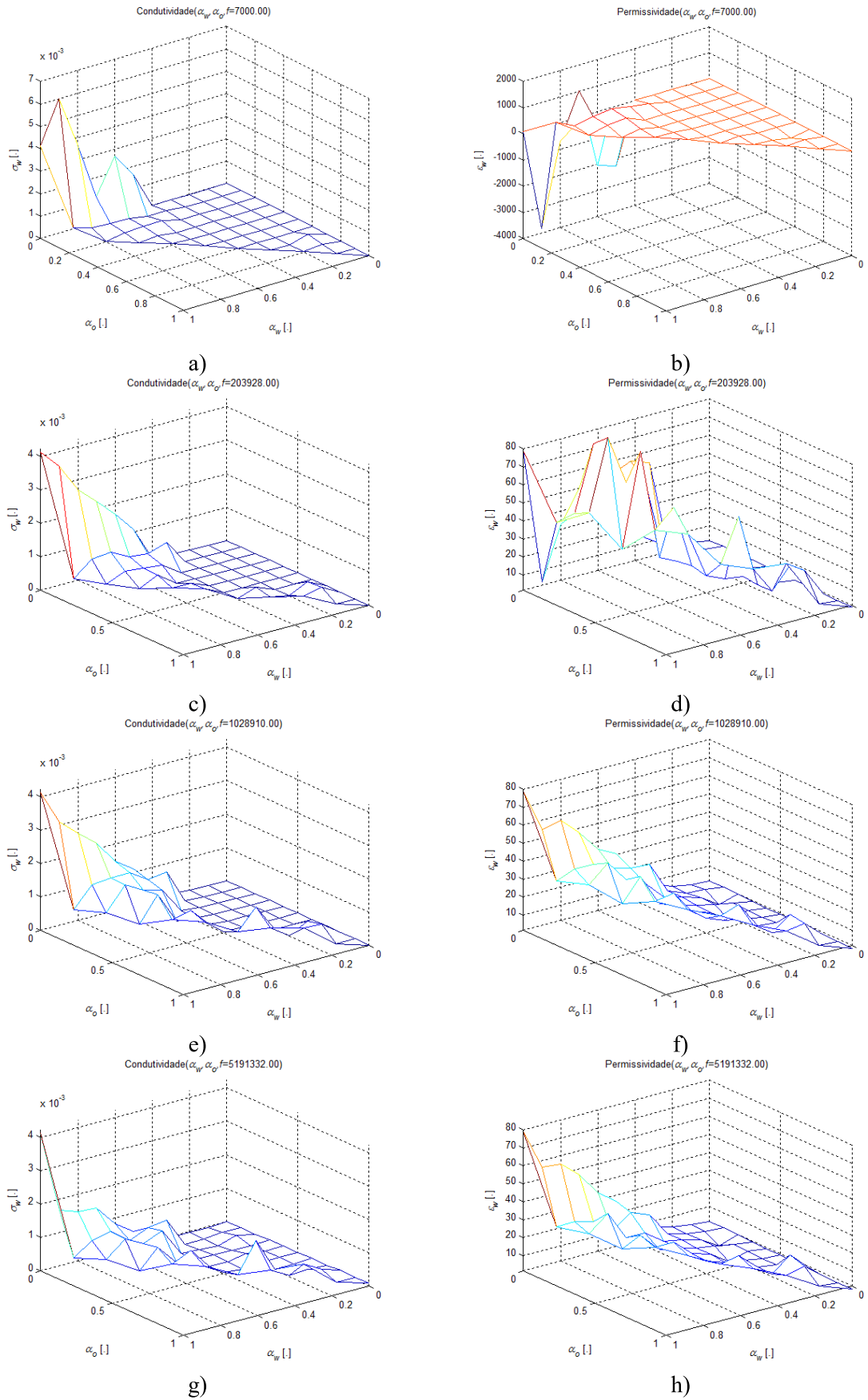


Figura 95. Permissividade (a, c, e e g) e Condutividade (b, d, f e h) para uma mistura água-óleo-hexano em diferentes frequências, $f=7$ kHz (a e b); 204 kHz (c e d); 1,03 MHz (e e f); 5,2 MHz (g e h).

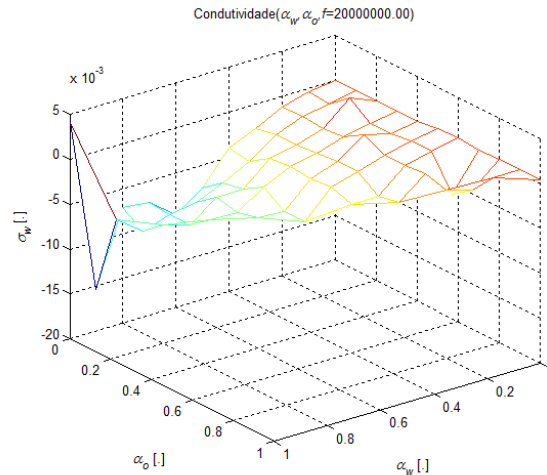


Figura 96. Condutividade para uma mistura água-óleo-hexano para uma frequência de 20 MHz. Se aprecia o erro no cálculo ao obter valores negativos.

4.3 EXPERIMENTOS EM ESCOAMENTOS BIFASICOS

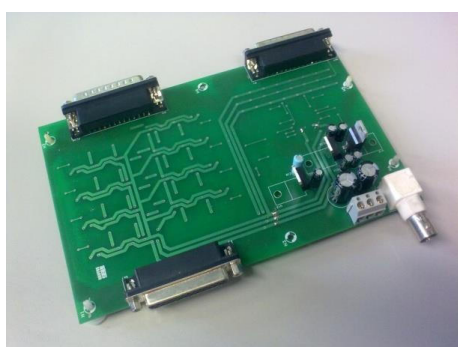
Como parte da metodologia de trabalho e buscando a compreensão da tecnologia *wire-mesh*, foi desenhado e implementado um sistema baseado na técnica capacitiva. Nesta seção são apresentados os sistemas de aquisição desenvolvidos e os experimentos realizados.

4.3.1. Sistema de Aquisição Bifásico

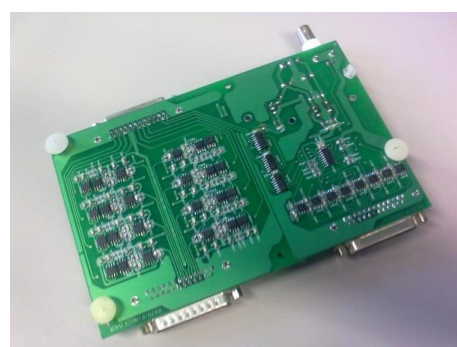
O sistema está baseado na técnica capacitiva, seguindo os lineamentos do trabalho de Da Silva (2008). Essa técnica foi escolhida pela sua capacidade de diferenciar líquidos não condutores como ar e óleo, de uso normal no NETeF. O sistema está dividido em duas partes. A primeira é uma placa de circuito impresso para a implementação dos circuitos de Tx e Rx dos sinais para um sensor *wire-mesh* de 8×8 fios. A segunda consiste nos equipamentos para a sincronia e digitalização dos sinais. Devido aos pequenos valores de capacitância que se querem medir a placa conta com um desenho de dupla-face e componentes de montagem superficial SMD, Figura 97. Desta maneira, busca-se minimizar a interferencia entre canais e os efeitos das capacitancia parasitas no circuito. Para sincronização e aquisição dos sinais foi selecionado um PC industrial da National Instruments com chassis PXI-1042, presente no NETeF. Este tem uma placa de aquisição PXI-6025E, um gerador PXI-5411 e uma placa aquisição de vídeo PXI-1408 que se ajustam bem as condições deste projeto. Foram usadas as funções avançadas destas placas para a sincronização dos sinais.

A programação do sistema, controle e processamento, foi implementado no LabVIEW 8.6. O software tem uma interface principal, apresentando três opções: Gerador, Calibração e Medição. Na opção “Gerador” o usuário pode ajustar a frequência e amplitude do sinal. Em

“Calibração” se obtêm as matrizes de referência da calibração V_L e V_H , seção 2.2, através de um processo guiado ao usuário. Em “Medição” o usuário pode tomar as amostras da tomografia axial e salvá-las num arquivo em formato TDMS (*Technical Data Management Streaming*), para seu pós-processamento. Ver da Figura 98 à Figura 100. Para a implementação, todos os equipamentos foram instalados numa plataforma próxima ao sensor e à seção de visualização, de modo a permitir a realização de experimentos com a linha inclinada e o esgotamento dos fluidos para a medição de frações volumétricas por QCV, segundo foi apresentado na Figura 64, seção 3.2.1.



a)



b)

Figura 97. Placa de multiplexação e amplificadores para um sensor WMS capacitivo de 8×8 fios.

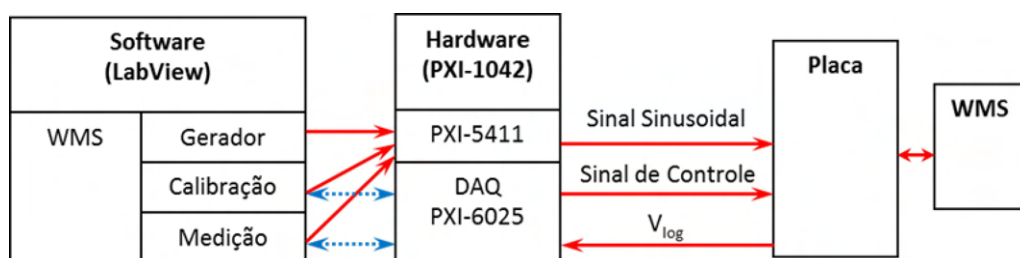
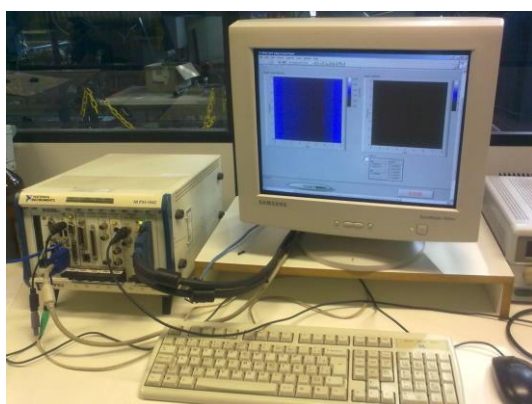


Figura 98. Esquema do sistema WMT capacitiva para um sensor WMS de 8×8 fios baseado nas placas PXI-5411 e PXI-6025.



a)



b)

Figura 99. Fotos do sistema WMT capacitiva para um sensor WMS de 8×8 fios, com diâmetro de 26mm.

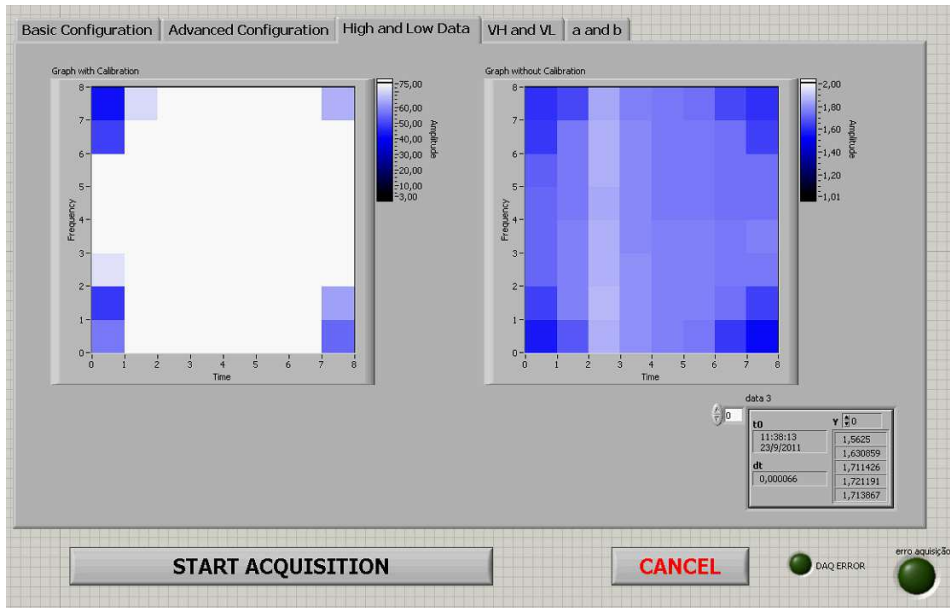


Figura 100. Imagem da interface implementada em Labview. À direita, a imagem sem “calibração”, os dados de tensão elétrica obtidos da placa; à esquerda, a imagem “calibrada”, depois de fazer o ajuste entre os valores de referência V_H e V_L .

O sinal típico usado nos experimentos bifásicos tem uma frequência de 5MHz o que garante que se trabalha no platô de altas frequências e o sistema seja capacitivo. A amplitude do sinal é ajustada durante a calibração do fluido de maior permissividade até verificar que o amplificador logarítmico trabalhe na região de menor erro. É nesta região que se mede a incerteza do sistema. Para estimar a incerteza se juntaram 1000 amostras com água, em quatro pontos de cruzamento, obtendo a distribuição dos desvios padrões, Figura 101. Para o experimento a variável $b = 2,05$, equação (2.130), e, sabendo da figura que o desvio padrão máximo é de 48mV, se obtém a incerteza segundo Da Silva, Marco Jose et al. (2007b) e Figliola; Beasley (2007) como

$$\frac{U(\varepsilon)}{\varepsilon} = \frac{U(V_{\log})}{b}. \quad (4.8)$$

Assim, a incerteza do equipamento é de 2,3%, com uma confiabilidade de 95%. Esta medição foi feita pelo aluno de iniciação científica Lucas Basso Pátaro.

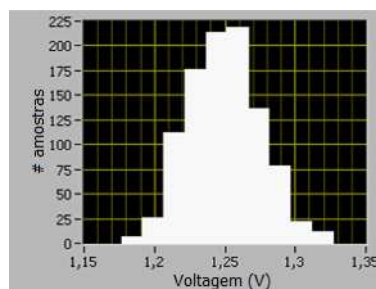


Figura 101. Distribuição dos desvios padrões para 1000 amostras.

Com todos estes elementos, se conseguiu obter um sistema WMT capacitivo com as características apresentadas na Tabela 18. O sensor foi instalado com ajuda do técnico José Bogni, incluindo a eletrônica. Esta última foi projetada, fabricada e instalada com ajuda dos técnicos Jorge dos Santos e Roberto Pratavieira.

Tabela 18. Características do sistema WMT capacitivo implementado no NETeF

Característica	Valor	Observação
Sensor compatível	8×8 fios	16×16 com poucas modificações ao HW e SW
Imagens por segundo (Recomendado)	1816 quadros/s	Garantindo tempos iguais entre amostras
Imagens por segundo (Máximo)	1905 quadros/s	Sem tempos iguais entre amostras
Incerteza	$\pm 2,3\%$	Com 95% de confiança

4.3.2. Validação qualitativa num escoamento estratificado ondulado

Neste experimento se quer validar o uso do sistema WMT para adquirir imagens virtuais. Neste caso, se observam as ondulações na interface água-óleo no tempo e variação da forma da interface na seção transversal.

A aquisição de dados foi realizada da seguinte maneira: para três inclinações diferentes da tubulação, era realizada a devida calibração do sensor escoando só água e, depois, só óleo, como foi descrito no experimento 1. Depois, as vazões de óleo e água eram estabelecidas. Uma vez estabelecido o padrão de escoamento, a aquisição com o sensor a uma taxa de aquisição de 500 frames por segundo era realizada. Com os dados obtidos, se aplica um modelo de permissividade para obter a distribuição da fração das fases na seção transversal e sua posterior visualização. Para realizar uma comparação qualitativa da interface ao longo do tubo se propõe uma técnica visual como se descreve a seguir.

A Figura 102 apresenta a mesma imagem instantânea de permissividade e fração de óleo, tratada com diferentes mapas de cor em sua amplitude. Ressalta-se que a interfase entre água e óleo é mais fácil de avistar nos gráficos de permissividade.

4.3.3. Validação quantitativa em escoamento bifásico óleo-água num tubo de 1"

Nesta seção serão apresentadas as etapas do trabalho experimental referentes à coleta de dados de queda de pressão e *holdup*, através do sensor *wire-mesh* e QCV. O experimento teve como objetivo testar o funcionamento da técnica WMT capacitiva e determinar suas vantagens e limitações num escoamento óleo-água. Com os dados de fração volumétrica se pôde verificar a funcionalidade da eletrônica e o modelo de permissividade associado à obtenção dessa variável. As medições de *holdup* foram feitas ao mesmo tempo das medidas da queda de

pressão. Foi medida a queda de pressão para 78 pontos experimentais e *holdup* para 45 pontos por *wire-mesh*.

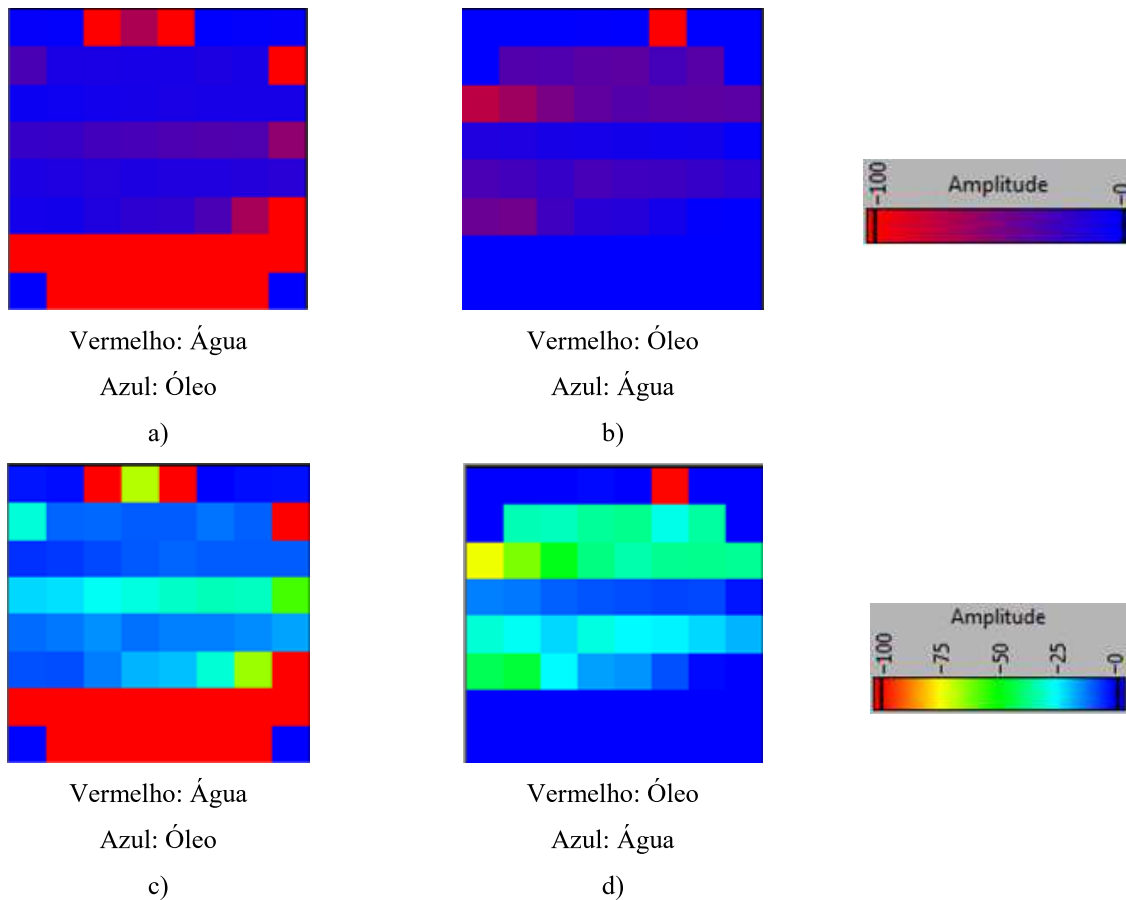


Figura 102. Resultados de visualização da permissividade e a fração de óleo, para um escoamento estratificado com modelo Serie, usando diferentes mapas de cor. Se pode observar na linha 8, coluna 6 uma falha no procedimento de calibração. a) e c) permissividade, b) e d) fração de óleo.

A coleta ocorreu da seguinte maneira: antes da medição, era realizada a devida calibração do sensor através do escoamento monofásico de água. Depois, as vazões de óleo e água eram estabelecidas, após um breve transiente, que compreendia a estabilização do padrão de escoamento estratificado ou disperso. A aquisição foi feita a uma taxa de aquisição de 500 quadros/segundo. Logo após as medições, era realizada a calibração do sensor escoando somente óleo. Com os dados obtidos, aplicou-se um modelo de permissividade para obter a fração das fases em cada ponto. Uma média na seção transversal é obtida e integrada no tempo para determinar a fração volumétrica, segundo a seção 2.2.3. A medição das frações volumétricas foi realizada junto com a aluna de doutorado Iara Hernandez Rodriguez.

Os fluidos usados neste estudo têm uma permissividade relativa de 3,5 e 78,3 para o óleo e a água, respectivamente, a 5 MHz. Os valores de referência foram medidos com um analisador de impedância Solartron 1260 com uma interface dielétrica Solartron 1296. As

medições foram realizadas pela aluna de doutorado Maria Rejane, do Centro de Pesquisas em Óptica y Fotônica, no Instituto de Física de São Carlos (IFSC).

Na Figura 103 podem-se observar as diferenças entre a visualização da permissividade elétrica e a fração de óleo, esta obtida para diferentes modelos de relação de permissividade, para um escoamento disperso óleo-água. Os modelos Série e Maxwell têm como resultado uma imagem semelhante, com uma baixa fração de óleo em geral, mas o modelo Paralelo apresenta uma fração de óleo muito maior. No entanto, deve-se notar que trata-se apenas de uma avaliação qualitativa.

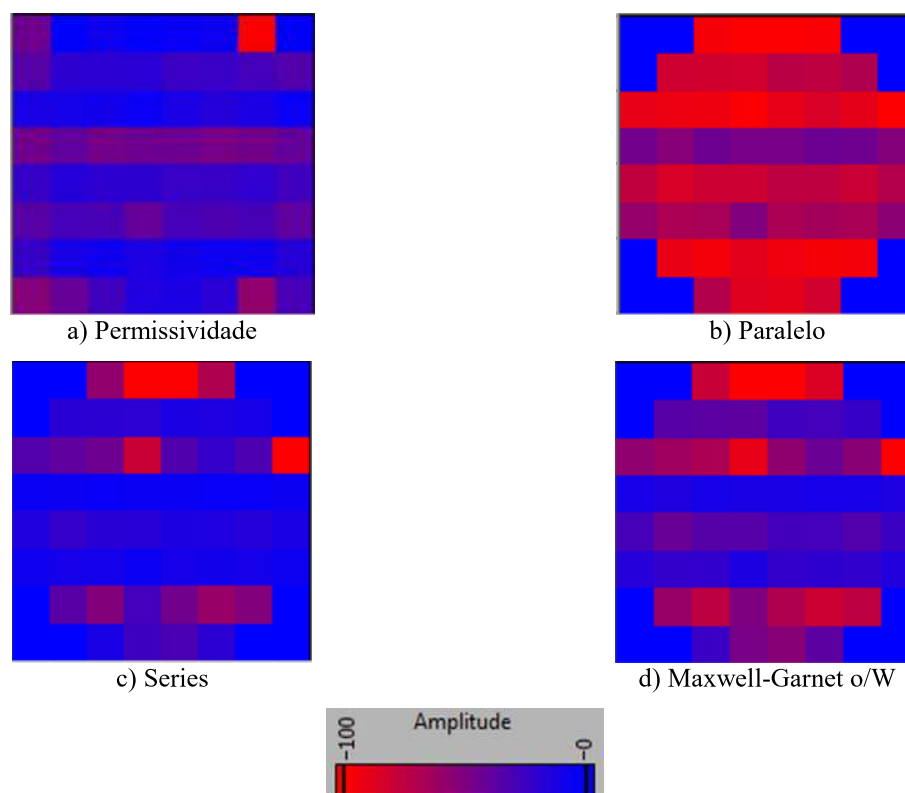


Figura 103. Resultados de visualização para um escoamento disperso de óleo em água. a) Permissividade e b), c) e d) Fração de óleo; com modelo b) Paralelo; c) Series; d) Maxwell-Garnett o/W. Pode-se observar a grande diferença entre os modelos usados.

Uma avaliação quantitativa da fração de óleo foi feita para escoamento disperso óleo-água com frações de óleo entre 18,8% e 53,1%, Figura 104. Pode-se observar que os modelos que ficam perto da linha ideal são o Serie e o Maxwell. O primeiro coincide melhor perto de 18%, enquanto que segundo tem melhor desempenho perto de 53%. O modelo Paralelo é o que tem o pior desempenho. Desta forma, se faz evidente que um primeiro passo, no processamento dos dados, é obter um modelo de relação entre permissividade e fração adequado, a partir da geometria do sensor e em função dos padrões de escoamento.

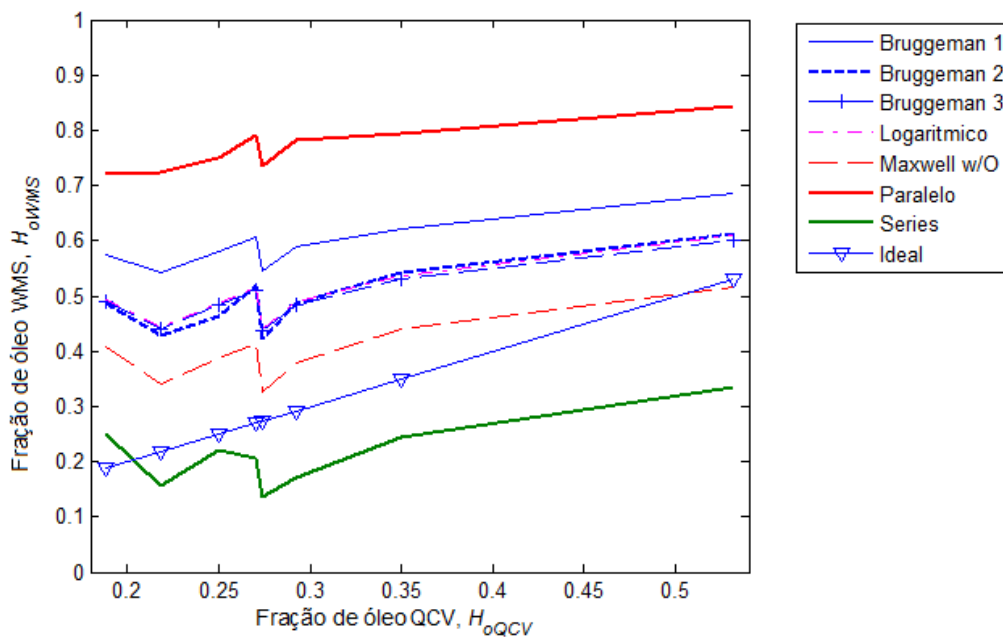


Figura 104. Fração de óleo experimental WMS vs. QCV para diferentes modelos, Ver Tabela 6.

4.3.4. Estudo quantitativo em escoamento bifásico óleo-água num tubo de 3"

Um escoamento bifásico óleo-água foi estudado em um tubo de aço na horizontal, com 15 m de comprimento e 8,28 centímetros de diâmetro interno, utilizando óleo mineral (com densidade de 830 kg/m³ e viscosidade de 7,5 mPa·s) e solução salina (1073 kg/m³ de densidade e 0,8 mPa·s de viscosidade). Medições de *holdup* e da distribuição da fração de fase na secção transversal foram obtidos, para escoamento estratificado e escoamento altamente disperso água-óleo, aplicando o circuito do sensor *wire-mesh* capacitivo especialmente modificado para este experimento. A aplicabilidade dessa técnica de medição, a qual utiliza um circuito de medição capacitivo, que está adaptado para medições condutivas, onde um dos fluidos é a água com alta salinidade (imitando a água do mar), foi avaliada. Os valores da fração de fase foram obtidos a partir dos dados obtidos pelo sensor *wire-mesh*, usando vários modelos de mistura de permissividade. Dois densímetros de raios-γ permitiram a medição precisa do *holdup*, que foi usado para validar os dados adquiridos com o sensor *wire-mesh*. A distribuição média no tempo da medição da fração de fase sobre a área da secção transversal foi utilizada para investigar os pormenores dos padrões de escoamento bifásicos observados, incluindo a forma da interface e a altura da água. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Ensaios de Escoamentos Multifásicos (DONAU) da *Shell Global International BV*, na Holanda, durante um estágio da doutoranda Iara Hernandez Rodriguez. Uma foto da seção de teste é mostrada na Figura 105. O sensor e a eletrônica foram desenvolvidos com ajuda dos técnicos Roberto Pratavieira, Hélio Trebbi e Dair da Silva (Departamento de Engenharia Elétrica). A comparação do *holdup* foi feita através de modelos teóricos já validados para este padrão de escoamento.



Figura 105: Seção de teste circuito multifásico DONAU da Shell Holanda.

Devido à necessidade de ajustar o sensor e o circuito à nova dimensão da tubulação, foi desenvolvido um novo equipamento para um sensor de 16×16 fios. A Figura 106 mostra o sensor que foi montado no NETeF para a aplicação na seção de teste do circuito multifásico DONAU. Enquanto na Figura 107 pode ser observado o circuito de multiplexação e os amplificadores construídos, respectivamente.

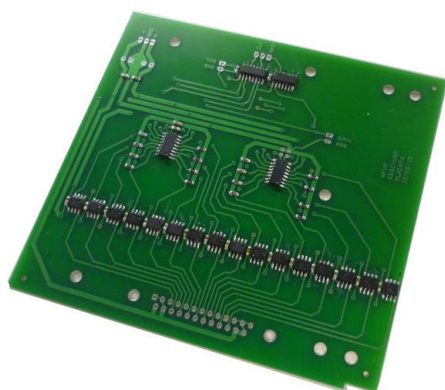


a)

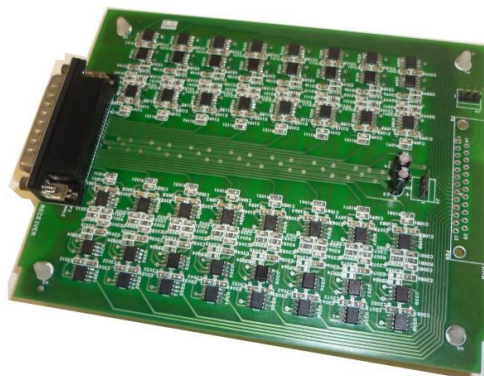


b)

Figura 106. a) Sensor *homemade* de 16×16 fios e b) sua instalação na linha de aço na seção de teste do circuito multifásico DONAU na Holanda.



b)



c)

Figura 107. a) Placa circuito multiplexador e b) Placa de amplificadores para um sensor WMS capacitivo de 16×16 fios, projetadas e construídas no NETeF.

Devido ao uso de água muito salgada nos experimentos, a eletrônica e os processos de calibração foram adaptados à essa condição. O circuito usado foi o desenvolvido para as medições capacitivas e o sinal de excitação foi de 5 MHz, mas o sistema realmente mede a parte condutiva dos fluidos, por causa do elevado nível de condutividade da água empregada. Quanto ao circuito, se colocou um capacitor de *by-pass* C_b que isola o ruído de baixa frequência, que produzem os íons na água salgada. A modificação pode ser vista na Figura 108. Pela mesma causa, as equações de calibração foram adaptadas, pois a tensão de saída V_o do circuito é proporcional à magnitude da permissividade complexa ϵ , Eq. (2.130) e não somente à parte real desta ϵ . Assim, as equações de ajuste do circuito passam a ser

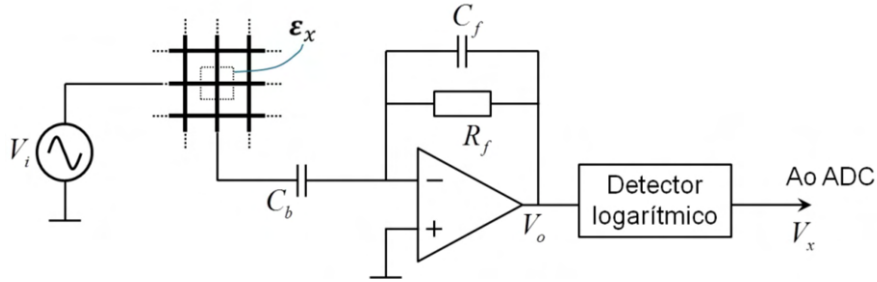


Figura 108. Circuito de medição empregado para medição de água salgada.

$$b(i, j) = \frac{2(V_H(i, j) - V_L(i, j))}{\ln(\omega^2 \epsilon_0^2 \epsilon_H^2 + \sigma_H^2) - \ln(\omega^2 \epsilon_0^2 \epsilon_L^2 + \sigma_L^2)}, \quad (4.9)$$

$$c(i, j) = \frac{V_L(i, j) \ln\left(\epsilon_H^2 + \frac{\sigma_H^2}{\omega^2 \kappa_0^2}\right) - V_H(i, j) \ln\left(\epsilon_L^2 + \frac{\sigma_L^2}{\omega^2 \kappa_0^2}\right)}{\ln(\omega^2 \epsilon_0^2 \epsilon_H^2 + \sigma_H^2) - \ln(\omega^2 \epsilon_0^2 \epsilon_L^2 + \sigma_L^2)}. \quad (4.10)$$

as quais, aparentemente mais complexas, tem a mesma forma das equações de calibração originais, vide a seção 2.2. Assim, o circuito entrega uma medição da magnitude da permissividade relativa complexa

$$|\epsilon_x(i, j, k)| = \exp\left(\frac{V_x(i, j, k) - b(i, j)}{a(i, j)}\right). \quad (4.11)$$

Os modelos de relação de permissividade foram modificados para incluir a permissividade complexa. Foram testados todos os modelos discutidos até agora. A Figura 109 apresenta a relação entre a fração local de óleo e a permissividade relativa complexa conforme os diferentes modelos de permissividade. Pode-se ver como a presença de água salgada modifica o comportamento dos modelos de relação, em comparação a fluidos não condutivos, Figura 28. O modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais obtidos pelos densímetros

de raios- γ foi o modelo paralelo. Isto coincide com os trabalhos de *wire-mesh* condutiva, onde este é o modelo empregado.

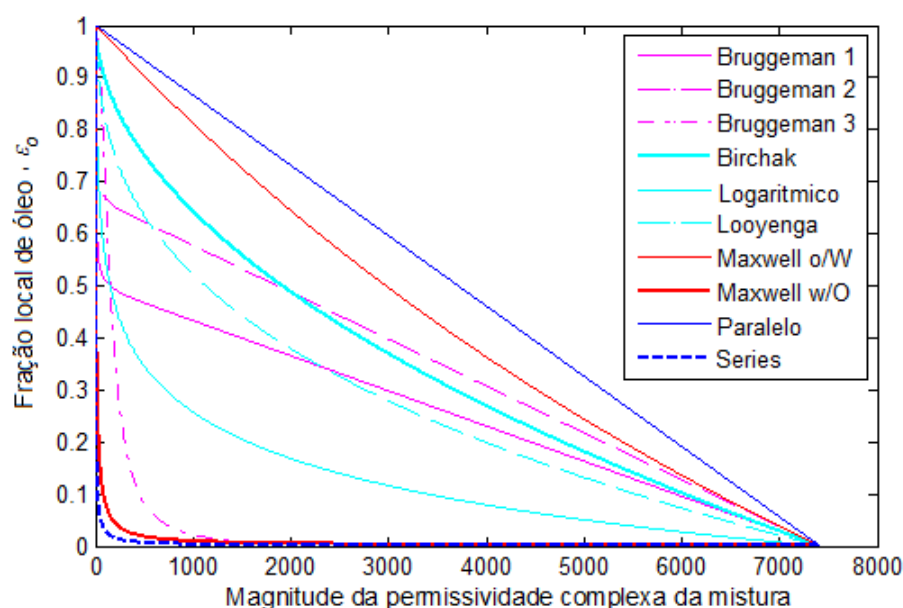


Figura 109. Relação entre a fração local de óleo e a permissividade relativa complexa para diferentes modelos de permissividade. $\epsilon_o = 3 - j0$ e $\epsilon_w = 79 - j7.4059 \times 10^3$, a 41 °C, Rodriguez et al. (2015).

A partir da fração de óleo se calcularam frações de óleo cordais e transversais médias no tempo, para escoamento disperso, Figura 110, e estratificado, Figura 111 e Tabela 19. Também se comparam com as frações obtidas pelo densímetro de raios- γ , Figura 112. Os dados foram processados para todos os modelos apresentados na Tabela 6. Os resultados das imagens são melhores visualmente quando é aplicado o modelo Paralelo, Figura 110 e Figura 111. Mas quantitativamente o modelo Paralelo prediz melhor o *holdup* da água para escoamento disperso, com uma ARE de 13,40%. Porém, para escoamentos estratificados o modelo de Bruggeman 2 dá a melhor previsão do *holdup* da água, com um ARE de 8,05%, Figura 112. Esses erros são maiores em comparação com os encontrados em estudos prévios nos que escoamentos de água de torneira-óleo foram usados (Rodriguez et al. (2011, 2012 e Da Silva et al. (2011)). Porém, neste estudo foi usado um modelo de permissividade complexa e foi usada água salgada com uma alta condutividade.

Na Figura 111 se apresentam distribuições da frações de óleo na seção transversal médias no tempo. A velocidade superficial da água é mantida constante em 0,06 m/s, enquanto a de óleo muda de 0,02 m/s a 0,1 m/s. As frações de entrada de óleo foram calculadas como 25%, 41% e 64%, respectivamente. As imagens mostram a existência de uma curvatura, côncava ou convexa, dependendo da fração de óleo. As frações cordais verticais, Figura 113, confirmam a existência da curvatura.

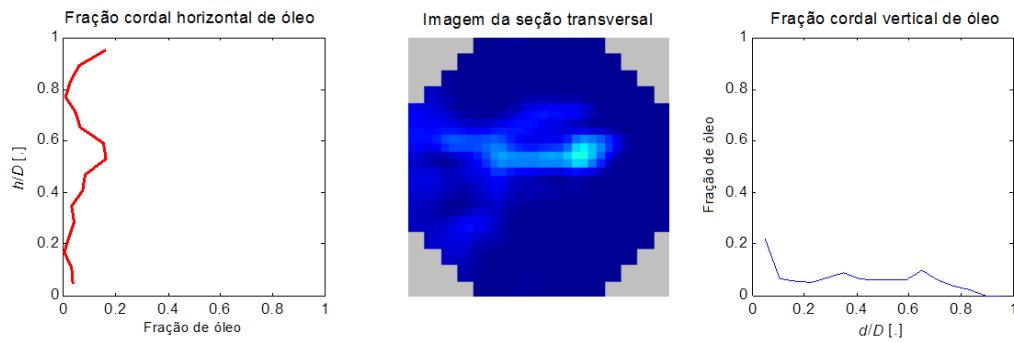


Figura 110. Distribuições cordais e da seção transversal da fração de óleo obtidas pelo sensor *wire-mesh*; $j_w=1,9$ m/s, $j_o=0,8$ m/s para escoamento disperso, Rodriguez et al. (2015).

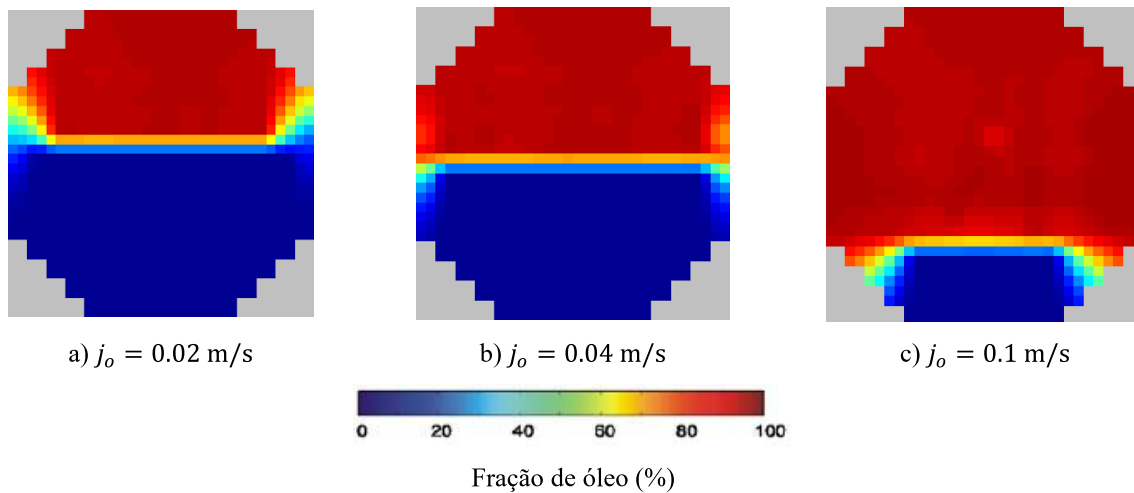


Figura 111. Distribuições da seção transversal da fração de óleo obtidas pelo sensor *wire-mesh* com $j_w=0,06$ m/s e diferentes velocidades superficiais de óleo, para escoamento estratificado, Rodriguez et al. (2015).

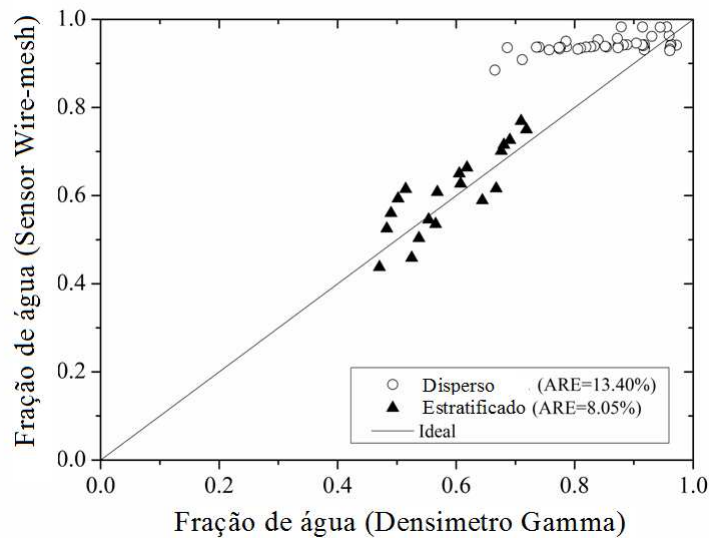


Figura 112. Comparação entre as frações volumétrica de óleo obtidas pelo densímetro de raios- γ e o WMS, Rodriguez et al. (2015).

Tabela 19. Comparação das frações de água obtidas pelo sensor *wire-mesh* com predições de diferentes modelos de dois fluidos disponíveis na literatura, Rodriguez et al. (2015).

Modelo de dois fluidos	ARE (%)	Desvio (%)
Taitel & Dukler, 1976	44	-60
Trallero, 1995	17	-30
Rodriguez and Baldani, 2012	7	± 15

Neste estudo também se obtém a altura da interface, Figura 113 e se compara com as predições de modelos teóricos, Tabela 20.

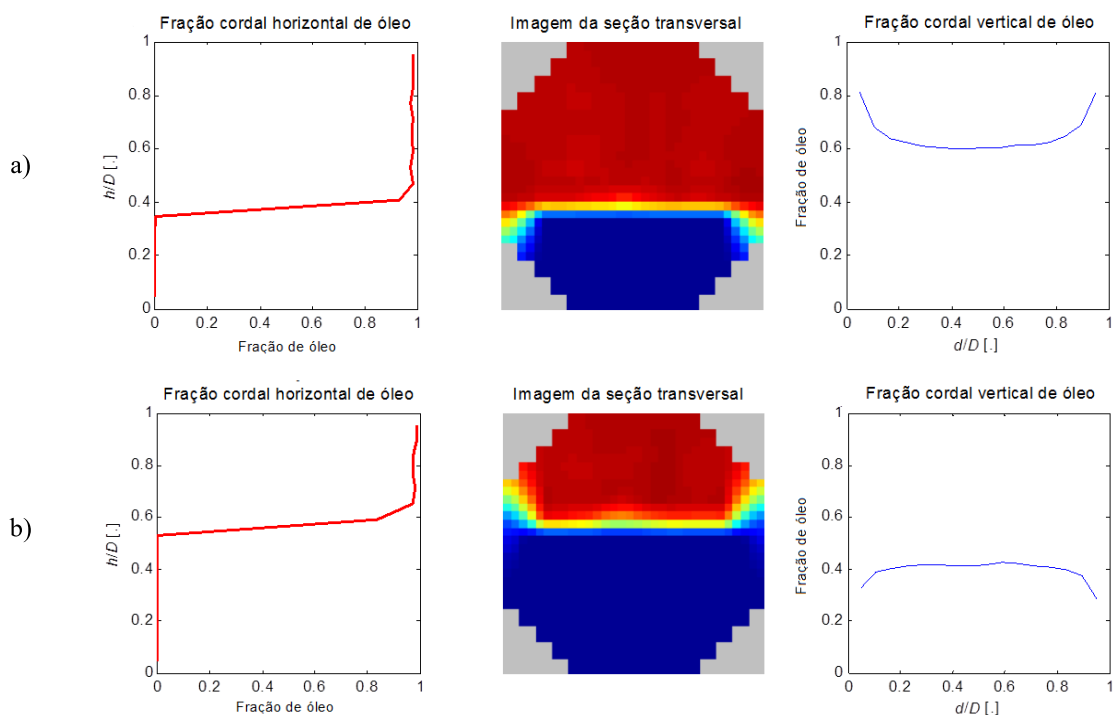


Figura 113. Distribuições na seção transversal da fração de óleo obtidas pelo sensor *wire-mesh* com: a) $j_w=0.06$ m/s, $j_o=0.07$ m/s; b) $j_w=0.06$ m/s, $j_o=0.02$ m/s, para escoamento estratificado, Rodriguez et al. (2015).

Tabela 20. Comparação dos níveis de altura da interface obtidos pelo sensor *wire-mesh* com predições de diferentes modelos de dois fluidos disponíveis na literatura, Rodriguez et al. (2015).

Modelo de dois fluidos	ARE (%)	Desvio (%)
Taitel & Dukler, 1976	26	19
Trallero, 1995	10	10
Rodriguez and Baldani, 2012	18	11

4.4 EXPERIMENTOS EM ESCOAMENTOS TRIFASICOS

Nesta seção são apresentados o sistema de aquisição de dados desenvolvido especialmente para a medição da permissividade trifásica. Continua-se com a apresentação dos dados de fração das fases, através de imagens da seção transversal e radial dos escoamentos.

Estas imagens são comparadas qualitativamente com imagens laterais do escoamento obtidas por câmera de alta velocidade. Também se apresentam as comparações quantitativas das medições de fração volumétrica obtida pela técnica proposta e válvulas de fechamento rápido (QCV).

4.4.1. Sistema de Aquisição Trifásico

O sistema de aquisição trifásico foi desenhado e desenvolvido levando em conta os seguintes intuitos:

- Medição simultânea da permissividade relativa e a condutividade dos fluidos.
- Obter e armazenar ao menos 5000 quadros/segundo para um sensor de 16×16 fios, durante pelos menos 20 segundos.
- Ter sincronia com câmera de alta velocidade.
- Escalonamento, permitir, futuramente, a expansão para sensores com mais fios.

Um esquema do sistema implementado se pode ver na Figura 114. A parte principal do sistema consiste num sistema de geração de sinais e aquisição de dados baseado na plataforma *FPGA FlexRIO* da National Instruments. O controle do sistema é feito por uma placa FPGA NI-7962R que sincroniza a operação entre a placa de aquisição de dados, a placa de transmissão e a câmera de alta velocidade. A conversão Analógica-Digital é feita por uma placa NI-5751. Essa placa conta com 16 canais de aquisição simultânea a 50MS/s e 14 bits de resolução. Os canais têm uma faixa 2Vpp com terminação de 50Ω e acoplamento DC. O circuito receptor foi especialmente desenhado para garantir o acoplamento com essa placa, além de sua proteção. O amplificador de transimpedância está baseado em amplificadores operacionais OPA656 e o circuito de proteção e acoplamento em amplificadores operacionais OPA698. O circuito de transmissão está baseado em multiplexores análogos 74HCT4051 e buffers de alta velocidade LMH6560, Figura 115. Para o sinal de excitação é usado um gerador de sinais arbitrários PXI-5412.

Como técnica para determinar a permissividade complexa, foi escolhida a medição da parte real e imaginária, por meio de um demodulador IQ. Essa técnica se revelou como a melhor opção para sua implementação, seção 2.3.5. Considerando isso o sistema deve contar com a capacidade de obter várias amostras de um sinal senoidal na frequência de 1 MHz, seção 4.2. Além disso, deve permitir a sua comparação com o sinal de excitação (referência) para permitir deduzir a permissividade complexa.

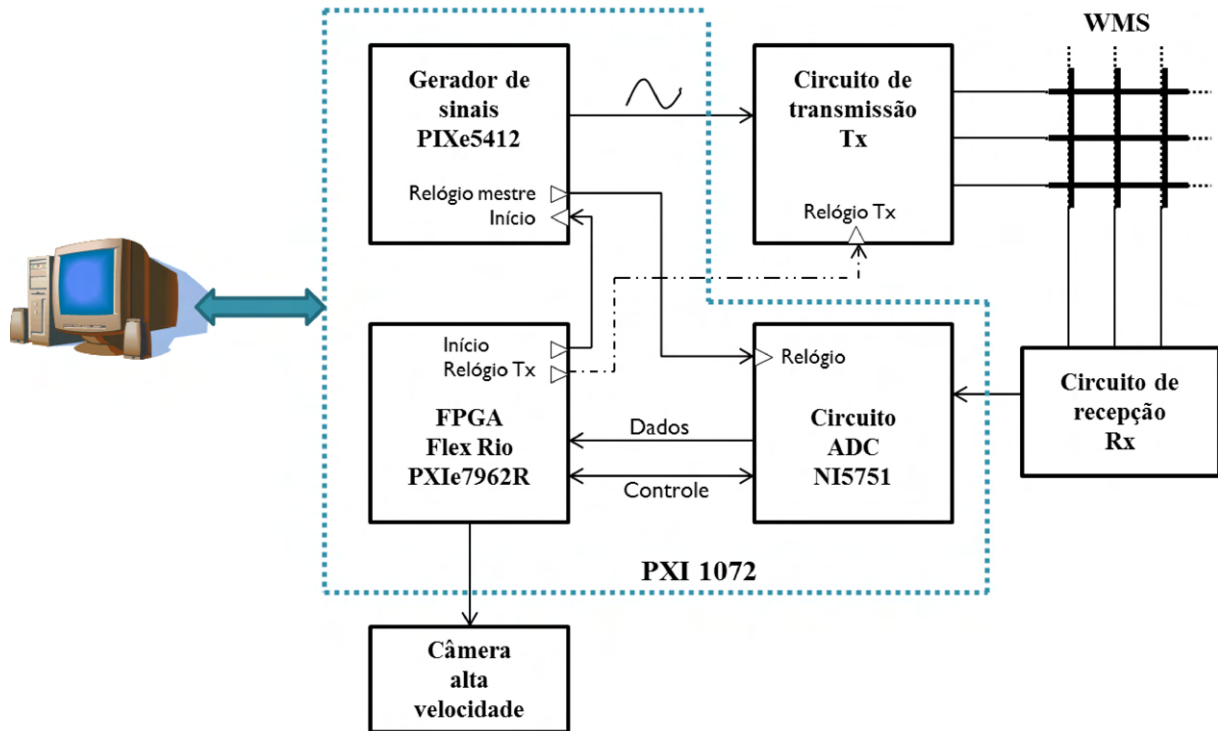


Figura 114. Diagrama esquemático do tomógrafo *wire-mesh* de impedância implementado.

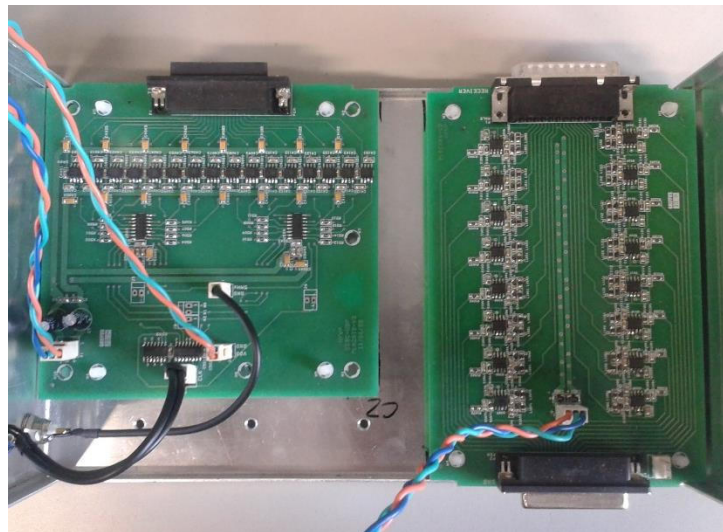


Figura 115. Placa do circuito multiplexador (Tx) e Placa de amplificadores de pontes autobalancçadas (Rx) para um sensor WMS de impedância de 16×16 fios, projetadas e construídas no NETeF.

Para poder usar a versão digital do demodulador IQ, onde $f_o = f_i$, não pode existir a mínima diferença entre essas frequências. Qualquer pequena diferença entre elas causa que as saídas V_{QF} e V_{IF} sejam sinais senoidais e não DC. Por isso, normalmente, o sinal de excitação monitora-se por meio de um canal ADC. Isso implica ter um canal a menos para o sensor. Para evitar isto, um relógio mestre e um sinal de disparo sincronizam a frequência e fase do sinal de excitação V_i gerado pela placa PXI-5412 e a frequência de amostragem dos ADC na NI-5751. Desta forma, se garantiu que o sinal do gerador esteja perfeitamente sincronizado com a aquisição e se possa conhecer o sinal V_i , somente precisa-se conhecer o instante de amostragem.

Além disso, se o número de amostras por cada ciclo do sinal de excitação N_s é um número inteiro, os filtros passa-baixa podem ser implementados como a média dos N_s valores amostrados. Dada a sincronia entre o gerador e os ADC, se pode conseguir exatamente até 50 amostras por cada ciclo do sinal de excitação (a 1 MHz), o que permite reconstruir com detalhes os sinais de saída V_o e o sinal de excitação V_i .

Os dados adquiridos são enviados a um PC para seu processamento, que também se encarrega de comandar o sistema através de um programa desenvolvido em Labview 2012. Esse sistema pode manejar uma grande taxa de dados. Isto se deve a que ele conta com uma taxa alta de amostragem (50 MS/s), a quantidade de canais (16) e sua resolução (2 Bytes para 14 bits), além da informação do instante de amostragem (2 Bytes). Assim, por cada amostra são gerados 34 Bytes, que a 50 MS/s significa gerar 1,7 GB/s. Por isto, a transmissão é feita através de uma interface PXIe-PCIe-8381 que pode sustentar uma taxa de transferência de 3,2 GB/s. De fato, o sistema conseguiu suportar taxas de transferência de até 950MB/s, limitação criada pela máxima taxa que suportou a placa FPGA PXIe-7962R. Os dados podem ser armazenados de duas formas, diretamente à HDs normais (para taxas menores a 50 MB/s), HDs de estado sólido (para taxas até 300 MB/s) ou à RAM (taxas maiores a 300 MB/s). O PC conta com um controlador de memória baseado na arquitetura X79 de Intel. Isto permite que suporte a máxima taxa de transferência diretamente à RAM, conseguindo armazenar até 56 GB de dados, o que significa armazenar 58,94 segundos de dados.

O tempo de estabelecimento do circuito completo (circuitos de transmissão, ponte autobalanceada e proteção) se apresenta na Figura 116. Este tempo foi medido desde o 50% do flanco de subida do Relógio Tx, que permite comutar entre os diferentes fios transmissores, até estimar um erro menor a 2% no valor da envolvente superior. Esta figura mostra que o sistema responde como um sistema de primeira-ordem. Os tempos observados não foram maiores a 5,5 μ s. Por segurança, as amostras só foram adquiridas após 6 μ s. Por outro lado, para obter uma medição da permissividade num ponto de cruzamento se necessita de ao menos um ciclo completo do sinal de excitação, 1 μ s. Assim, este sistema pode obter um quadro completo da seção transversal ao varrer os 16 fios Txs, isto corresponde a $16 \times 7 \mu$ s = 112 μ s ou 8930 quadros/segundo. Isto gera 4,86 MB/s o que está abaixo da taxa de transferência máxima. Apesar de que a técnica implementada nesta tese subutiliza a capacidade máxima do sistema, se pode chegar a taxas muito maiores se o tempo de estabelecimento é melhorado ou se usam técnicas como a identificação. Desta forma, também se viabiliza expandir o uso do sistema com sensores com maior número de fios.

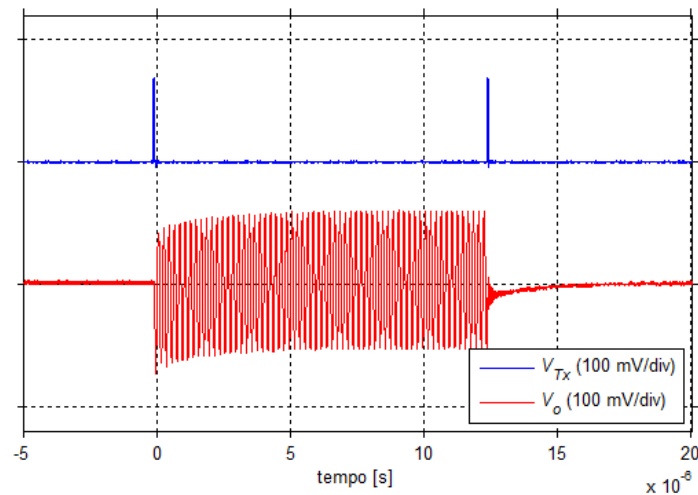


Figura 116. Tempo de estabelecimento do sinal de saída dos receptores, vermelha. Se mede em relação ao relógio de transmissão, azul.

Finalmente, foi implementado um sinal para sincronização de câmeras de alta velocidade. Para este caso particular, uma câmera Olympus i-Speed 3 monocromática é sincronizada quadro a quadro com a imagem obtida pelo WMS. Para isto, um sinal de relógio se coloca em estado alto quando está ativo o primeiro fio Tx.

4.4.2. Escoamentos trifásicos em tubulação vertical

Na Figura 117, apresentam-se os pontos experimentais para escoamentos trifásicos em tubulação vertical. A velocidade superficial do ar (j_a) foi variada entre 0,01 e 1,85 m/s, a velocidade superficial da água (j_w) foi variada entre 0 e 1,3 m/s e a velocidade do óleo (j_o) entre 0,04 e 0.6 m/s. Na Figura 117, nas ordenadas, tem-se a velocidade superficial dos líquidos $j_L = j_w + j_o$. Devido a limitações do injetor e sistemas de controle, só foi possível obter padrões trifásicos Ig-Bo. Essencialmente, todos os experimentos apresentavam bolhas de Taylor compostas por ar, seguidas por pistões compostos por bolhas de óleo dispersas na água. A Tabela 21 apresenta as velocidades superficiais j_i discriminadas para cada fase e também os *holdups* de cada fase medidos pelas válvulas de fechamento rápido $\bar{\alpha}_{i,QCV}$.

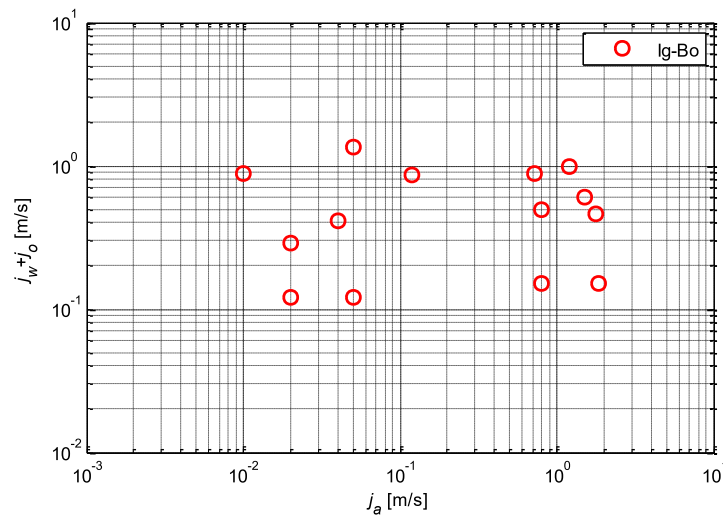


Figura 117. Mapa de fluxo dos 14 experimentos realizados com escoamentos trifásicos em tubulação vertical.

Tabela 21. Velocidades superficiais das fases para os experimentos trifásicos e as frações volumétricas obtidas pelas válvulas de fechamento rápido.

Experimento	j_w [m/s]	j_o [m/s]	j_a [m/s]	$\bar{\alpha}_{w,QCV}$ [.]	$\bar{\alpha}_{o,QCV}$ [.]	$\bar{\alpha}_{a,QCV}$ [.]
1	0,1	0,02	0,05	0,445	0,095	0,460
2	0,1	0,02	0,02	0,759	0,007	0,234
3	0,27	0,02	0,02	0,796	0,062	0,142
4	0,32	0,09	0,04	0,745	0,120	0,135
5	0,66	0,22	0,01	0,635	0,343	0,022
6	0,66	0,21	0,12	0,526	0,153	0,321
7	0,42	0,04	1,76	0,248	0,029	0,723
8	0,48	0,13	1,52	0,858	0,036	0,745
9	0,1	0,05	1,85	0,102	0,084	0,814
10	1,3	0,05	0,05	0,807	0,036	0,157
11	0,1	0,05	0,8	0,285	0,131	0,584
12	0,25	0,25	0,8	0,263	0,255	0,482
13	0,28	0,6	0,72	0,157	0,347	0,496
14	0,47	0,51	1,2	0,208	0,182	0,609

a. Resultados qualitativos

Os resultados qualitativos são apresentados como imagens da seção transversal e como vistas laterais. Estas últimas são as medições obtidas por um elétron central. Isso corresponde a um corte diametral ao longo da direção axial, mas com um eixo temporal. Para baixas vazões de ar, este eixo pode ser convertido no eixo axial espacial z , se é escalado de acordo a velocidades dessa fase, Prasser (2003) apud Da Silva (2008). A escala de cores usada para representar os fluidos e suas frações se pode ver na Figura 118. Uma fração de água igual a um (só água no ponto de cruzamento) será representada com a cor azul, óleo com vermelho e ar com verde. As cores intermediárias são interpoladas proporcionalmente a fração da fase.

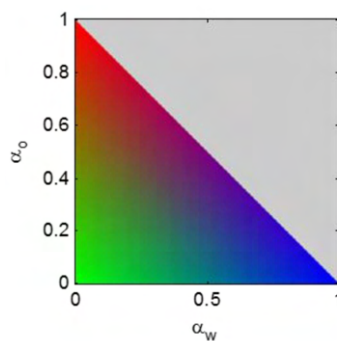


Figura 118. Escala de cores usada para representar os fluidos e suas frações. Água pura: Azul; Óleo puro: Vermelho; Ar puro: Verde.

Na Figura 119, apresenta-se uma imagem lateral durante o tempo de transito de uma bolha de Taylor, imagens transversais e lateral de um escoamento Ig-Bo, experimento 6. Essas imagens foram obtidas com uma taxa de 1000 quadros/s e com o modelo Paralelo. A imagem lateral apresenta 150 quadros ou 150 ms. Essa imagem apresenta a forma típica da bolha de Taylor, onde o nariz se apresenta com uma forma cônica, com a ponta arredondada, e a cauda é essencialmente cilíndrica, ocupando a maior parte do diâmetro do tubo e a parte final irregular. As imagens da seção transversal correspondem a diferentes instantes de tempo. No instante A, na metade do pistão, a imagem apresenta cores azul e rosa, o que corresponde a mistura água-óleo, sendo água a fase dominante. No instante B, o início da bolha de Taylor, se pode ver como o nariz da bolha tem uma forma oval e centrada no tubo. A bolha tem a cor verde, referente ao ar, rodeada por uma mistura óleo-água. No instante C, na metade do caminho, a bolha passa a ser cilíndrica. Já no instante D, o final da bolha, a cauda se desloca do centro. As imagens obtidas pela câmera de alta velocidade confirmam esses resultados, com exceção das formas que assume a bolha na seção transversal. Segundo a escala, a concentração de óleo é maior perto da bolha e a concentração de água é maior perto da parede.

Aplicar diferentes modelos modifica os valores das frações das fases, pelo que também muda as cores nas imagens. A Figura 120 apresenta o resultado de aplicar diferentes modelos trifásicos (Paralelo, Bruggeman, Maxwell-Garnett, Series) ao escoamento, especificamente ao instante B da Figura 119. Segundo a escala de cores, os modelos Paralelo e Bruggeman representam de forma mais adequada a fração da bolha de Taylor que se esperaria (verde). A bolha de ar não está bem representada nos modelos de Maxwell-Garnett e Series, onde apresentam uma cor por fora da escala, indicando ao mesmo tempo a presença de frações perto da unidade de água e gás. Para o filme de água, ao redor da bolha, os modelos Paralelo, Bruggeman e Maxwell-Garnett indicam uma mistura de óleo-água, com frações semelhantes. O modelo Series difere deles indicando uma maior quantidade de água com óleo disperso.

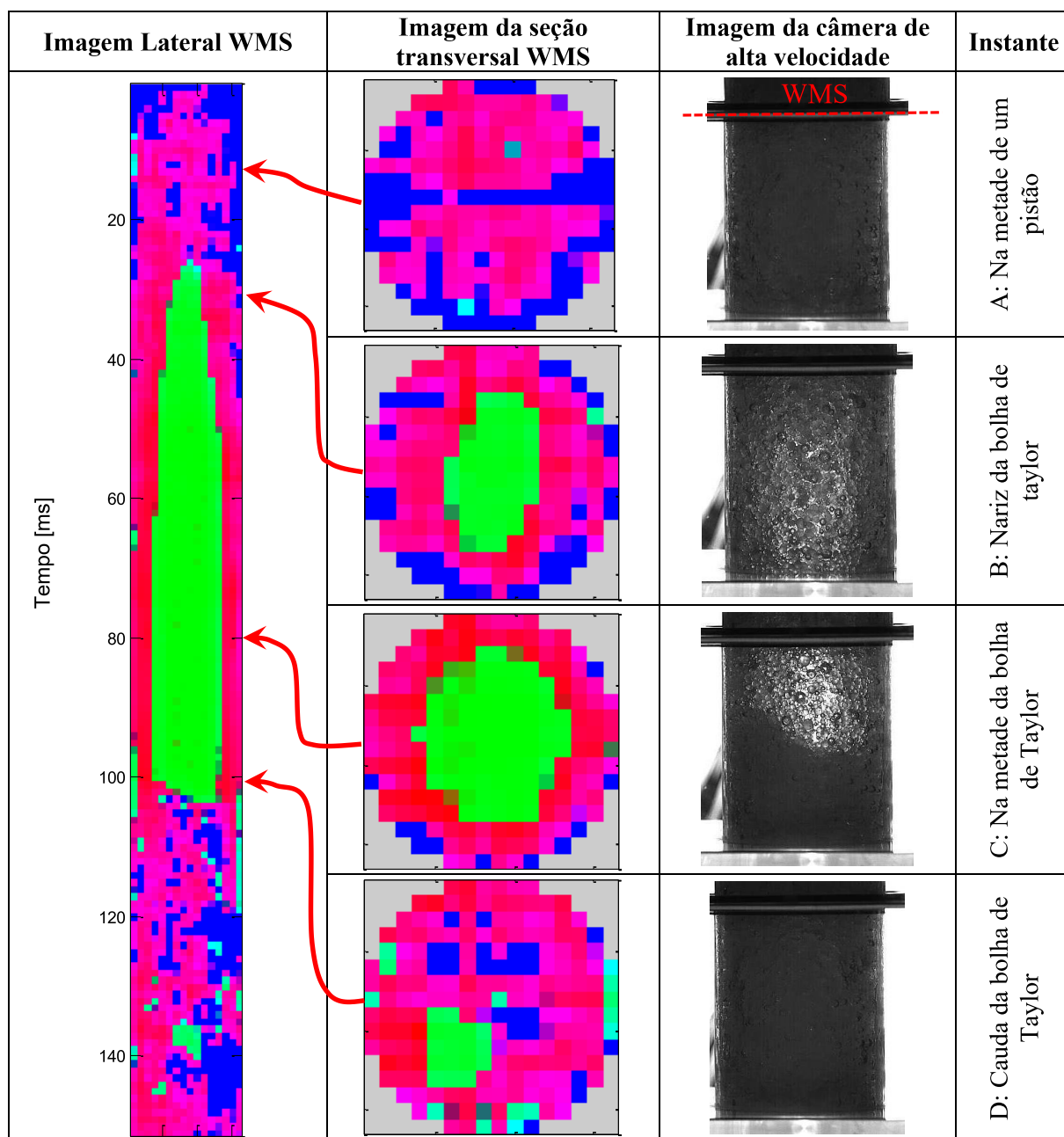


Figura 119. Imagens laterais e imagens da seção transversal durante o trânsito de uma bolha de Taylor em um escoamento trifásico; Experimento 6. Imagem obtida a 1000 quadros/s. O modelo Paralelo foi usado para obter as frações de fase.

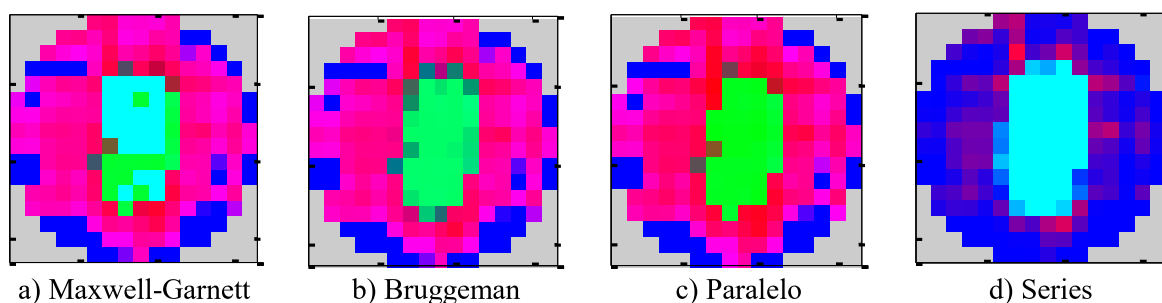


Figura 120. Imagens da seção transversal obtidas para diferentes modelos de permissividade trifásicos a) Maxwell-Garnett; b) Bruggeman; c) Paralelo e d) Series. O quadro corresponde ao nariz de uma bolha de Taylor num escoamento trifásico; Experimento 6, instante B da Figura 119.

Para ilustrar o funcionamento do sistema implementado, mostra-se, na Figura 121, as diferenças no comportamento do escoamento Ig-Bo, mantendo constante a velocidade superficial do ar e mudando a velocidade superficial dos líquidos. Se pode observar nas imagens que existem variações nas bolhas de ar, comprimento e frequência, e nas frações dos líquidos, água e óleo. Isto representa bem as frações medidas através das válvulas de fechamento rápido.

b. Resultados quantitativos

Os resultados quantitativos são apresentados como as frações médias temporais na seção transversal para cada uma das fases e sua somatória. Também se apresentam as distribuições cordais das fases e a comparação das frações das fases médias obtidas pelo sensor *wire-mesh* e as obtidas por as válvulas de fechamento rápido. Esses dados são apresentados para os quatro modelos de permissividade considerados.

Na Figura 122, apresentam-se as frações médias temporais da seção transversal durante o transito de uma bolha de Taylor (Figura 119, durante o Experimento 6). Se observa, em todos os modelos, que a fração de ar muda como uma exponencial ascendente durante a passagem da bolha. Mas os modelos diferem no comportamento para água e óleo. Enquanto Maxwell-Garnett, Bruggeman e Paralelo entregam frações quase iguais, o Series apresenta um valor muito maior de água. Outra observação é acerca da somatória das frações das fases, que idealmente deve ser igual à unidade. Para os três primeiros modelos, esse valor se encontra bastante acima da unidade. O modelo Series contrasta porque mantém a somatória próxima da unidade durante a passagem do pistão, mas se aparta durante o trânsito da bolha. De modo geral, o modelo Paralelo apresenta resultados mais condizentes com o esperado, com a fração de água chegando a ficar abaixo da fração de ar durante a passagem da bolha de Taylor. Na Figura 123 se apresentam as frações médias temporais da seção transversal durante todo o Experimento 6 5s. Se pode observar a passagem de múltiplas bolhas de Taylor. Para o Experimento 6 os valores de *holdup* medidos pelas válvulas de fechamento rápido foram $\bar{\alpha}_{w,QCV} = 0,526$, $\bar{\alpha}_{o,QCV} = 0,153$ e $\bar{\alpha}_{a,QCV} = 0,321$. Em geral, os valores da fração de água são superestimados pelo sensor, mas no caso Paralelo apresenta-se uma diferença de apenas 10%. Para o óleo, os valores são bastante superestimados, exceto para o modelo Series, onde a superestimação alcança apenas 20%. O *holdup* de ar sempre foi subestimado.



Figura 121. Imagens laterais de escoamentos Ig-Bo com $j_a = 0,8 \text{ m/s}$ e diferentes j_L . a) Experimento 11; b) Experimento 12; c) Experimento 13. Imagens obtidas para modelo Paralelo. A escala vertical temporal corresponde a 500 ms em todos os casos.

Apesar de que nas equações de relação trifásicas é aplicada a equação da continuidade para encontrar como solução as frações, ela não limita a solução a valores positivos. Dessa maneira, a solução pode conter um valor negativo e dois positivos, totalizando a unidade. Isso explica a superestimação das frações do óleo e da água do ponto de vista matemático. Para evitar essas condições, as medições da parte real e imaginária devem ser exatamente as previstas pelas relações, segundo as permissividades complexas e frequência usadas para a calibração. Mas devido à incerteza da medição, é muito difícil garantir que a solução cumpra com os limites esperados.

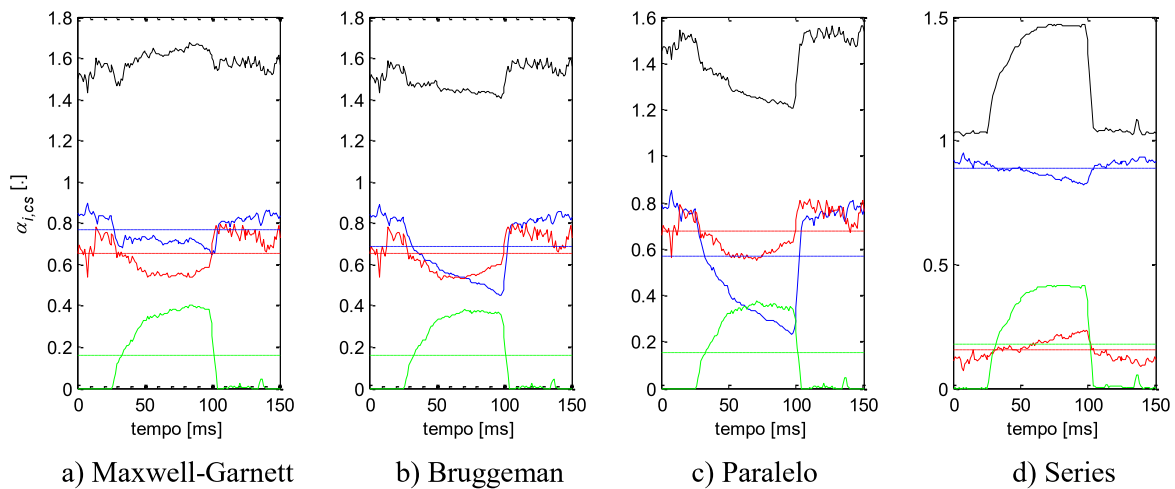


Figura 122. Detalhe das frações médias temporais na seção transversal para cada fase e sua somatória para os diferentes modelos de permissividade trifásicos. O tempo apresentado corresponde ao trânsito de uma bolha de Taylor do experimento 6, 0,15 s. a) Maxwell-Garnett; b) Bruggeman; c) Paralelo e d) Series. Água: Azul; Óleo: Vermelho; Ar: Verde; Somatória: Preto. As linhas tracejadas corresponde m aos valores médios.

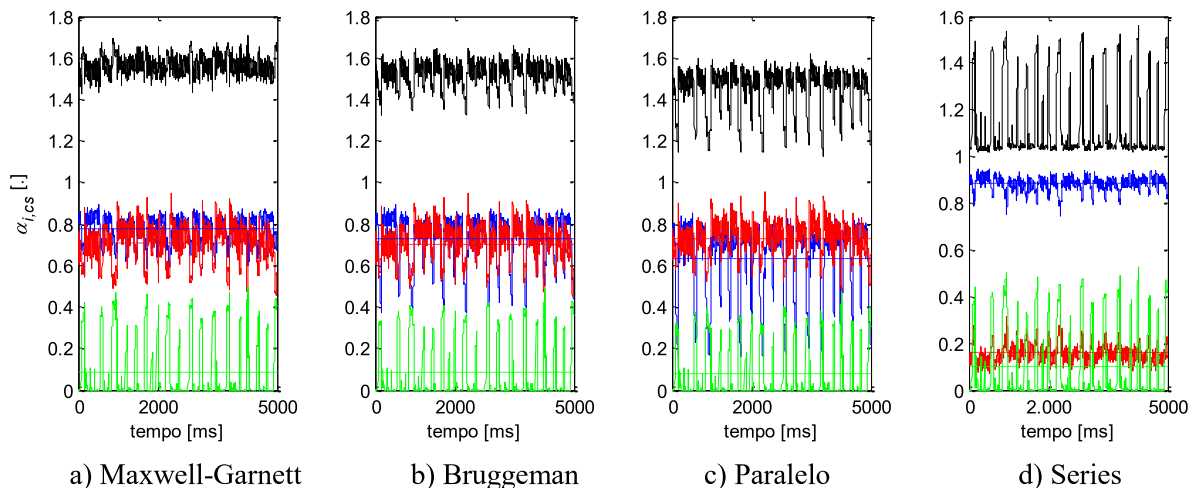


Figura 123. Frações médias temporais na seção transversal para cada fase e sua somatória para os diferentes modelos de permissividade trifásicos. O tempo apresentado corresponde ao total do experimento 6, 5 s. a) Maxwell-Garnett; b) Bruggeman; c) Paralelo e d) Series. Água: Azul; Óleo: Vermelho; Ar: Verde; Somatória: Preto. As linhas tracejadas correspondem aos valores médios.

As frações cordais para as diferentes fases são apresentadas na Figura 124. Para o caso do trânsito da bolha de Taylor, se pode ver que a maior fração de ar está concentrada no centro da tubulação, o óleo apresenta picos perto da parede e a água se encontra concentrada na parede. Considerando toda a duração do experimento, a análise anterior prossegue válida, mas os níveis das frações mudam. O ar baixa o seu valor pico, enquanto os outros fluidos mantêm seus valores.

Para os Experimentos 11 a 13, ilustrados na Figura 121, a distribuição das frações cordais são similares, Figura 125. Se pode observar que a fração de ar se mantém quase constante, concentrando-se no centro e ao lado das paredes. O óleo se concentra onde a fração de ar está baixa, enquanto que a água se concentra nas paredes.

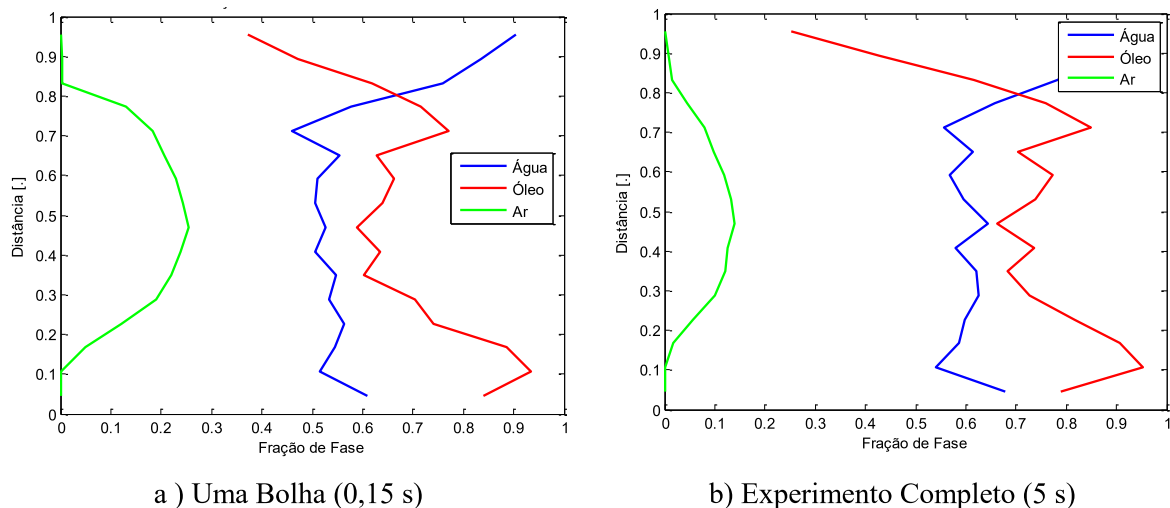


Figura 124. Frações cordais para o Experimento 6, a) considerando o transito de uma bolha e b) o experimento completo.

Da Figura 126 até a Figura 128, se apresenta o *holdup* de água, óleo e ar, respectivamente, medidos pelo sensor *wire-mesh* e pelas válvulas de fechamento rápido. Cada figura apresenta os valores obtidos através dos quatro modelos de permissividade trifásica considerados. No caso da água o modelo que melhor se ajusta é o Paralelo. Para o óleo, nenhum modelo se destaca favoravelmente. No caso do ar, o modelo de Maxwell-Garnett apresenta o melhor ajuste. Conclui-se que nenhum dos modelos, individualmente, represente o comportamento das misturas medidas pelo sensor. Mas isto contrasta com o ARE calculado para cada fase e modelo, considerando todos os experimentos, comparado com a medição por QCV, como se apresenta na Tabela 22. Essa tabela mostra que o melhor modelo para água foi o Series, para óleo o modelo Paralelo e para ar o modelo de Maxwell-Garnett. Mas todos os erros são maiores que 39 %. Para o caso do óleo, se confirma que nenhum modelo acompanha os resultados adequadamente, os erros são maiores que 68 %. Os erros globais médios de todos

os modelos foram semelhantes, da ordem de 55 %, mas, por outro lado, o modelo Paralelo foi o único que não apresentou erro superior a 69%.

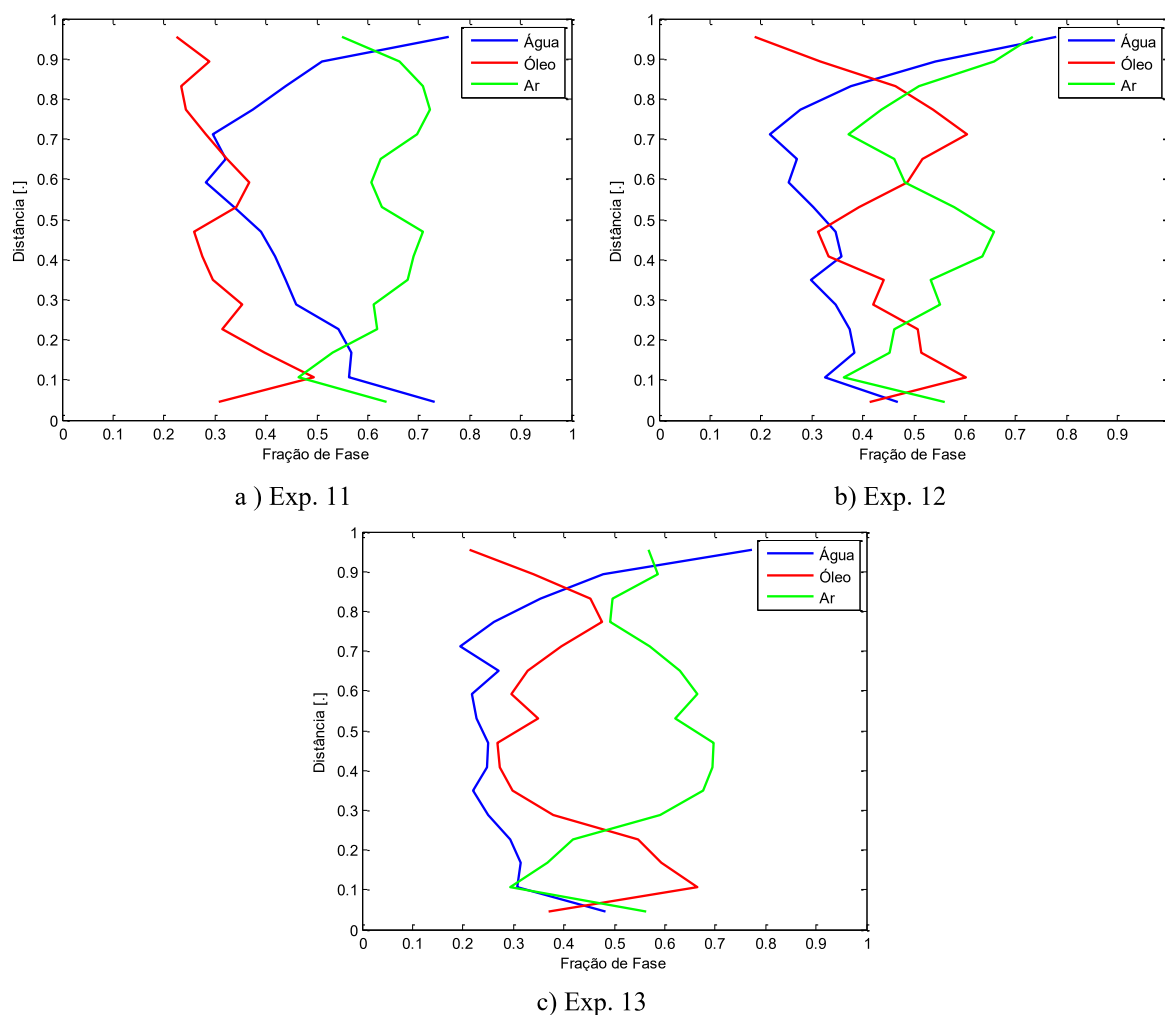


Figura 125. Frações cordais para os Experimentos 11, 12 e 13, para os primeiros 500 quadros.

Os resultados indicam que os modelos se ajustam melhor dependendo do tipo ou topologia de mistura que se encontra passando num determinado momento no sensor. Isso está de acordo com os resultados reportados nos experimentos com escoamentos bifásicos.

Tabela 22. Comparação entre o erro relativo médio para os diferentes modelos trifásicos, comparado com QCV.

Modelo	ARE água [%]	ARE óleo [%]	ARE ar [%]
Maxwell-Garnett	49,618	71,743	40,928
Bruggeman	55,087	72,058	42,279
Paralelo	63,622	68,517	43,226
Series	39,062	85,593	44,759

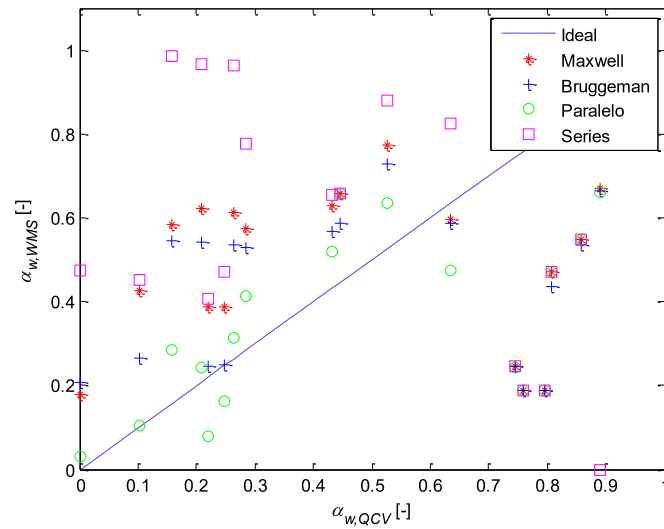


Figura 126. *Holdup* de água medido pelas válvulas de fechamento rápido comparado com o valor medido pelo sensor *wire-mesh*, para os diferentes modelos de permissividade trifásicos.

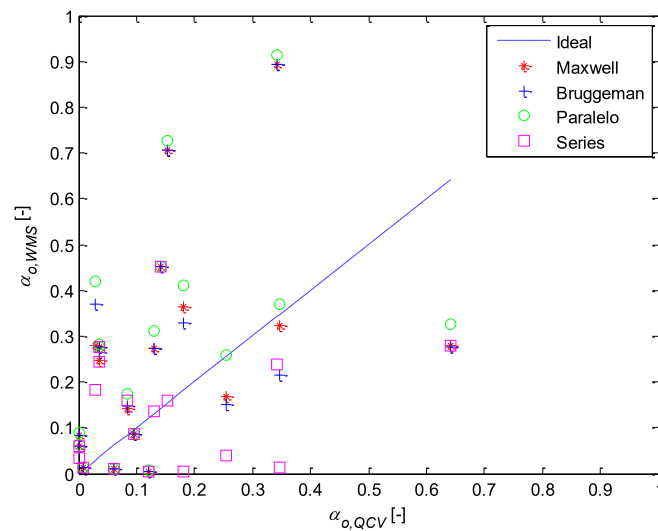


Figura 127. *Holdup* de óleo medido pelas válvulas de fechamento rápido comparado com o valor medido pelo sensor *wire-mesh*, para os diferentes modelos de permissividade trifásicos.

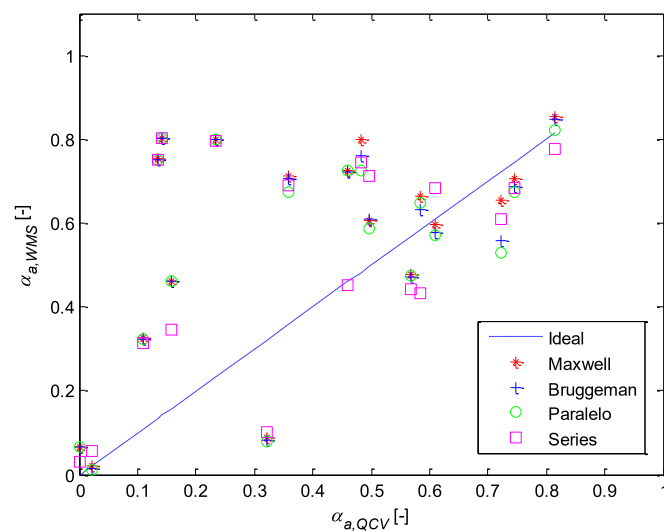


Figura 128. *Holdup* de ar medido pelas válvulas de fechamento rápido comparado com o valor medido pelo sensor *wire-mesh*, para os diferentes modelos de permissividade trifásicos.

4.4.3. Efeitos da intrusividade e viscosidade do óleo no escoamento

A principal desvantagem da *wire-mesh* é se tratar de um sensor intrusivo. Essa característica pode causar modificações no padrão de escoamento observado a montante do sensor. Wangjiraniran (2004) estudou a intrusividade em escoamentos de bolhas em escoamento água-ar na vertical e Da Silva et al. (2011) em escoamento disperso óleo-água na horizontal. Esses trabalhos mostraram que a velocidade instantânea das bolhas se vem afetadas pelo sensor, dependendo de seu tamanho e também de sua posição em relação aos fios. Em geral, as bolhas menores que o espaço de separação entre fios são aceleradas, enquanto bolhas maiores são quebradas e se dividem em várias bolhas menores ao passar pelo sensor. Esse mesmo comportamento foi observado nestes experimentos trifásicos. Quando a velocidade das bolhas é alta, elas passam facilmente pelo sensor; também, no caso da água (fase contínua) estar escoando. Por outro lado, esses trabalhos reportam que não se observaram bolhas presas aos fios do sensor. Entretanto, neste trabalho, se observou que para água estagnada ou a muito baixas velocidades se podem ter bolhas presas no sensor. A Figura 129 apresenta uma sequência de imagens, obtida pela câmera de alta velocidade, que ilustra um caso extremo. Na sequência se pode observar que várias bolhas de ar ficaram presas no lado direito do sensor, entre ele e a parede do tubo, ocupando quase uma terceira parte da área. Essas bolhas se mantêm estáveis na posição e não coalescem. Além disso, uma bolha de óleo está subindo pelo lado direito, Figura 129a. Essa bolha impacta as bolhas de ar, mas não consegue atravessar a barreira que elas formam, nem consegue empurrá-las através do sensor, Figura 129b. A bolha de óleo vai se deslocando para o lado esquerdo, Figura 129c, até alcançar a *wire-mesh*, Figura 129d. Ela se permanece um tempo longo no sensor até que consegue atravessar, já com uma forma alongada, Figura 129e.

Para explicar este fenômeno, se estabelece a hipótese que as bolhas de ar estão cobertas por um filme de óleo. Isto impede que elas coalesçam e que atravessem o sensor. Ao impactar a bolha de óleo, elas atuam como uma mola, devido à tensão superficial. Isso minimiza a energia cinética da bolha de óleo e ao entrar em contato com o sensor sua inércia é mínima. A passagem do óleo pelo sensor, movimento este direcionado pelo empuxo, é dominada pela viscosidade. Por isso, o tempo que permanece no sensor é muito alto (comparado com uma bolha que não impacte) e sua forma se vê afetada severamente. É de se esperar, neste caso, que a fração de óleo seja superestimada pelo sensor *wire-mesh*.

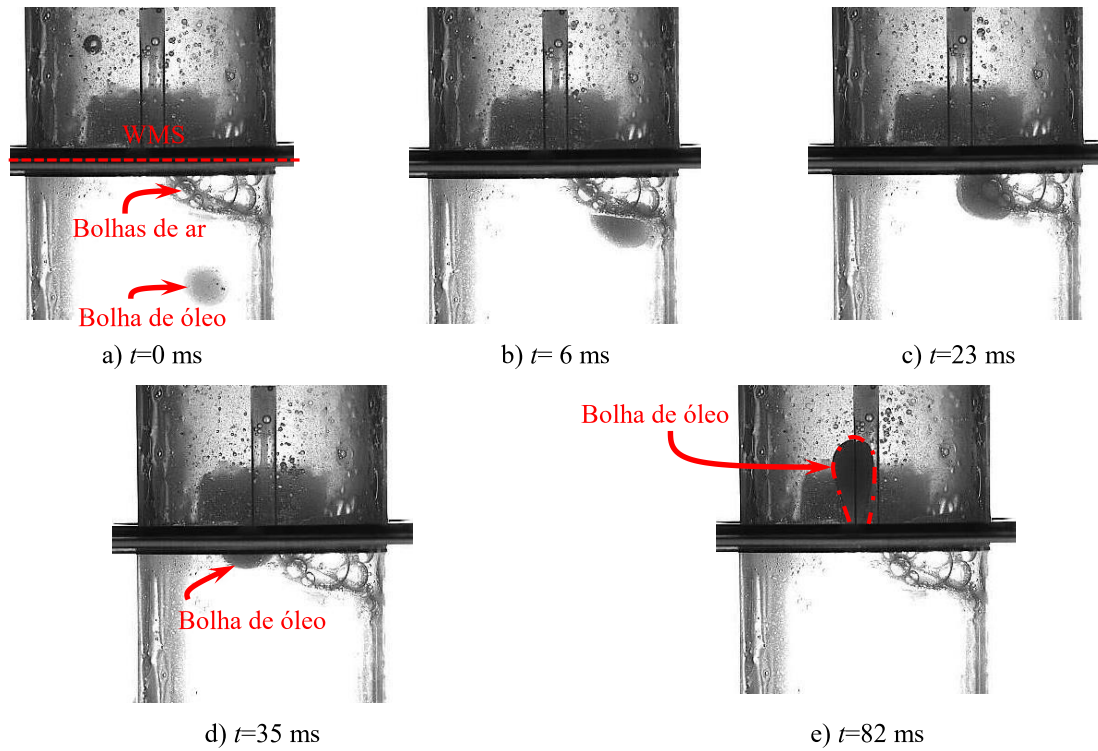


Figura 129. Bolhas de ar presas no sensor *wire-mesh* e passagem de uma bolha de óleo impactando as bolhas de ar.

Acredita-se que esse fenômeno também ocorreu nos experimentos com escoamento de água, mas em menor medida. Vale ressaltar que um tempo de permanência maior do óleo em contato com o sensor poderia aumentar também o tempo de permanência da água, o que explicaria a superestimação das frações dessas fases verificada nesses experimentos. A água seria mais afetada que o ar devido à sua maior viscosidade.

CONCLUSÕES

- Os escoamentos trifásicos são de grande relevância em várias indústrias. Em particular na indústria petroquímica, encontram-se a produção e transporte dos combustíveis. Assim, os principais laboratórios de pesquisa em escoamentos multifásicos têm voltado esforços na caracterização, medição e modelagem desses escoamentos.

- De acordo com a revisão da literatura, o sensor *wire-mesh* tem sido amplamente empregado na pesquisa de escoamentos bifásicos água-ar e óleo-água. Mas há poucos trabalhos em escoamentos trifásicos, ainda menos com óleos altamente viscosos. A intrusividade se apresenta como a principal limitação, sobre tudo na sua aplicação em cenários industriais. Estabeleceu-se que a técnica de tomografia baseada no sensor *wire-mesh* apresenta o melhor balanço entre resolução, custo e segurança, para ser aplicada em escoamentos trifásicos óleo-água-ar. Isso para as condições típicas e fluidos utilizados no NETeF.

- As técnicas consolidadas para tomografia com o sensor *wire-mesh* são a condutiva e a capacitiva. É possível aplicar a condutiva em sistemas bifásicos quando as fases apresentam uma diferença grande em suas condutividades elétricas. A técnica capacitiva se pode usar quando os fluidos apresentam diferentes permissividades. Mas nenhuma dessas técnicas consegue fazer uma medição simultânea da condutividade e permissividade que permita-lhes ser aplicadas em escoamentos trifásicos, para todo tipo de padrão de escoamento.

- A técnica de *wire-mesh* entrega medições primárias de condutividade e permissividade (permissividade complexa), que podem ser relacionadas a diferentes variáveis muito importantes para o estudo tomográfico de escoamentos multifásicos. Assim, se pode adaptar a medição de frações de fases instantâneas, suas médias no espaço e/ou tempo das fases, suas distribuições, velocidades das fases, identificação de estruturas e padrões. Mas a técnica também pode ser adaptada para medições não tomográficas, como a medição de espessuras de filmes.

- Existem diferentes modelos para relacionar as medições primárias com as frações das fases. No caso de escoamentos bifásicos, foram identificados doze modelos na literatura, que têm sido aplicados em misturas com fluidos semelhantes aos usados neste estudo. Seis desses modelos são autoconsistentes, dois não-autoconsistentes e dois são paramétricos. No caso trifásico, foram identificados quatro modelos, um deles autoconsistente.

- Os modelos são aplicáveis sob certas condições. Assim, o modelo a ser aplicado deve levar em consideração a geometria dos sensores e as características elétricas e mecânicas dos fluidos.

- Apresentam-se pela primeira vez as condições limite de frequência, para as quais podem ser aplicados os modelos Bruggeman e Series em escoamentos trifásicos. Foi mostrado que o modelo de Bruggeman poderia falhar para algumas frequências, frações das fases e características elétricas dos fluidos.

- Fez-se uma análise extensa das técnicas de medição compatíveis com a técnica *wire-mesh* e que fossem aplicáveis à medição da permissividade complexa. A técnica de medição da parte real e imaginária e a de identificação de sistemas *Grey-Box* foram identificadas como as mais viáveis para misturas trifásicas óleo-água-ar. Finalmente, para este trabalho, foi escolhida a técnica da parte real e imaginária por sua simplicidade e as amplas teorias desenvolvidas na literatura de instrumentação ao respeito.

- Foram feitas simulações numéricas de misturas bifásicas e trifásicas para um sensor *wire-mesh*. Os resultados mostraram que a relação entre as frações das fases e as características elétricas estão influenciadas pela distribuição espacial que assumem as substâncias em relação aos eletrodos. Isto é, com relação às dimensões da região de sensibilidade do ponto de cruzamento e não tanto do padrão de escoamento na tubulação.

- Sobre as condições dos experimentos, apresentados nesta tese, não foi identificado um modelo teórico que explique plenamente todo o comportamento da permissividade complexa em toda a faixa de frações volumétricas.

- O modelo Series e Maxwell-Garnett w/O foram os modelos que melhor se ajustam às simulações e aos experimentos quantitativos de misturas. Para as análises qualitativas, o modelo Paralelo é o que melhor representa as distribuições espaciais das fases.

- As medições em emulsões estáveis tem melhor concordância com a teoria, quando comparadas com dispersões, inclusive as homogêneas, para um sensor *wire-mesh*.

- É necessário determinar o desenho do circuito ponte autobalanceada levando em consideração as características reais e limitações dele. Em particular, se devem estudar os efeitos de elementos parasitas que afetem a medição. Principalmente da parte real da permissividade complexa para misturas com fluidos que tenham todos baixos valores; também o caso de misturas com vários fluidos não condutores. Também se devem estudar os efeitos da condutividade dos fluidos e a frequência de excitação nos modelos de relação quando se trabalha com a permissividade complexa.

- Apresenta-se pela primeira vez a adaptação da técnica capacitiva para medição de escoamentos bifásicos com um fluido altamente condutivo, adaptando também o processo de calibração. Os resultados qualitativos apresentam uma boa concordância com os padrões estudados. Mas os erros nos resultados quantitativos são relativamente grandes.

- Implementou-se a técnica da parte real e imaginária para a medição da permissividade complexa de misturas trifásicas óleo-água-ar e foi aplicada para medir frações de fases em escoamento vertical ascendente numa tubulação de 2,0 polegadas de diâmetro interno. Os resultados qualitativos mostram que a técnica implementada é capaz de diferenciar entre as fases e permite conhecer a distribuição delas no tubo. Os resultados quantitativos mostram que o modelo de relação que melhor explica o comportamento é o modelo Series, mas os erros nas medições da fração de óleo viscoso ainda são muito altos.

- A técnica implementada consegue alcançar taxas de aquisição de até 8000 quadros/s, para um sensor *wire-mesh* 16×16, o que permite que o sistema seja aplicado na medição de fenômenos transientes.

- Foi possível observar o efeito que produz o sensor no escoamento de óleo viscoso, isto é, a mudança nas estruturas e nas velocidades ao passar pelo sensor. Reporta-se pela primeira vez bolhas de ar presas no sensor. Isso para escoamento trifásico com água estagnada.

- A técnica implementada mostrou ser viável para o estudo de escoamentos trifásicos. Mas é preciso fazer um estudo mais profundo da incerteza de medição e os efeitos nos modelos de relação.

- O sistema implementado é adaptável para a medição da parte condutiva ou capacitiva somente. Também pode ser adaptado a outras configurações de sensores.

- Com a técnica implementada se podem obter imagens tomográficas, da seção transversal e lateral, dentro de uma tubulação na qual ocorre escoamento trifásico óleo-água-ar.

TRABALHO FUTURO

- É preciso fazer um estudo das incertezas nas medições e sua propagação, nas diferentes medições secundárias. Estudo que só tem sido feito para a *wire-mesh* condutiva.

- Se devem estudar outros padrões de escoamento trifásico, além dos aqui apresentados, assim como em outros tipos de materiais (por exemplo, aço e acrílico) e diâmetros de tubo.

- Estudo dos efeitos da temperatura na condutividade da água.

- Estudo do efeito da viscosidade do óleo na qualidade da medição do sensor *wire-mesh* em escoamento bifásico e trifásico.

- Se podem implementar e estudar outras técnicas de medição e estudar seu comportamento em outros tipos de sensores do tipo *wire-mesh*, como o planar.

APENDICE A. PUBLICAÇÕES SELECCIONADAS

Publicação de artigos em revistas

- Velasco-Peña H. F.; Rodriguez, O. M. H. “*Applications of Wire-Mesh Tomography in Multiphase Flows*”.
 - Aceito para publicação no periódico *Flow Measurement and Instrumentation*.
 - Revisão de 157 artigos. Incluindo: Princípios de operação, geometrias do sensor, tipos de medidas, limitações e desvantagens, validação e aplicações.
- Rodriguez, I. H.; Velasco Peña, H. F.; Bonilla Riaño, A.; Henkes, R.A.W.M.; Rodriguez, O. M. H. “*Experiments with a Wire-Mesh Sensor for Stratified and Dispersed Oil-Brine Pipe Flow*”.
 - Aceito para publicação em *International Journal of Multiphase Flow*. Resultados do experimento no Laboratório Shell Global International B.V, Holanda. Escoamentos bifásicos, usando óleo mineral (com densidade de 830 kg/m³ e viscosidade de 7.5 mPa s) e água salgada (densidade 1073 kg/m³ e viscosidade 0.8 mPa s) numa linha horizontal de aço com 8,28 cm de diâmetro interno.
 - Medições de *holdup* e frações transversais foram obtidas para escoamento estratificado e altamente disperso, incluindo a forma da interface e a altura da água.
 - Se adaptou o uso do circuito capacitivo a medidas conductivas, testando diferentes modelos de permissividade.

Publicação de artigos em congressos

- Velasco-Peña H. F.; Rodriguez, O. M. H. (2012). “*Applications of wire-mesh sensor in multiphase flows*”. 3º EBECHEM - Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamento Multifásico, 07-11 de Maio, 2012, Curitiba, Paraná.
- Hugo Fernando Velasco Peña, Adriana Bonilla Riaño, Iara Hernandez Rodriguez, Oscar M. H. Rodriguez. “*Evaluation of Permittivity Models for*

Holdup Measurement of Viscous-Oil in Water Dispersed Flow". 8th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2013, Jeju, Korea, May 26 - 31, 2013.

- Iara H. Rodriguez, Hugo F. Velasco P., Oscar M. H. Rodriguez, Adriana Bonilla Riaño, "*Capacitive wire-mesh sensor measurements in oil-water flow*". 10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, HEFAT 2014. Orlando, Florida, USA, 2014.

Prêmio: Best Paper in the session "Poster Session 6".

REFERÊNCIAS

- ABBASZADEH, J.; RAHIM, H. A.; RAHIM, R. A.; et al. Design procedure of ultrasonic tomography system with steel pipe conveyor. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 203, p. 215–224, 2013. Elsevier B.V.
- ABDUL WAHAB, Y.; AHMAD, M. A.; ABDUL RAHIM, R.; FAZALUL RAHIMAN, M. H. Application of transmission-mode ultrasonic tomography to identify multiphase flow regime. International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE). **Anais...** . p.119–123, 2011. IEEE.
- ABDULLAH, J.; CASSANELLO, M. C. F.; DUDUKOVIC, M. P.; et al. **Industrial Process Gamma Tomography**. 2008.
- ABOU-ARKOUB, A.; THORN, R.; BOUSBAINE, A. Online Validation of Multiphase Flowmeters Using Simple Capacitance Sensors. **Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on**, v. 59, n. 10, p. 2671–2682, 2010.
- AÇIKGÖZ, M.; FRANÇA, F.; LAHEY, R. T. An experimental study of three-phase flow regimes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 18, n. 3, p. 327–336, 1992.
- AHMED, H. Capacitance Sensors for Void-Fraction Measurements and Flow-Pattern Identification in Air-Oil Two-Phase Flow. **IEEE Sensors Journal**, v. 6, n. 5, p. 1153–1163, 2006.
- AL-HADHRAMI, L. M.; SHAAHID, S. M.; TUNDE, L. O.; AL-SARKHI, A. Experimental study on the flow regimes and pressure gradients of air-oil-water three-phase flow in horizontal pipes. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p. 810527, 2014.
- AN, Z.; NINGDE, J.; LUSHENG, Z.; ZHONGKE, G. Liquid holdup measurement in horizontal oil–water two-phase flow by using concave capacitance sensor. **Measurement**, v. 49, p. 153–163, 2014. Elsevier Ltd.
- APPEL, M.; FREEMAN, J.; PUSIOL, D. Robust Multi-Phase Flow Measurement Using Magnetic Resonance Technology. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. **Anais...** , 2013. Society of Petroleum Engineers.
- AYOB, N. M. N.; RAHIMAN, M. H. F.; ZAKARIA, Z.; YAACOB, S.; RAHIM, R. A. Dual-Plane Ultrasonic Tomography Simulation using Cross-Correlation Technique for Velocity Measurement in Two-Phase Liquid / Gas Flow. **International Journal of Electrical and Electronic Systems Research**, v. 4, p. 46–52, 2011.
- AZZOPARDI, B. J.; ABDULKAREEM, L. A.; ZHAO, D.; et al. Comparison between Electrical Capacitance Tomography and Wire Mesh Sensor Output for Air/Silicone Oil Flow in a Vertical Pipe. **INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH**, v. 49, n. 18, p. 8805–8811, 2010.

BABELLI, I. M. M. IN SEARCH OF AN IDEAL MULTIPHASE FLOW METER FOR THE OIL INDUSTRY. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 27, n. 2B, p. 113–126, 2002.

BAKALIS, S.; FRYER, P. J.; PARKER, D. J. Measuring velocity distributions of viscous fluids using positron emission particle tracking (PEPT). **AIChE Journal**, v. 50, n. 7, p. 1606–1613, 2004.

BANNWART, A. C.; RODRIGUEZ, O. M. H.; BIAZUSSI, J. L.; et al. Water-assisted flow of heavy oil in a vertical pipe: Pilot-scale experiments. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, v. 10, 2012.

BANNWART, A. C.; RODRIGUEZ, O. M. H.; TREVISAN, F. E.; VIEIRA, F. F.; DE CARVALHO, C. H. M. Flow patterns and preasure gradient in horizontal, upward inclined and vertical heavy oil-water-gas flows: experimental investigation and full-scale experiments. 3rd International Symposium on Two-phase Flow Modelling and Experimentation. **Anais...**, 2004. Pisa, Italy.

BANNWART, A. C.; RODRIGUEZ, O. M. H.; TREVISAN, F. E.; VIEIRA, F. F.; DE CARVALHO, C. H. M. Experimental investigation on liquid-liquid-gas flow: Flow patterns and pressure-gradient. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 65, n. 1-2, p. 1–13, 2009.

BANNWART, A. C.; VIEIRA, F. F.; CARVALHO, C. H. M.; OLIVEIRA, A. P. Water-Assisted Flow of Heavy Oil and Gas in a Vertical Pipe. SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium. **Anais...**, 2005. Alberta, Canada.

VAN BEEK, L. K. H. Dielectric behaviour of heterogeneous systems. **Progress in dielectrics vol 1**, 1967. London: Heywood.

BELT, R. J.; VAN'T WESTENDE, J. M. C.; PRASSER, H.-M.; PORTELA, L. M. Time and spatially resolved measurements of interfacial waves in vertical annular flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 36, n. 7, p. 570–587, 2010.

BIEBERLE, A.; HOPPE, D.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. Void measurement using high-resolution gamma-ray computed tomography. **Nuclear Engineering and Design**, v. 241, n. 6, p. 2086–2092, 2011.

BIEBERLE, A.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. Data acquisition system for angle synchronized γ -ray tomography of rapidly rotating objects. **Measurement Science and Technology**, v. 18, p. 3384–3390, 2007.

BIEBERLE, M.; HAMPEL, U. Evaluation of a limited angle scanned electron beam x-ray CT approach for two-phase pipe flows. **MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY**, v. 17, n. 8, p. 2057–2065, 2006.

BOLOMEY, J.-C.; JOFRE, L. Three decades of active microwave imaging achievements, difficulties and future challenges. 2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems. **Anais...** . p.1–4, 2010. IEEE.

BONDET, E.; DUBRUNFAUT, O.; BADOT, J. C.; et al. Low (10–800 MHz) and high (40 GHz) frequency probes applied to petroleum multiphase flow characterization. **Measurement Science and Technology**, v. 19, n. 5, p. 055602, 2008.

BONIZZU, M.; ISSA, R. I. On the simulation of three-phase slug flow in nearly horizontal pipes using the multi-fluid model. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 29, n. 11, p. 1719–1747, 2003.

BRÜCKNER, F. **Impedanzmessung mehrphasiger Fluide**, 2005. Hochschule für Technik und Wirtschaft.

BULYSHEV, A. E.; SOUVOROV, A. E.; SEMENOV, S. Y.; POSUKH, V. G.; SIZOV, Y. E. Three-dimensional vector microwave tomography: theory and computational experiments. **Inverse Problems**, v. 20, n. 4, p. 1239–1259, 2004.

CALVO, W. A. P.; HAMADA, M. M.; SPRENGER, F. E.; et al. Gamma-ray computed tomography SCANNERS for applications in multiphase system COLUMNS. **Nucleonika**, v. 54, n. 2, p. 129–133, 2009.

CANTELLI, L.; FICHERA, A.; PAGANO, A. A High-Resolution Resistive Probe for Nonlinear Analysis of Two-Phase Flows. **Journal of Thermodynamics**, v. 2011, p. 1–10, 2011.

CAO, Z.; WANG, H.; YANG, W. Q.; YAN, Y. A calculable sensor for electrical impedance tomography. **Sensors and Actuators A**, v. 140, p. 156–161, 2007.

DE CASTRO, M. S.; PEREIRA, C. C.; DOS SANTOS, J. N.; RODRIGUEZ, O. M. H. Geometrical and kinematic properties of interfacial waves in stratified oil–water flow in inclined pipe. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 37, p. 171–178, 2012.

DAHL, E. (ED); CORNELIUSSEN, S.; COUPUT, J.-P.; et al. **HANDBOOK OF MULTIPHASE FLOW METERING**. 2th. Ed. ed. The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement and The Norwegian Society of Chartered Technical and Scientific Professionals, 2005.

DAMSOHN, M.; PRASSER, H.-M. High-speed liquid film sensor for two-phase flows with high spatial resolution based on electrical conductance. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 20, n. 1, p. 1–14, 2009.

DECHSIRI, C.; GHIONE, A.; VAN DE WIEL, F.; et al. Positron Emission Tomography Applied to Fluidization Engineering. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 83, n. 1, p. 88–96, 2008.

DEMORI, M.; FERRARI, V.; STRAZZA, D.; POESIO, P. A capacitive sensor system for the analysis of two-phase flows of oil and conductive water. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 163, n. 1, p. 172–179, 2010.

DESCAMPS, M. N.; SMEETS, P. T. M.; MUDDE, R. F.; OLIEMANS, R. V. A. Three-phase concentration measurement in a vertical pipe: a comparison between wire mesh sensor and

optical fibre probe. 6th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2007. **Anais...**, 2007.

DEVIA, F.; FOSSA, M. Design and optimisation of impedance probes for void fraction measurements. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 14, n. 4-5, p. 139–149, 2003.

DYKESTEEN, E.; HALLANGER, A.; HAMMER, E.; SAMNOY, E.; THORN, R. Non-intrusive three-component ratio measurement using an impedance sensor. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, v. 18, n. 6, p. 540–544, 1985.

ELSETH, G. **An experimental Study of Oil/Water flow in horizontal pipes**. PhD Thesis, 2001. The Norwegian University of Science and Technoogy (NTNU), Porsgrunn.

ER, M. O. **ONSET TO SEPARATED WATER-LAYER IN THREE-PHASE STRATIFIED FLOW**, 2010. University of Tulsa.

FAIRHURST, P. G.; BARIGOU, M.; FRYER, P. J.; PAIN, J.-P.; PARKER, D. J. Using positron emission particle tracking (PEPT) to study nearly neutrally buoyant particles in high solid fraction pipe flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 27, n. 11, p. 1881–1901, 2001.

FALCONE, G.; HEWITT, G. F.; ALIMONTI, C. **Multiphase Flow Metering Principles and Applications**. 2009.

FAZALUL RAHIMAN, M. H. **Non-invasive imaging of liquid/gas flow using ultrasonic transmission-mode tomography**, 2005. Universiti Teknologi Malaysia.

FAZALUL RAHIMAN, M. H.; ABDUL RAHIM, R.; FAZALUL RAHIMAN, M. H.; TAJJUDIN, M. Ultrasonic Transmission-Mode Tomography Imaging for Liquid/Gas Two-Phase Flow. **IEEE Sensors Journal**, v. 6, n. 6, p. 1706–1715, 2006.

FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. **Teoria e Projeto para Medições Mecânicas**. 4 ed. ed. Rio de Janeiro: LTC editora., 2007.

FORDHAM, E. J.; RAMOS, R. T.; HOLMES, A.; et al. Multi-phase-fluid discrimination with local fibre-optical probes: III. Three-phase flows. **Measurement Science and Technology**, v. 10, n. 12, p. 1347–1352, 1999.

FRØYSTEIN, T.; KVANDAL, H.; AAKRE, H. Dual energy gamma tomography system for high pressure multiphase flow. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 16, n. 2-3, p. 99–112, 2005.

GAWAS, K. **Studies in Low-Liquid Loading in Gas/Oil/Water Three Phase Flow in Horizontal and Near Horizontal Pipes**, 2013. University of Tulsa.

GHORAI, S.; SURI, V.; NIGAM, K. D. P. Numerical modeling of three-phase stratified flow in pipes. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 23, p. 6637–6648, 2005.

GUO, B.; SONG, S.; CHACKO, J.; GHALAMBOR, A. **Offshore Pipelines**. 1st ed. Gulf Professional Publishing, 2005.

HALL, L. D. Roles for magnetic resonance imaging in process tomography. **IEEE Sensors Journal**, v. 5, n. 2, p. 125–133, 2005.

HAMPEL, U.; FISCHER, F. Ultra fast electron beam X-ray tomography and its application to multiphase flow measurement. **2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record**, p. 565–569, 2008. Ieee.

HAMPEL, U.; OTAHAL, J.; BODEN, S.; et al. Miniature conductivity wire-mesh sensor for gas-liquid two-phase flow measurement. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 20, n. 1, p. 15–21, 2009.

HAMPEL, U.; SPECK, M.; KOCH, D.; et al. Experimental ultra fast X-ray computed tomography with a linearly scanned electron beam source. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 16, n. 2-3, p. 65–72, 2005.

HILGEDICK, S.; VUTUKURY, J. N.; DONNELL, K. M. Application of open-ended coaxial probes for detection of sand production from petroleum wells. **2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings**, p. 675–680, 2014. Ieee.

HUANG, S.; ZHANG, B.; LU, J.; WANG, D. Study on flow pattern maps in hilly-terrain air–water–oil three-phase flows. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 47, p. 158–171, 2013.

ISHII, M.; KIM, S. Micro four-sensor probe measurement of interfacial area transport for bubbly flow in round pipes. **NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN**, v. 205, n. 1-2, p. 123–131, 2001.

JAWOREK, A.; KRUPA, A. Phase-shift detection for capacitance sensor measuring void fraction in two-phase flow. **Sensors and Actuators A-Physical**, v. 160, n. 1-2, p. 78–86, 2010.

JAWOREK, A.; KRUPA, A.; TRELA, M. Capacitance sensor for void fraction measurement in water/steam flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 15, n. 5-6, p. 317–324, 2004.

JIANG, L.; SONG, Y.; LIU, Y.; et al. Magnetic Resonance Imaging of CO₂/Water Two Phase Flow in Porous Media. **Energy Procedia**, v. 37, p. 6839–6845, 2013. Elsevier B.V.

JONG, C. C.; LAM, Y. Y. H.; NG, L. S. FPGAs Implementation of a Digital IQ Demodulator Using VHDL. In: W. Luk; P. K. Cheung; M. Glesner (Orgs.); **Field-Programmable Logic and Applications**, Lecture Notes in Computer Science. v. 1304, p.410–417, 1997. Springer Berlin / Heidelberg.

KHAIRI, M. T. M.; IBRAHIM, S.; YUNUS, M. A. M.; FARAMARZI, M. A REVIEW ON APPLICATIONS OF OPTICAL TOMOGRAPHY IN INDUSTRIAL PROCESS. **International Journal On Smart Sensing and Intelligent Systems**, v. 5, n. 4, p. 767–798, 2012.

KHOR, S. H.; MENDES-TATSIS, M. A.; HEWITT, G. F. One-dimensional modelling of phase holdups in three-phase stratified flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 23, n. 5, p. 885–897, 1997.

KICKHOFEL, J. L.; ZBORAY, R.; DAMSOHN, M.; et al. Cold neutron tomography of annular coolant flow in a double subchannel model of a boiling water reactor. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 651, n. 1, p. 297–304, 2011. Elsevier.

KURNIADI, D.; TRISNOBUDI, A. DETECTION AND MONITORING THE MULTI-PHASE FLOW USING ULTRASONIC WAVE VELOCITY TOMOGRAPHY. XVI IMEKO World Congress. **Anais...** . p.2–7, 2000.

LI, D.; WU, Y.; LI, Z.; ZHONG, X. Volumetric fraction measurement in oil-water-gas multiphase flow with dual energy gamma-ray system. **Journal of Zhejiang University SCIENCE**, v. 6A, n. 12, p. 1405–1411, 2005.

LI, D.; WU, Y.; WANG, K.; ZHONG, X. Volumetric Fraction Dynamic Measurement in Oil-Water-Gas Multiphase Horizontal Pipe Flow with Dual Energy Gamma-Ray. AIP Conference Proceedings. **Anais...** . v. 914, p.409–418, 2007. AIP.

LIU, X.; ZHONG, H.; LI, Y.; LI, Z.; WANG, Q. Experimental study of flow patterns and pressure drops of heavy oil-water-gas vertical flow. **Journal of Hydrodynamics, Ser. B**, v. 26, n. 4, p. 646–653, 2014. Publishing House for Journal of Hydrodynamics.

LLAMAS, J. D.; PÉRAT, C.; LESAGE, F.; et al. Wire mesh tomography applied to trickle beds: A new way to study liquid maldistribution. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 47, n. 9-10, p. 1765–1770, 2008.

LUIZ, L. C.; CRISPIM, V. R.; FERREIRA, F. J. O. Visualization of Two-Phase Flow in Metallic Pipes Using Neutron Radiographic Technique. **Physicae**, v. 9, n. 9, p. 19–23, 2010.

LUND BO, O.; NYFORS, E. Application of microwave spectroscopy for the detection of water fraction and water salinity in water/oil/gas pipe flow. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 305, n. 1-3, p. 345–353, 2002.

MAAD, R.; HJERTAKER, B. T.; JOHANSEN, G. A.; OLSEN, Ø. Dynamic characterization of a high speed gamma-ray tomograph. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 21, n. 4, p. 538–545, 2010. Elsevier Ltd.

MALLACH, M.; MUSCH, T. Ultra-Wideband Microwave Tomography: A Concept for Multiphase Flow Measurement. Microwave Conference (GeMIC). **Anais...** . p.10–13, 2014. Aachen, Germany.

MALLET, P.; GUÉRIN, C.; SENTENAC, A. Maxwell-Garnett mixing rule in the presence of multiple scattering: Derivation and accuracy. **Physical Review B**, v. 72, n. 1, p. 014205, 2005.

MANAN, M. R.; NAUFAL, M.; MANSOR, B.; et al. Quantifying Scheme for Detection Heterogeneous Phase in a Pipe Vessel. **International Journal of Research and Reviews in Artificial Intelligence**, v. 1, n. 1, 2011.

MARASHDEH, Q.; WARSITO, W.; FAN, L.-S.; TEIXEIRA, F. L. A Multimodal Tomography System Based on ECT Sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 7, p. 426–433, 2007.

MCCANN, H.; DAVIS, L. E. Quasi-three-dimensional method of moments for analyzing electromagnetic wave scattering in microwave tomography systems. **IEEE Sensors Journal**, v. 5, n. 2, p. 216–223, 2005.

MUJI, S.; RAHIM, R.; RAHIMAN, M.; et al. Optical tomography: a review on sensor array, projection arrangement and image reconstruction algorithm. **International Journal of Innovative Computing, Information and Control**, v. 7, n. 7A, p. 3839–3856, 2011.

NYFORS, E. Industrial Microwave Sensors - A Review. **Subsurface Sensing Technologies and Applications**, v. 1, n. 1, p. 23–43, 2000.

ODDIE, G.; SHI, H.; DURLOFSKY, L. J.; et al. Experimental study of two and three phase flows in large diameter inclined pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 29, n. 4, p. 527–558, 2003.

PARKER, D. J.; FAN, X. Positron emission particle tracking-Application and labelling techniques. **Particuology**, v. 6, p. 16–23, 2008.

PEYTON, A. J.; YU, Z. Z.; LYON, G.; et al. An overview of electromagnetic inductance tomography: Description of three different systems. **Measurement Science and Technology**, v. 7, p. 261–271, 1996.

PIELA, K.; DELFOS, R.; OOMS, G.; WESTERWEEL, J.; OLIEMANS, R. V. A. Phase inversion in the mixing zone between a water flow and an oil flow through a pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 35, n. 1, p. 91–95, 2009. Elsevier Ltd.

PIETRUSKE, H.; PRASSER, H.-M. Wire-mesh sensors for high-resolving two-phase flow studies at high pressures and temperatures. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 18, n. 2, p. 87–94, 2007.

POESIO, P.; STRAZZA, D.; SOTGIA, G. Very-viscous-oil/water/air flow through horizontal pipes: Pressure drop measurement and prediction. **Chemical Engineering Science**, v. 64, n. 6, p. 1136–1142, 2009.

POESIO, P.; STRAZZA, D.; SOTGIA, G. Two- and three-phase mixtures of highly-viscous-oil/water/air in a 50 mm i.d. pipe. **Applied Thermal Engineering**, v. 49, p. 41–47, 2012. Elsevier Ltd.

PRASSER, H.-M. Influence of the pipe diameter on the structure of the gas–liquid interface in a vertical two-phase pipe flow. Proceedings of the 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10). **Anais...**, 2003. Seoul, Korea.

PRASSER, H.-M. Novel experimental measuring techniques required to provide data for CFD validation. **NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN**, v. 238, n. 3, p. 744–770, 2008. ELSEVIER SCIENCE SA.

PRASSER, H.-M.; BÖTTGER, A.; ZSCHAU, J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 9, n. 2, p. 111–119, 1998. ELSEVIER SCI LTD.

PRASSER, H.-M.; KREPPER, E.; LUCAS, D. Evolution of the two-phase flow in a vertical tube-decomposition of gas fraction profiles according to bubble size classes using wire-mesh sensors. **INTERNATIONAL JOURNAL OF THERMAL SCIENCES**, v. 41, n. 1, p. 17–28, 2002. EDITIONS SCIENTIFIQUES MEDICALES ELSEVIER.

QIAN, Z.; JIAN, J.; ZHIHANG, L.; WULIANG, Y. A Dual Modality Mesh Sensor for Three Phase Flow Measurement. 6th World Congress on Industrial Process Tomography. **Anais...** . p.1520–1529, 2012.

RAHIM, R.; RAHIMAN, M.; ZAIN, R.; RAHIM, H. Image fusion of dual-modal Tomography (Electrical Capacitance and Optical) for solid/gas flow. **International Journal of Innovative Computing, Information and Control**, v. 7, n. 9, p. 5119–5132, 2011.

RASTEIRO, M. G.; SILVA, R.; GARCIA, F. A. P.; FAIA, P. Electrical Tomography: a review of Configurations and Applications to Particulate Processes. **KONA Powder and Particle Journal**, v. 29, p. 67–80, 2011.

DOS REIS, E.; DA SILVA CUNHA, D. EXPERIMENTAL STUDY ON DIFFERENT CONFIGURATIONS OF CAPACITIVE SENSORS FOR MEASURING THE VOLUMETRIC CONCENTRATION IN TWO-PHASE FLOWS. 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013). **Anais...** . v. 1, p.5130–5139, 2013. Ribeirão Preto.

RIAÑO, A. B.; BANNWART, A. C.; RODRIGUEZ, O. M. H. Holdup estimation in core flow using image processing. 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). **Anais...** . p.334–338, 2013. Minneapolis, MN: IEEE.

RICHTER, S.; ARITOMI, M.; PRASSER, H.-M.; HAMPEL, R. Approach towards spatial phase reconstruction in transient bubbly flow using a wire-mesh sensor. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 45, n. 5, p. 1063–1075, 2002.

ROCHA, M. S.; CABRAL, E. L. L.; SIMOES-MOREIRA, J. R. CAPACITANCE SENSOR FOR VOID FRACTION MEASUREMENT IN. 2009 International Nuclear Atlantic Conference. **Anais...** , 2009. Rio de Janeiro,RJ, Brazil.

RODRIGUEZ, I. H. **Estudo do fenômeno de redução de atrito em escoamento disperso óleo - água em tubulação horizontal. Master Thesis.**, 2009. Universidade de São Paulo.

RODRIGUEZ, I. H. **Estudo Experimental e Modelagem do Escoamento de Emulsão Inversa em Tubulações**, 2014. Universidade de Sao Paulo.

RODRIGUEZ, I. H.; B.YAMAGUTI, H. K.; DE CASTRO, M. S.; DA SILVA, M. J.; RODRIGUEZ, O. M. H. Drag reduction phenomenon in viscous oil-water dispersed pipe flow: Experimental investigation and phenomenological modeling. **AIChE Journal**, v. 58, n. 9, p. 2900–2910, 2012.

RODRIGUEZ, I. H.; VELASCO PEÑA, H. F.; BONILLA RIAÑO, A.; HENKES, R. A. W. M.; RODRIGUEZ, O. M. H. Experiments with a Wire-Mesh Sensor for Stratified and Dispersed Oil-Brine Pipe Flow. **International Journal of Multiphase Flow**, 2015.

RODRIGUEZ, I. H.; YAMAGUTI, H. K. B.; DE CASTRO, M. S.; DA SILVA, M. J.; RODRIGUEZ, O. M. H. Slip ratio in dispersed viscous oil-water pipe flow. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 35, n. 1, p. 11–19, 2011.

RODRIGUEZ, I.; VELASCO PEÑA, H. F.; RODRIGUEZ, O. M.; BONILLA RIAÑO, A. Capacitive wire-mesh sensor measurements in oil- water flow. Future of Instrumentation International Conference. **Anais...** , 2013. Orlando, FL, USA.

RODRIGUEZ, O. M. H.; BALDANI, L. S. Prediction of pressure gradient and holdup in wavy stratified liquid–liquid inclined pipe flow. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 96-97, p. 140–151, 2012. Elsevier.

RODRIGUEZ, O. M. H.; OLIEMANS, R. V. A. Experimental study on oil-water flow in horizontal and slightly inclined pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 32, n. 3, p. 323–343, 2006.

ROITBERG, E.; SHEMER, L.; BARNEA, D. Measurements of cross-sectional instantaneous phase distribution in gas-liquid pipe flow. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 31, n. 8, p. 867–875, 2007.

SAITO, Y.; MISHIMA, K.; TOBITA, Y.; SUZUKI, T.; MATSUBAYASHI, M. Measurements of liquid–metal two-phase flow by using neutron radiography and electrical conductivity probe. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 29, n. 3, p. 323–330, 2005.

SANAULLAH, K.; ZAIDI, S. H.; HILLS, J. H. A study of bubbly flow using resistivity probes in a novel configuration. **CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL**, v. 83, n. 1, p. 45–53, 2001.

DOS SANTOS, E. N. **Técnicas para extração de parâmetros de escoamentos bifásicos em regime intermitente utilizando o sensor wire-mesh (Master Thesis)**, 2011. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ.

DOS SANTOS, E. N.; DA SILVA, M. J.; MORALES, R. E. M.; et al. Dual-modality Impedance Wire-Mesh Sensor for Investigation of Multiphase Flows. IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques. **Anais...** . p.316–319, 2014.

DOS SANTOS, E. N.; VENDRUSCOLO, T. P.; MORALES, R. E. M.; SILVA, M. J. DA. Data fusion for dual-modality wire-mesh sensor. 7th World Congress on Industrial Process Tomography. **Anais...** . p.2–5, 2013.

SCHLEICHER, E.; DA SILVA, M. J.; THIELE, S.; et al. Design of an optical tomograph for the investigation of single- and two-phase pipe flows. **MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY**, v. 19, n. 9, 2008.

SCHUBERT, M.; KHETAN, A.; DA SILVA, M. J.; KRYK, H. Spatially resolved inline measurement of liquid velocity in trickle bed reactors. **CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL**, v. 158, n. 3, p. 623–632, 2010.

SEMENOV, S. Microwave tomography: review of the progress towards clinical applications. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 367, n. 1900, p. 3021–42, 2009.

SHEAN, A. R. **Pressure drop and phase fraction in oil-water-air vertical pipe flow. Master Thesis.**, 1976. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.

SIHVOLA, A. **Electromagnetic Mixing Formulas and Applications**. The Institution of Engineering and Technology, Michael Faraday House, Six Hills Way, Stevenage SG1 2AY, UK: IET, 1999.

DA SILVA, M. J. **Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging. Doctoral Thesis**. TUDpress, 2008.

DA SILVA, M. J.; HAMPEL, U. Capacitance wire-mesh sensor applied for the visualization of three-phase gas–liquid–liquid flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 34, p. 113–117, 2013. Elsevier.

DA SILVA, M. J.; DOS SANTOS, E. N.; HAMPEL, U.; RODRIGUEZ, I. H.; RODRIGUEZ, O. M. H. Phase fraction distribution measurement of oil–water flow using a capacitance wire-mesh sensor. **Measurement Science and Technology**, v. 22, n. 10, p. 9, 2011.

DA SILVA, M. J.; DOS SANTOS, E. N.; VENDRUSCOLO, T. P. High-speed multichannel impedance measuring system. **ACTA IMEKO. Anais...** . v. 1, p.36–41, 2012.

DA SILVA, M. J.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. A novel needle probe based on high-speed complex permittivity measurements for investigation of dynamic fluid flows. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 56, n. 4, p. 1249–1256, 2007a.

DA SILVA, M. J.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. Novel wire-mesh sensor for the investigation of non-conducting fluids. 6th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2007. **Anais...** , 2007b.

DA SILVA, M. J.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. Capacitance wire-mesh sensor for fast measurement of phase fraction distributions. **MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY**, v. 18, n. 7, p. 2245–2251, 2007.

DA SILVA, M. J.; THIELE, S.; HOEHNE, T.; VAIBAR, R.; HAMPEL, U. Experimental studies and CFD calculations for buoyancy driven mixing phenomena. **NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN**, v. 240, n. 9, p. 2185–2193, 2010.

DA SILVA, M. J.; THIELE, S.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. Wire-Mesh Sensors for High-Resolution Gas-Liquid Multiphase Flow Visualization. Proceedings of COBEM 2009; 20th International Congress of Mechanical Engineering. **Anais...** , 2009.

SPEDDING, P. L.; DONNELLY, G. F.; COLE, J. S. Three Phase Oil-Water-Gas Horizontal Co-Current Flow. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 83, n. 4, p. 401–411, 2005.

SPEDDING, P. L.; WOODS, G. S.; COOPER, R. K.; WATTERSON, J. K. Holdup and Pressure Drop in Vertical and Near-Vertical Three-Phase Up-Flow: A Collection of Flow Regimes. **Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing**, v. 10, n. 1-2, p. 197–219, 2002.

TAITEL, Y.; BARNEA, D.; BRILL, J. P. Stratified three phase flow in pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 21, n. 1, p. 53–60, 1995.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, 1976.

THORN, R.; JOHANSEN, G. A.; HJERTAKER, B. T. Three-phase flow measurement in the petroleum industry. **Measurement Science and Technology**, v. 24, n. 1, p. 012003, 2013.

VELASCO, H. F.; RODRIGUEZ, O. M. H. Applications of Wire-Mesh Tomography in Multiphase Flows. **Flow Measurement and Instrumentation**.

VENDRUSCOLO, T. P. **SENSOR WIRE-MESH DE IMPEDÂNCIA PARA INVESTIGAÇÃO ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS**, 2012. Universidad Tecnológica Federal de Paraná.

VENDRUSCOLO, T. P.; ZIBETTI, M. V. W.; PATYK, R. L.; et al. Development of NIR optical tomography system for the investigation of two-phase flows. **I2MTC2014**, p. 1576–1579, 2014.

WANG, S.; ZHANG, H.-Q.; SARICA, C.; PEREYRA, E. Experimental Study of High-Viscosity Oil/Water/Gas Three-Phase Flow in Horizontal and Upward Vertical Pipes. **SPE Production & Operations**, , n. August, p. 306–316, 2013.

WANGJIRANIRAN, W. **Study on multi-dimensional characteristics of two-phase flow using wire mesh tomography. Doctoral Thesis**, 2004. Tokyo Institute of Technology.

WEGMANN, A.; MELKE, J.; RUDOLF VON ROHR, P. Three phase liquid–liquid–gas flows in 5.6mm and 7mm inner diameter pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 33, n. 5, p. 484–497, 2007.

WU, Z.; MCCANN, H.; DAVIS, L. E.; et al. Microwave-tomographic system for oil- and gas-multiphase-flow imaging. **Measurement Science and Technology**, v. 20, n. 10, 2009.

WU, Z.; MCCANN, H.; DAVIS, L. E.; et al. Investigation of a Microwave Tomographic System for Oil and Gas Multiphase Flow Imaging. 6th World Congress on Industrial Process Tomography. **Anais...** . p.1249–1259, 2010. Beijing, China.

XU, J.; ZHANG, J.; LIU, H.; WU, Y. Oil–gas–water three-phase upward flow through a vertical pipe: Influence of gas injection on the pressure gradient. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 46, p. 1–8, 2012. Elsevier Ltd.

YANG, W. Design of electrical capacitance tomography sensors. **Measurement Science and Technology**, v. 21, n. 4, p. 042001, 2010.

YANG, W. Q.; PENG, L. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography. **Measurement Science and Technology**, v. 14, p. R1–R13, 2003.

YE, J.; PENG, L.; WANG, W.; ZHOU, W. Optimization of Helical Capacitance Sensor for Void Fraction Measurement of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Small Diameter Tube. **IEEE Sensors Journal**, v. 11, n. 10, p. 2189–2196, 2011.

ZAIN, R. M.; RAHIM, R. A.; FAZALUL RAHIMAN, M. H.; ABDULLAH, J. Simulation of image fusion of dual modality (electrical capacitance and optical tomography) in solid/gas flow. **Sensing and Imaging**, v. 11, p. 33–50, 2010.

ZHANG, H.-Q.; SARICA, C. Unified Modeling of Gas/Oil/Water Pipe Flow - Basic Approaches and Preliminary Validation. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. **Anais...**, 2005.

Three-Phase Flow Tomography System in Upward-Vertical High-Viscous-Oil/Water/Gas Flow

Hugo Fernando Velasco-Peña[✉], Senior Member, IEEE, Adriana Bonilla-Riaño[✉], Carlos Marlon Santos[✉],
and Oscar M. H. Rodriguez[✉]

Abstract—A new three-phase flow tomography system is presented in this work. The system was developed to be applied in high-viscous-oil/water/gas flow arranged in different flow patterns, with the three fluids present simultaneously in a crossing point. The primary measurement is based on a simpler and reliable digital in-phase/quadrature (IQ) demodulator and a wire-mesh sensor (WMS), but the system is capable of including different types of primary measurements. Dynamic three-phase flow tests were carried out to verify the system performance and compare its results with the ones obtained by quick-closing valves (QCVs) and a high-speed video camera. *In situ* volumetric fractions and flow patterns were compared. The experiments were conducted in a vertical glass pipe of 50-mm i.d. and 12-m height. The observed three-phase flow patterns were water-continuous churn flow with dispersed bubbles and oil drops (WChBoDo), water-continuous slug flow with Taylor bubbles, spherical bubbles, and oil drops (WPiBoDo), and oil-continuous slug flow with Taylor bubbles, spherical bubbles, and water drops (OPiBoDi). Compared with the measurements using QCVs, the average relative errors of the measured volumetric phase fractions were 12% for water, 13% for air, and 22% for oil. The experimental results, including the details of the flow inside the pipe, the phase distributions, and the objective characterization of flow patterns, suggest that the proposed system is a promising option for three-phase flow-related studies and developments. The proposed technique can reach 8930 frames/s with a 16 × 16 WMS.

Index Terms—Flow patterns, impedance measurement, three-phase flow, tomography, wire-mesh.

I. INTRODUCTION

OIL–WATER–GAS flow is frequently found in the energy industry. For instance, in the production stage, gas and oil reservoirs can include water naturally in wells, risers,

or pipelines. In addition, some artificial lift techniques apply gas or water injection to enhance the production of heavy oils. Finally, thermodynamic alterations of the flow properties, especially due to decompression and heat transfer, can result in the hydrocarbons' phase change from liquid to a gaseous state. Therefore, the study of three-phase flow is essential to optimize oil and gas recovery and transport. This is even more important considering the current world production scenario, where unconventional oil is becoming more and more attractive [1].

Hence, by Huang *et al.* [2], experiments were carried out to obtain three-phase flow pattern maps in hilly terrain. Additionally, the authors studied flow-pattern transitions, pressure drop, and methods for the extraction and transport of heavy oil. Hanafizadeh *et al.* [3] determined flow patterns of air–water–oil flow in pipes with different inclinations. This classification was made by visual inspection of images taken laterally. Gawas [4] studied the entrainment of water and oil droplets in a dominant gaseous phase. In [5], the three-phase pressure drop is compared with the two-phase pressure drop in similar flow patterns. Liu *et al.* [6] proposed a new method to calculate the frictional pressure gradient in vertical flows. Three-phase flow patterns were identified via conductance signals by Xie *et al.* [7], where the features of the oil–gas–water flow signals were obtained by multiscale analysis method, and a parameter was proposed to identify the current flow pattern in the pipe. Al-Hadhrani *et al.* [8] studied the effect of water cut, liquid, and gas velocities on flow patterns and pressure gradients in horizontal pipes, offering detailed flow maps. Oddie *et al.* [9] presented flow-pattern and pressure-gradient data as well, but at different inclinations, and studied transient flows. In most of these works only basic and global variables, such as pressure drop, volumetric fraction, or the water layer height were measured. Also, frequently the authors show lateral images of the flow patterns obtained by high-speed cameras (HSCs). Remarkably, these images are complemented by the author's hand-made plots of the phases' distribution. Moreover, those types of plots were used to represent the longitudinal or cross-sectional distributions and no quantitative results were obtained. Zhao *et al.* [10] proposed a method based on microwaves, time series, and neural networks to predict the water-to-liquid ratio. It is clear from the literature review that in recent years there is a renewed interest in the study of three-phase flow [11], [12]. Therefore, the review of Yacub *et al.* [11], about gas–oil–water experiments, shows six (between 80 works) including viscous oil in their title, reaching up to 300 mPa·s. In this section, the reviewers mention seven

Manuscript received October 9, 2021; revised January 18, 2022; accepted February 14, 2022. Date of publication March 4, 2022; date of current version March 22, 2022. This work was supported in part by PETROBRAS through the project “Comparação entre Métodos de Elevação Artificial para Óleos Viscosos com Gás” under Grant 0050.0082074.13.9 and in part by CNPq “Bolsa de produtividade” under Grant 311057/2020-9. The Associate Editor coordinating the review process was Yixin Ma. (Corresponding author: Hugo Fernando Velasco-Peña.)

Hugo Fernando Velasco-Peña is with the Electrical Engineering Program, Universidad de La Salle, Bogotá 111711, Colombia (e-mail: hvelasco@lasalle.edu.co).

Adriana Bonilla-Riaño is with the Engineering School, Universidad de La Salle, Bogotá 111711, Colombia (e-mail: abonillar@gmail.com).

Carlos Marlon Santos is with the Industrial Multiphase Flow Laboratory, University of São Paulo, São Paulo 13566-590, Brazil (e-mail: carlosmarlon@alumni.usp.br).

Oscar M. H. Rodriguez is with the Mechanical Engineering Department, University of São Paulo, São Paulo 13566-590, Brazil (e-mail: oscarmhr@sc.usp.br).

Digital Object Identifier 10.1109/TIM.2022.3156990

1557-9662 © 2022 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.
See <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html> for more information.

works with their viscosity: six with viscosities between 1.2 and 11.98 mPa·s, and only one with 102 mPa·s. This shows that there are few experiments with viscous oil.

Until now, the work on three-phase flows with wire-mesh sensors uses flow patterns with restrictions that simplified the problem. For instance, in [13] and [14], they used stratified patterns, so at each crossing point, there was only a two-phase problem. Other works are limited to low oil volumetric fraction [15]. There are three laboratories using oil: multiphase flow laboratory (Nottingham University), which uses silicone oil with a viscosity of 5.3 mPa·s [14]; multiphase flow laboratory (Tianjin University), which uses oil with a viscosity of 3.5 mPa·s [15]; and thermal-fluids engineering laboratory (University of Sao Paulo), which uses oil with a viscosity up to 204 mPa·s [16] (this work used the last laboratory). According to the literature review, only one laboratory performs experiments with viscous oil and wire-mesh sensor (WMS).

A. Tomographic Flow Imaging

A tomographic image is a 2-D representation of a slice through an object. This kind of representation of flow-through imaging has been used for multiphase flow studies in many works [17]–[19]. Particularly, some authors have developed specialized systems for the three-phase flow case. Frøystein *et al.* [20] developed a dual-energy gamma-ray tomography system applied on simulated static three-phase flows. That system could deliver a low-contrast image every 2 s. Schug and Arlt [21] used a fast X-ray computed tomography to obtain the image of a two-phase flow in structured packings. Appel *et al.* [22] used magnetic resonance (MR) to measure the velocity and phase fractions. However, those authors did not present the obtained tomographic images. Alfareh *et al.* [23] studied theoretically an ultrasonic sensor array using the finite element method for the case of three-phase distributions (in static experiments). Their results were promising, but they need to be verified experimentally. Electrical capacitance tomography (ECT) has been used in annular three-phase flows by Li *et al.* [24]. The authors used ECT to obtain images, the water–liquid ratio, and the liquid ratio. Wang *et al.* [25] designed an electrical resistance tomography (ERT)/ECT system to measure simultaneously the resistance and the capacitance, but it was only tested with simulated two-phase flows. Sun and Yang [26] presented a dual ERT/ECT for getting tomographic images in stratified oil–water–air distributions, but the system was not tested with the phases flowing. Another ERT/ECT system was used to visualize oil–water–air flows. Wang *et al.* [27] could establish the water and oil ratios, and the ERT/ECT gave better results than optical methods or ERT or ECT, used separately, to measure the mean concentration of the phases. However, Hernandez-Alvarado *et al.* [28] indicate that ERT is the least reliable method among wire-mesh tomography (WMT), optical void probe, and pressure transducers, with gamma densitometry as a reference, because it can under-predict local void fraction up to 40% and area average fractions up to 60%, depending on the conditions of the experiment. For the case of techniques with ionizing radiation, such as gamma-ray tomography, then stallation is expensive and demanding

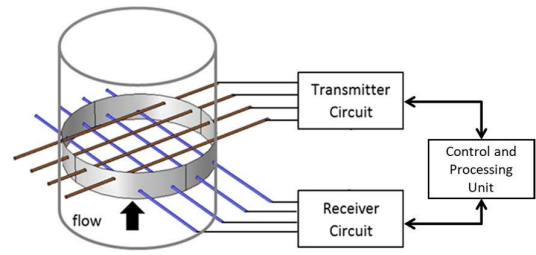


Fig. 1. Schematic representation of the wire-mesh sensor, with its location in a pipe.

due to safety requirements instituted to prevent health risks. The current techniques based on MR have a low temporal resolution, which is a severe disadvantage when studying transient flows. The ERT/ECT techniques overcome the cited disadvantage, but give low-resolution images, requiring back-propagation algorithms to reconstruct the image, and have limitations depending on the type of flow pattern.

On the other hand, the technique called WMT has been applied to multiphase flows successfully, in different applications and geometries, at a low cost. Several studies have compared WMT with other techniques. Dave *et al.* [29] summarize the comparisons, showing how this technique, despite being intrusive, can obtain the flow structure (compared to cameras), has good agreement with void fractions and gas velocity profile. (compared to X-ray tomography and gamma densitometry) and the interfacial area density measurements have good agreement (with a maximum deviation of 12% compared to needle probes). Also, Hernandez-Alvarado *et al.* [28] find that WMT gives differences of up to 5% for the local void fraction and area average void fractions, compared with gamma densitometry. In this work, we developed and implemented a WMT to work with high-viscous-oil/water/air flows.

A typical wire-mesh sensor is formed by two separated planes of wires. One plane has the transmitters and the other the receivers. The wires of each plane are positioned perpendicularly to the other plane, thereby forming a mesh of electrodes. In three-phase flow, each electrode or crossing point between wires measures the complex permittivity of the fluid's mixture, which is equivalent to measuring the electrical resistance and capacitance, simultaneously. In Fig. 1, the schematic of a 4×4 prototype can be observed. The spaces between the electrodes, at the crossing points, are filled with a mixture of fluids. Each transmitter wire (red) is activated in sequence and sends an electrical signal through the fluid. So, each receiver wire (blue) carries a signal containing the information to identify the characteristics of the fluids present at each crossing point. Nonactive transmitters are grounded. When the last transmitter wire has been activated, a full dataset of the type of fluid or phase fractions over the entire cross section is obtained. From this information, it is possible to obtain local mean fractions across the pipe's cross section, time, phase distributions along the section, *in situ* volumetric fraction, and 3-D images of the flow.

The WMT was first described by Johnson [30] as a sensor for measuring the fraction of water in oil, based on fluid conductivity/resistance. Most of the applications focused on gas-liquid flows [31]. Da Silva *et al.* [32] developed a WMS

based on the measuring of the permittivity/capacitance of the fluids, which expanded the range of substances that can be identified. An extensive review of this technology is found by Velasco Peña and Rodriguez [33]. Overall, the sensor is intrusive. It means that the sensor or part of it is located in the flow path affecting the measurement to some degree. Even so, the technique can deliver a tomographic image with a good benefit–cost ratio, compared to other tomographic techniques such as X- or γ -rays.

The first attempt to use the wire-mesh sensor in oil–water–air flow was presented by da Silva [34]. He applied the capacitive wire mesh in a confined stratified system. Even though the three-phase system could be agitated, after some time the gravitational stratification of the phases assured that each measuring point would only discriminate between two phases. Therefore, the technique was limited to stratified flow patterns. Differently, in other works, two independent variables were measured; for instance: dos Santos *et al.* [35] and dos Santos [36] measured the changes of amplitude and the phase shift of a single-frequency sinusoidal signal. The authors showed the measurements in two different figures, without establishing any relation with the fraction of each phase. Due to the electrical circuits used, it was necessary to use two analog-to-digital converter (ADC) by each receiver wire. dos Santos *et al.* [13] applied two frequencies simultaneously, one of a relatively low frequency (75 kHz) and another of high frequency (1.825 MHz), to measure the conductivity and the permittivity, respectively. The phase fraction was determined by the mean of the Maxwell–Garnett permittivity relation. The system reached 781 frames/s with an 8×8 sensor. In both works, the sensor results were validated through tests carried out in small confined systems. They filled up a pipe segment with fluids, forming a stratified pattern, and simulated a flow by agitating the system.

In this work, we contribute to the development of the WMT technology by proposing a high-speed system to measure simultaneously both the conductivity and the permittivity of a mixture of three fluids. Dynamic flow tests in a large-scale multiphase-flow loop were carried out for that purpose. The proposed WMT applies a single-frequency sinusoidal signal to the fluid mixture and the measurement is done by IQ demodulator. The generator and the ADC's of the system are synchronized which allows a full-digital implementation of the demodulator. In addition, the processing system proposed in the present work is simpler and was implemented using the digital approach which means it has fewer analog circuits than those within other similar works [14].

II. MATERIAL AND METHODS

A. Experimental Setup

The experiments reported in this article were performed in the vertical loop of the Industrial Multiphase Flow Laboratory (LEMI) of the São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, Brazil. The test section consisted of a glass line of 50 mm i.d. and 12 m in length. A bypass line allowed the use of the quick-closing-valve (QCV) technique to measure the *in situ* volumetric fraction of the phases. The tested liquid fluids, water, and high viscous oil (860 kg/m³ of

TABLE I
FLOWMETER INSTRUMENTATION ON THE EXPERIMENTAL APPARATUS

Flowmeter	Measuring principle	Application	Flow range (l/min)	Uncertain (% do FS)
Badgermeter® OGT HF1/2"	Gear	Water flowmeter	1.00 – 35.00	±0.75
TechMeter TCM37BBEA10R	Turbine	Water flowmeter	31.60 – 333.40	±1.0
Oval® Ex – Delta	Gear	Water flowmeter	16.60 – 1667.00	± 1.0
Oval M-III LSF45-L	Gear	Oil flowmeter	0.05 – 8.00	± 1.0
Oval® Flowpet LS5376-430A EG	Gear	Oil flowmeter	2.50 – 106.70	± 1.0
Oval® Flowpet LS5576-430A EG	Gear	Oil flowmeter	6.67 – 233.40	± 1.0
Oval Gal – 50	Gear	Air flowmeter	4.00 – 20.00	± 1.0
Contech®- G9	Turbine	Air flowmeter	14.17 – 141 - 70	± 1.0
Contech®- G25	Turbine	Air flowmeter	141.70 – 1417.0	± 1.0
Contech®- G50	Turbine	Air flowmeter	566.8 – 5667.8	± 1.0

TABLE II
EXPERIMENTAL UNCERTAINTIES

Parameter	Uncertainty
Test section length	±5 mm
j_w	±1.0%
j_o	±0.5%
j_a	±1.3%
$\alpha_{a,QCV}$	±3.9%
$\alpha_{o,QCV}$	±3.0%
$\alpha_{w,QCV}$	±1.0%

TABLE III
FLUIDS' ELECTRICAL PROPERTIES

Fluid	Conductivity [S/m] σ	Relative Permittivity [.] ϵ
Air	1×10^{-15}	1.00
Oil	40×10^{-12}	3.5
Water	5×10^{-3}	80

density and 100 mPa·s of viscosity) were kept in polyethylene tanks. The air was stored in a pressurized tank. A compressor filled the air tank. Positive displacement water and oil pumps, both controlled by their respective variable-frequency drivers and pumped the phases to the test line. The airflow was controlled by electromechanical valves. Oil, water, and air were mixed at ground level at the beginning of the test section. Positive displacement and vortex flow meters were used to measure the flow rates of the fluids (see Table I).

The uncertainty analysis was made based on the accuracy of each equipment and uncertainty propagation theory. In Table II, the experimental uncertainties of the main parameters of this work are detailed.

After the test section, the liquids were separated from the air. Next, the oil–water mixture flowed to a coalescent-plate liquids separator tank, where gravitational separation of the two liquids was assured. Once separated, oil and water were returned to their respective tanks by gravity. The fluids' electrical features are presented in Table III.

B. Measurement System

The block diagram of the proposed measurement system is shown in Fig. 2. The measurement system heart consists of a signal generator and a data acquisition system based on an FPGA FlexRIO platform from National Instruments. The control is made by an FPGA board that synchronizes the

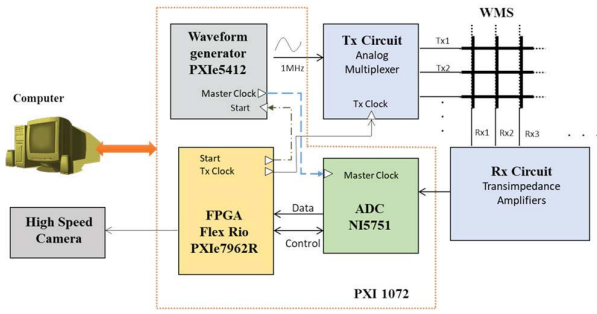


Fig. 2. Block diagram of the proposed measurement system.

operation between the generator, the data acquisition board, and the HSC.

The excitation signal (sine wave @ 1 MHz) is generated using an arbitrary signal generator PXIe-5412 and applied to the fluids through the transmitter (Tx) circuit, which is based on an analog multiplexer. Thus, this sinusoidal signal is applied to every transmitter wire (Tx1, Tx2, ..., Tx16), one wire at one time. Once the entire set of transmitters has been activated, the measurement system gets one frame with the phase fraction data, as in the images in Fig. 9.

The sine wave is modified by the properties of the fluid and recovered by the receiver (Rx) circuit. It consists of transimpedance amplifiers. The analog-to-digital conversion is made using the ADC modules in the NI-5751 board. It has 16 acquisition channels with 50 MS/s each one, 14-bit resolution, the voltage range of $2V_{pp}$, 50Ω , and dc coupling. The receiver circuit has been specially designed to ensure compatibility with this board, as well as its protection. Finally, longitudinal images are taken using an HSC. An image is recorded at the same time as a frame of the measurement system.

The fluid properties are measured based on a proposed digital in-phase/quadrature (IQ) demodulator, based on the synchronization between the FPGA NI PXIe7962R, the signal generator NI PXIe-5412, and the ADC NI 5751, see details in Section II-D.

The settling time of all circuits (transmitter, WMS, and receiver) was not greater than $5.5 \mu s$. For safety, the samples were only obtained after $6 \mu s$. On the other hand, to obtain a measurement of the complex permittivity, it is necessary to obtain at least one full cycle of the excitation signal, which is $1 \mu s$. Hence, the system can get a complete frame of the cross section sweeping the 16 transmitter wires, this corresponds to $16 \times (6 + 1) \mu s = 112 \mu s$ or 8930 frames/s. It enables the system to be used to study transient flow phenomena and/or systems with very fast changes.

The implemented technique can generate approximately 243 MB/s and store around 17 min, in a 256-GB solid-state drive (SSD). The system can support transfer rates up to 950 MB/s, a limitation created by the maximum rate that supported the PXIe-7962R board. Several PXIe-7962R boards could be used to expand the system, to reach up to 3.2 GB/s, which is the maximum rate supported by the link to the PC (the communication board PCIe-PXIe-8381). The PC has a controller based on the Intel X79 architecture. This allows

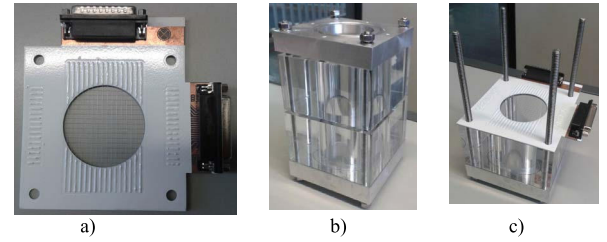


Fig. 3. (a) Homemade wire-mesh sensor (16×16 wires). (b) Acrylic box. (c) Wire-mesh sensor placed in between the two halves of the acrylic box.

for supporting the theoretical maximum transfer rate directly to the RAM, achieving storage up to 56 GB of data, which equates to 59 s of experimental data. Although the implemented technique underuses the capacity of the system, it is possible to reach higher rates; especially if the settling time is improved. Besides, the flexibility of the designed system allows it to be adapted to other measurement techniques or the number of crossing points of the sensors can be expanded.

A homemade wire-mesh sensor was used to obtain the phase-fraction distributions and cross-sectional images of the flow [see Fig. 3(a)]. The sensor consisted of two cross-sectional planes made of 16 stainless steel wires of 0.1-mm diameter, the planes are separated by 1.4 mm, and there is 3 mm of distance between wires in the same plane. The design of the sensor obeys restrictions for its construction and sensitivity analysis made by da Silva [34], Prasser and Häfeli [37], and Zhang *et al.* [38]. Hence, the diameter of the wires (0.1 mm) was chosen in such a way that it would provide the least intrusiveness, but keep the wire stretched with the used welding method. Also, from an electrical point of view, the diameter has little effect on the sensitivity of each crossing point. The distance between planes must be as short as possible, in such a way that each crossing point is only sensitive to the electrical characteristics around it, avoiding crosstalk with neighboring points, so this distance is imposed by the plate on which the sensor was manufactured (1.4 mm). The distance between wires must take into account that the highest possible spatial resolution is reached and that crosstalk is minimized. The first condition allows the flow structures to be reconstructed in more detail. The second condition leads to having a distance between wires at least two times the distance between planes, that is $> 2.8 \text{ mm}$ (3 mm was chosen). Sensor lifetime is estimated at 16 h of experiments. The sensor was installed at 10.3 m from the tube entrance, between the two halves of a perspex visualization section and the QCVs. A lateral view of the flow was recorded using an Olympus i-Speed 3.

In Fig. 3, one can see the acrylic box used for visualization purposes [see Fig. 3(b)], the wire-mesh sensor placed in between the two halves of the acrylic box [see Fig. 3(c)], and the system installed in the test section (see Fig. 4). The acrylic pieces make it possible to visualize the upstream and downstream flow. The aluminum sections allow the flange to be attached to the piping. The sensor was placed in the pipe at 5.5 m downstream of the injection nozzle and 1 m downstream of the start of the test section.

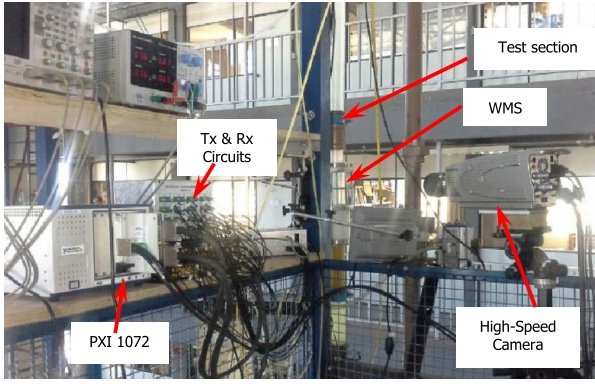


Fig. 4. Picture of the installed system in the test section.

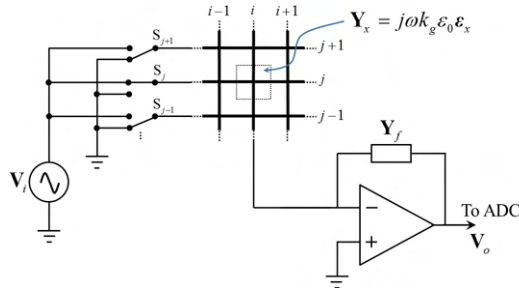


Fig. 5. General circuit diagram for measurement of complex permittivity using a wire-mesh sensor.

C. Measurement Principle

An inverting amplifier circuit is used to sense the electrical admittance of the fluid. Fig. 5 shows a general diagram of the implemented circuit. In Fig. 5, $\mathbf{Y}_f$ and $\mathbf{Y}_x$ are the feedback and fluid admittance, respectively, $\mathbf{V}_i$ is the excitation signal and $\mathbf{V}_o$ is the output signal. This circuit has a voltage gain defined by

$$\mathbf{A}_v = \frac{\mathbf{V}_o}{\mathbf{V}_i} = -\frac{\mathbf{Y}_x}{\mathbf{Y}_f}. \quad (1)$$

The electric current passing through the fluids at each crossing point travels by each receiver wire and arrives at the transimpedance amplifier. This amplifier has two essential features for the proper operation of the WMT technique. The first is that it is possible to adjust the input impedance to be significantly lower than the fluid impedance. The second is creating a virtual ground at the receiver wires. Thus, the currents that each amplifier receives are unambiguously related to the corresponding relative complex permittivity of the fluids ϵ_x at the crossing point. This can be expressed, for frequencies lower than 100's MHz, as

$$\epsilon_x = \epsilon - \frac{j\sigma}{(\epsilon_0\omega)} \quad (2)$$

where ϵ is the relative fluid permittivity or dielectric constant, σ is the fluid conductivity, ϵ_0 is the permittivity of free space and ω is the angular frequency. The relation between the fluid admittance $\mathbf{Y}_x$ and the complex fluid permittivity ϵ_x is given by

$$\mathbf{Y}_x = j\omega k_g \epsilon_0 \epsilon_x \quad (3)$$

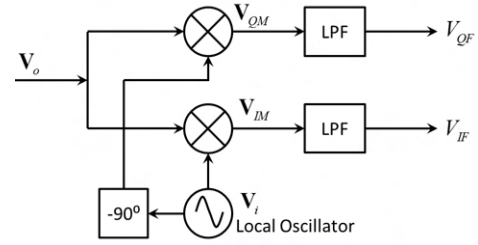
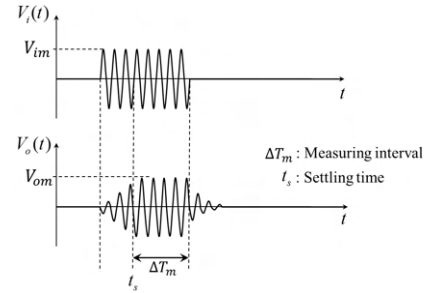


Fig. 6. Block diagram of an IQ demodulator.

Fig. 7. Signals of excitation $V_i(t)$ and response $V_o(t)$ for the inverting amplifier circuit. The measure is done during the measuring interval ΔT_m .

where k_g is a constant related to the geometry of the sensor. Thus, the voltage gain is related to the complex fluid permittivity by

$$\mathbf{A}_v = -\frac{j\omega k_g \epsilon_0 \epsilon_x}{\mathbf{Y}_f}. \quad (4)$$

In conclusion, in an ideal case, there is a proportional relation between $\mathbf{A}_v$ and ϵ_x . In addition, knowing the voltage gain, it is possible to determine the complex fluid permittivity.

D. Measurement of the Fluid Admittance

The fluid admittance is measured through the IQ demodulator circuit, illustrated in Fig. 6. In this diagram, the response (output) signal of the inverting amplifier circuit $\mathbf{V}_o = V_{om} \cos(\omega_o t + \theta)$ is compared with the excitation signal $\mathbf{V}_i = V_{im} \cos(\omega_i t)$. The response of the circuit after each change of a transmitter wire looks similar to the one shown in Fig. 7. After a settling time (t_s), it is possible to compare the differences between amplitudes and phases to determine the fluid admittance.

In case that the two signals (excitation and response) have the same frequency, $\omega_i = \omega_o$, the outputs of the IQ demodulator are given by two constant dc voltages

$$V_{IF} = \frac{V_{im} V_{om} \cos(\theta)}{2} \quad (5)$$

$$V_{QF} = -\frac{V_{im} V_{om} \sin(\theta)}{2}. \quad (6)$$

Then, V_{om} and θ can be written as

$$V_{om} = 2 \cdot \sqrt{V_{IF}^2 + V_{QF}^2} / V_{im} \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(-\frac{V_{QF}}{V_{IF}} \right). \quad (8)$$

The assumption that the two signals are the same is reasonable because the fluid admittance is considered linear and the time is considered invariable during the measuring time, ΔT_m . Thus, it is possible to recover the fluid admittance. The calibration process in Section II-E explains how to obtain this admittance.

In this methodology, the excitation signal is typically monitored using one of the available ADC channels. This implies having a channel less to the WMS and having a lower resolution or adding another ADC channel. Also, two ADC channels are typically used to sample the IQ signals by each receiver wire (Rx1, Rx2, ..., Rx16). To avoid this and to distinguish this system from other similar systems [13], a master clock signal synchronizes the excitation signal $\mathbf{V}_i$ generated by PXIe-5412 and the ADC sampling clock of NI-5751. The last has a phase-locked loop (PLL) that allows its perfect synchronization. Thus, with this strategy, only one ADC per receiver wire is necessary and special procedures to adjust the phase shift of the excitation signal are not necessary. The excitation signal can be reconstructed because the sampling instant is known. Moreover, if the number of samples per cycle (N_S) of the excitation signal is an integer, the low-pass filters (LPFs of the IQ demodulator) can be implemented as the mean of $k \cdot N_S$ sampled values, where k is an integer. This means that during the measuring interval an integer number of samples by cycle are taken. For an excitation frequency of 1 MHz the ADC obtain 50 samples by cycle, which allows reconstructing in detail the excitation and response signals. It simplifies the computational workload and designs a mostly digital system.

E. Calibration of the Complex Permittivity

The implemented circuit needs a calibration process to isolate the fluid admittance measurement of the residual admittance caused by parasitic resistances, the capacitances, inductance of the cables, temperature displacement, among others. Then, using the technique proposed by Da Silva *et al.* [39], the measured admittance $\mathbf{Y}_M$ at the crossing points can be described as

$$\mathbf{Y}_M = \mathbf{Y}_x + \mathbf{Y}_R \quad (9)$$

where, $\mathbf{Y}_R$ is the residual admittance. Thus, the real gain can be written as

$$\mathbf{A}_v = -\frac{\mathbf{Y}_M}{\mathbf{Y}_f} = -\frac{(\mathbf{Y}_x + \mathbf{Y}_R)}{\mathbf{Y}_f} \quad (10)$$

isolating $\mathbf{Y}_x$ is possible to see a linear relation with $\mathbf{A}_v$

$$\mathbf{Y}_x = -\mathbf{Y}_R - \mathbf{Y}_f \mathbf{A}_v \quad (11)$$

and equating with (3)

$$\mathbf{Y}_x = j\omega k_g \varepsilon_0 \mathbf{e}_x = -\mathbf{Y}_R - \mathbf{A}_v \mathbf{Y}_f. \quad (12)$$

Thus, the complex permittivity can be obtained by

$$\mathbf{e}_x = \varepsilon - \frac{j\sigma}{\omega \varepsilon_0} = \frac{(-\mathbf{Y}_R - \mathbf{Y}_f \mathbf{A}_v)}{j\omega k_g \varepsilon_0} = \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\vartheta} \mathbf{A}_v \quad (13)$$

where $\boldsymbol{\mu}$ and $\boldsymbol{\vartheta}$ are complex constants. These constants are unique for each crossing point and can be calculated by

TABLE IV
THREE-PHASE RELATION MODELS

Model	Equation
Parallel	$\mathbf{e}_x = \varepsilon_1(1 - \alpha_2 - \alpha_3) + \varepsilon_2\alpha_2 + \varepsilon_3\alpha_3$ (18)
Series	$\frac{\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3}{\mathbf{e}_x} = \varepsilon_2\varepsilon_3 + \alpha_3\varepsilon_3(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ (19)
Bruggeman [38]	$0 = \alpha_1 \frac{\varepsilon_1 - \mathbf{e}_x}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_x} + \alpha_2 \frac{\varepsilon_2 - \mathbf{e}_x}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_x} + \alpha_3 \frac{\varepsilon_3 - \mathbf{e}_x}{\varepsilon_3 + 2\varepsilon_x}$ (20)
Maxwell-Garnett [38]	$\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_1}{\varepsilon_x + 2\varepsilon_1} = \alpha_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} + \alpha_3 \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\varepsilon_3 + 2\varepsilon_1}$ (21)

calibration with two fluids of known complex permittivities ε_1 and ε_2 . By using the fluid with permittivity ε_1 a voltage gain $\mathbf{A}_{v1}$ will occur, and ε_2 will produce $\mathbf{A}_{v2}$. Then, it is possible to write the constants as

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{(\varepsilon_2 \mathbf{A}_{v1} - \varepsilon_1 \mathbf{A}_{v2})}{(\mathbf{A}_{v1} - \mathbf{A}_{v2})} \quad (14)$$

$$\boldsymbol{\vartheta} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{(\mathbf{A}_{v1} - \mathbf{A}_{v2})}. \quad (15)$$

Thus, the relative fluid permittivity ε or dielectric constant and the fluid conductivity σ can be determined as

$$\varepsilon = \text{Re}\{\boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\vartheta} \mathbf{A}_v\} = \text{Re}\{\mathbf{e}_x\} \quad (16)$$

$$\sigma = -\varepsilon_0 \omega \text{Im}\{\boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\vartheta} \mathbf{A}_v\} = -\varepsilon_0 \omega \text{Im}\{\mathbf{e}_x\}. \quad (17)$$

The excitation frequency (1 MHz) was chosen so the system can be sensitive to the admittance variations (i.e., complex permittivity or conductivity and relative permittivity) related to the concentration of the used fluids. If the frequency were too low, the measurement system would be sensitive to the mixture conductivity changes but not to the relative permittivity changes. Similarly, if the frequency were too high, the system would detect the relative permittivity changes but not the conductivity variations [34]. In conclusion, the frequency should be between 100 kHz and 2 MHz. In this point, it is necessary additional research to determine the optimal frequency.

F. Three-Phase Relation Models

To find the correspondence between the measured complex permittivity $\mathbf{e}_x$ and the local phase fractions α_i it is necessary to use a relation model, where α_i denotes the i th phase. There are few relation models for three-phase flows in the literature.

Table IV shows the relation models, parallel, series, Bruggeman, and homogeneous Maxwell–Garnett, for three-phase flows. The first two models were deducted for this study from the circuit theory, and Bruggeman and Maxwell–Garnett models were taken from [40]. Each one has a particular behavior. The parallel model is the only independent of the frequency. The Maxwell–Garnett model is the only non-self-consistent; this means that it is dependent on the continuous phase. Each model was designed for a specific electrode geometry and different distribution of the phases (flow pattern). In general, all the relation models shown in this article were developed for homogeneous electrical fields, which are not fully compatible

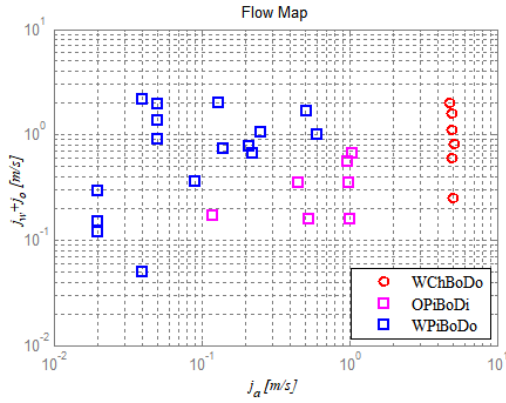


Fig. 8. Experimental flow-pattern map of the superficial velocities. The horizontal axis refers to the air superficial velocity, and the vertical axis refers to the liquids' mixture velocity.

with the conditions that exist at each crossing point of the wire-mesh sensor, since the electrodes are small compared with the flow structures.

It is possible to rewrite all these equations as a function of its phase fractions in the form

$$\mathbf{S} = \alpha_2 \mathbf{T} + \alpha_3 \mathbf{U} \quad (22)$$

where α_2 and α_3 are the phase fractions of the dispersed phases. Thus, using the continuity equation $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$, the phase fractions are obtained by

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \text{Re}(\mathbf{T}) & \text{Re}(\mathbf{U}) \\ 0 & \text{Im}(\mathbf{T}) & \text{Im}(\mathbf{U}) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{S}) \\ \text{Im}(\mathbf{S}) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

In theory, it would be possible to improve the relative errors, the points spreading, and trends if a permittivity model was fit to a specific flow pattern. However, this does not guarantee that a permittivity model that is the best for predicting the water volumetric fraction for slug flow would be the best for another flow pattern or any other phase. In addition, this possible approach incorporates complexities and complications in the technique that would eventually reduce the applicability of using the wire-mesh sensor, since in field conditions it is not known, *a priori*, what the flow pattern is.

III. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

The proposed measurement system was used for measuring volumetric phase fractions in three-phase flow experiments and was compared with the QCV data. The ranges of superficial velocities were, gas: $j_a = 0.0 - 5.1$ m/s, water: $j_w = 0.0 - 1.5$ m/s, and oil: $j_o = 0.0$ and 1.85 m/s. The experimental flow map is presented in Fig. 8. The full set of experimental points is formed by 30 experiments.

A. Qualitative Results

The three-phase flow tomography by wire-mesh system offers access to inaccessible details of the flow by external observation, even using high-speed and high-resolution cameras. In Figs. 9–11, the tomographic images were taken at a rate of 1000 frames/s.

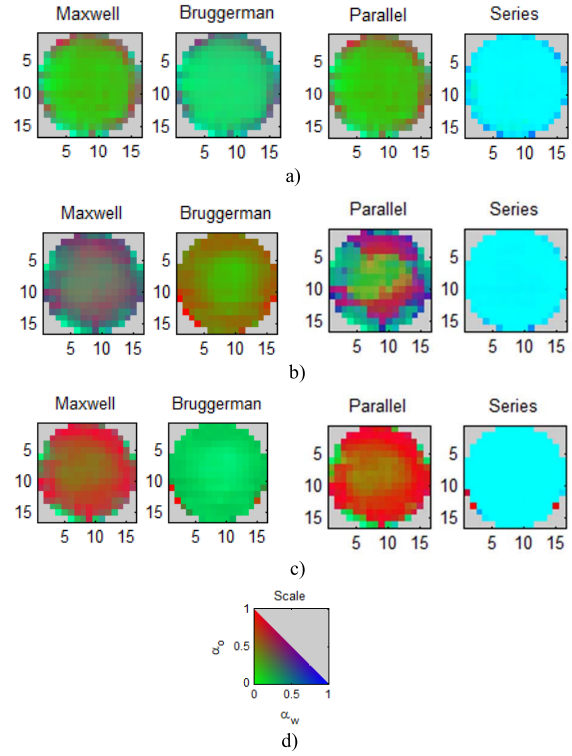


Fig. 9. Cross-sectional images (temporal mean) processed with Maxwell–Garnett; Bruggeman; parallel and series models. For (a) WChBoDo, (b) WPiBoDo and (c) OPiBoDi. (d) Color scale used to represent the fluids and their fractions; Water: blue; Oil: red; Gas: green.

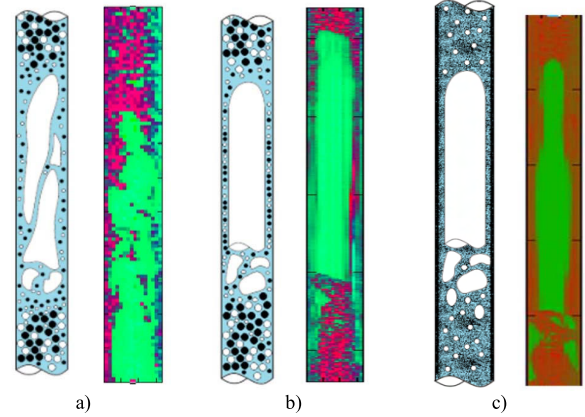


Fig. 10. Longitudinal tomography for each observed three-phase flow pattern, using Maxwell–Garnett model, where oil in water dispersion is represented by pink color, gas by green, and water in oil dispersion by brown. And graphical sketch for each observed three-phase flow pattern, where blue color represents water, white represents air, and black represents oil. The latter was taken from [43]. (a) WChBoDo. (b) WPiBoDo. (c) OPiBoDi.

The three-phase relation models, i.e., parallel, series, Bruggeman, and homogeneous Maxwell–Garnett; can be qualitatively compared. Fig. 9 presents the temporal mean of the water, the oil, and the air phase fractions of the transversal section, using those models, for each observed flow pattern. Phase fraction values are rational numbers. Each flow pattern has different characteristics; water-continuous churn flow with dispersed bubbles and oil drops (WChBoDo) has air in most

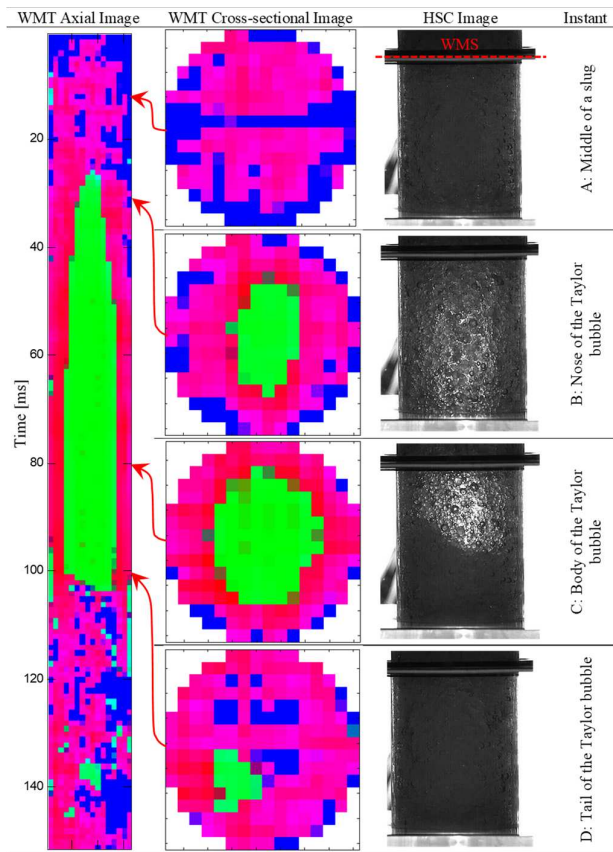


Fig. 11. Longitudinal (LHS) and cross-sectional images (middle) during the transit of a Taylor bubble in three-phase slug flow compared with the HSC ones (RHS). Image obtained at 1000 frames/s. Data were processed using the Maxwell–Garnett model. The color scale used is in Fig. 9(d).

of the pipe's cross section and oil–water mixture near to the pipe wall [see Fig. 9(a)]. In water-continuous slug flow with Taylor bubbles, spherical bubbles, and oil drops (WPiBoDo), one can observe the dominant water phase with dispersions of air and oil [see Fig. 9(b)]. In oil-continuous slug flow with Taylor bubbles, spherical bubbles, and water drops (OPiBoDi), there is a core of air with some water surrounded by an oil ring [see Fig. 9(c)].

B. Observed Flow Patterns

Three different three-phase flow patterns were observed, two dominated by water: water continuous flow (W) with churn flow (Ch), bubbles (Bo) and oil drops (Do), named as “WChBoDo,” water continuous flow (W) with Taylor bubbles (Pi), spherical bubbles (Bo) and oil drops (Do), named as “WPiBoDo,” and one where the dominant phase was oil: oil continuous flow (O) with Taylor bubbles (Pi), spherical bubbles (Bo) and dispersion of water drops in oil (Di), called “OPiBoDi.” A longitudinal tomography from the pipe center of these three flow patterns is presented in Fig. 10, i.e., were used the crossing points measurements of transmitter 7 (Tx₇) and receivers 1–16 (Rx₁–Rx₁₆). The results are contrasted with graphical sketches because it was not possible to get a representative longitudinal tomography from the HSC. It is interesting pointing out some flow characteristics that are

made visible from the WMS longitudinal images. For example, in Fig. 10(b) and (c), the dominant phases are water and oil, respectively, but the air's superficial velocity is almost the same. By inspection, it is clear that the Taylor bubble has a diameter near that of the pipe's when water is the dominant phase [see Fig. 10(b)], but when oil is dominant the liquid film is thicker [see Fig. 10(c)].

In Fig. 11, the results are for the test point with superficial velocities $j_o = 0.21$ m/s, $j_w = 0.66$ m/s, and $j_a = 0.12$ m/s and WPiBoDo flow pattern. In the middle, cross-sectional images corresponding to different instants of time are presented. By inspecting the longitudinal (LHS) and cross-sectional views (middle), one can see the typical shape of the Taylor bubble, whose nose presents a conical shape and rounded tip, and the tail is essentially cylindrical, occupying most of the tube diameter. At time A (less than 20 ms), the slug made of the liquid mixture is there, the image has blue and pink colors that correspond to water and oil, respectively, and water is the dominant phase that is in contact with the pipe wall. At the instant B (between 20 and 40 ms), the Taylor bubble begins; the bubble nose has an oval shape, and it is at the core of the pipe. The bubble is represented in green, denoting air, surrounded by an oil–water mixture. At time C (at 80 ms), halfway through the Taylor bubble body, the bubble becomes cylindrical. At instant D (at 100 ms), the end of the bubble, the tail is off the pipe center, and some dispersed air bubbles are present due to the turbulence. The images obtained by HSC confirm the main results but cannot be used to describe what is happening in the pipe's core. The results suggest that the oil concentration is greater near the bubble and the water concentration is greater near the wall. The color scale used to represent the fluids and their fractions can be seen at the bottom of Fig. 9(d): a water fraction equal to one (only water at the crossing point) is represented with the blue color, oil with red, and air with green. The intermediate colors were interpolated proportionally to the phase fraction. In the axial frames or 150 ms are illustrated. The longitudinal measurements were obtained with the central electrode.

These results have great value for the oil industry since the *in situ* properties of multiphase flow have a direct influence on the flow control and safety measures or for optimizing the production. Not to mention the possibilities of studying the average sizes of several flow structures as drops, cap bubbles, films near the pipe wall, among others.

In Fig. 12, one can see cross-sectional phase fractions as a function of time for each phase during 5-s time acquisition and in Fig. 13 the time lapse of transit of a Taylor bubble (0.15 s). In Fig. 12, one can observe the passage of 18 Taylor bubbles, denoted by the oscillations of the signals. The passage of a Taylor bubble is evidenced by a signal related to air (green).

In Fig. 13 one can see that the air fraction (green) strongly increases during the passage of a Taylor bubble. In most of the experiments, the system was robust and delivered reliable results that agreed qualitative and quantitatively to what was expected. However, the system is more sensitive when the oil and air phase fractions are high.

This is due to the similar values of the relative permittivity and the very low values of conductivity of these fluids.

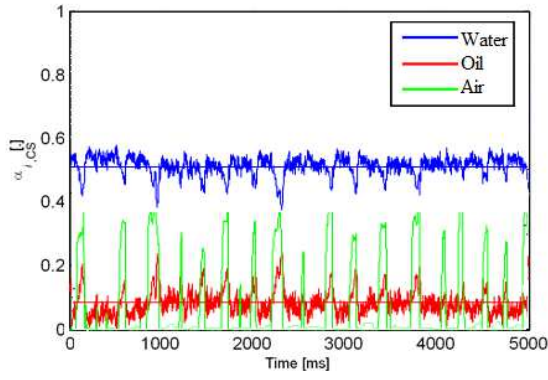


Fig. 12. Cross-sectional phase fractions as a function of time ($\alpha_{i,CS}$) during 5 s.

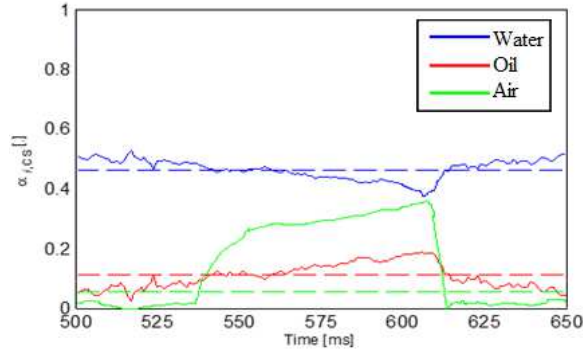


Fig. 13. Cross-sectional phase fractions as a function of time ($\alpha_{i,CS}$) during the transit of a Taylor bubble, 0.15 s.

The resolution of the system in those cases is relatively lower. Additionally, the natural noise of the system could produce deviations. When the noise is high, the phase-fraction values calculated by (23) can be negative, which have no physical meaning. In those special cases, the phase fraction is limited to zero, and the sum of the phase fractions reaches values a little higher than 1 (details about the wire-mesh data processing are described by Rodriguez *et al.* [41]).

C. Quantitative Results

The *in situ* volumetric fraction of the phases was obtained via the proposed tomography system for each experimental point, *ep*, and compared with the ones obtained using QCV (see Fig. 14). The average relative error (ARE) was used to quantify the comparison as follows:

$$\text{ARE}[\%] = 100 \frac{\sum_{\text{exp}=1}^n \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{WMS,exp}} - \alpha_{\text{QCV,exp}}}{\alpha_{\text{QCV,exp}}} \right)^2}}{n}. \quad (24)$$

Inspecting Fig. 14, it is clear that the model that presents the smallest points spreading for all three volumetric fractions is the Maxwell–Garnett (21). It gave the smallest ARE for all volumetric fractions and flow patterns for the typical three-phase flows tested in this work (see Table V). The average relative error for water, air, and oil is 12%, 13%, and 22%, respectively.

The differences between the error of the volumetric fractions predicted by the models in Table V could be explained by

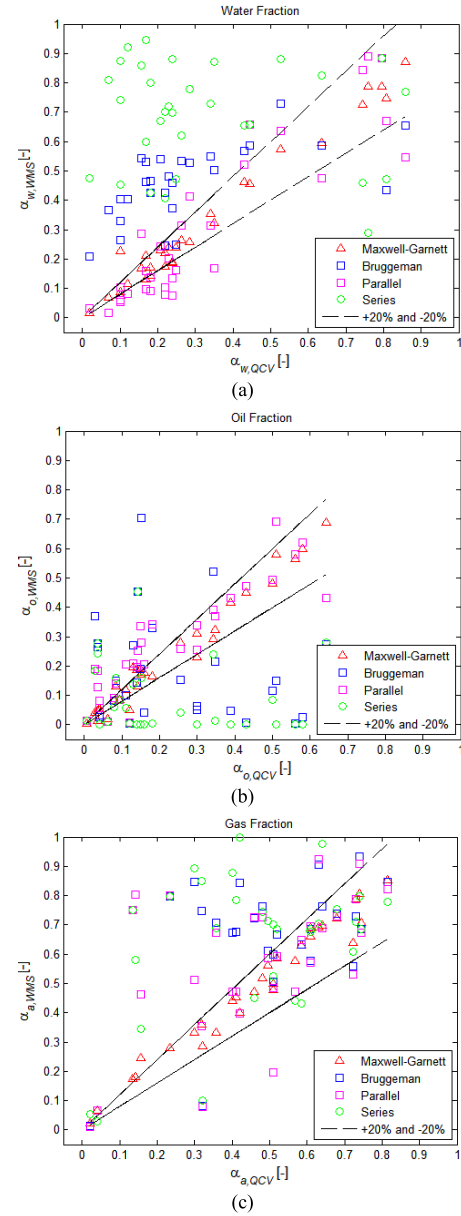


Fig. 14. Volumetric phase fractions measured by the proposed WMT compared with the ones measured by the QCVs using different relation models. (a) Water phase fraction. (b) Oil phase fraction. (c) Air phase fraction. The dashed lines indicate a deviation of $\pm 20\%$.

the conditions of the flows and the sensitivity of each model concerning each flow pattern. Each model was developed for a particular flow pattern, but in this study, the models were applied indiscriminately to all flow conditions tested and flow patterns to establish a suitable general model.

Qualitatively and quantitatively, the Maxwell–Garnett model had the best results for each studied flow pattern (see Fig. 9 and Table V). The Bruggeman model overestimates the air phase, and the series model overestimates the water phase. Restricting the analysis to the data obtained with the Maxwell–Garnett model only.

It is possible to observe in Fig. 15, that the WMS delivers the worst predictions for the lowest oil volumetric fractions. A likely reason for that is the fact that the oil electrical

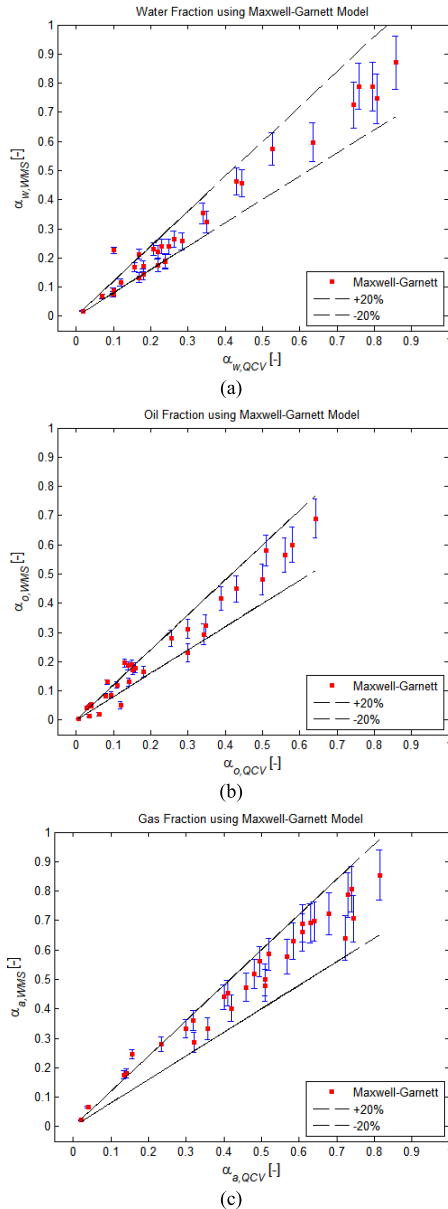


Fig. 15. Volumetric phase fractions measured by the proposed WMT compared with the ones measured by the QCVs using Maxwell-Garnett relation model. (a) Water phase fraction. (b) Oil phase fraction. (c) Air phase fraction. The dashed lines indicate a deviation of $\pm 20\%$.

characteristics, such as relative permittivity, are very close to those of the air, which increases the difficulty of differentiating them. More research is needed to sort it out.

It is important to note that these results were obtained for different flow patterns. In theory, it would be possible to improve the relative errors, points spreading, and trends if a permittivity model more appropriate for each flow pattern were applied. However, this does not guarantee that a permittivity model that is the best for slug flow and the water phase is also the best for the same flow pattern and any other phase. Besides, that approach embodies complexities and complications in the technique that would end up compromising the effectiveness of its use, since it is not known, *a priori*, what the flow pattern is in practice. That said, the results presented are

TABLE V
AVERAGE RELATIVE ERROR FOR EVERY PHASE FRACTION USING THE RELATION MODELS FOR EACH FLOW PATTERN

Relation Model	ARE Water [%]	ARE Air [%]	ARE Oil [%]	Flow Pattern
Maxwell	12.99	13.38	22.48	All the experiments
	10.50	7.98	22.03	WChBoDo
	16.30	9.43	7.53	OPiBoDi
	11.55	16.36	28.36	WPiBoDo
Bruggeman	151.54	84.85	155.05	All the experiments
	108.98	16.46	28.67	WChBoDo
	209.02	76.09	86.29	OPiBoDi
	130.63	107.64	224.05	WPiBoDo
Parallel	36.76	71.34	82.29	All the experiments
	30.35	16.21	70.57	WChBoDo
	46.39	26.14	11.89	OPiBoDi
	32.33	107.87	114.71	WPiBoDo
Series	329.27	85.33	85.59	All the experiments
	188.64	14.83	90.67	WChBoDo
	543.57	99.05	97.81	OPiBoDi
	258.69	97.36	163.48	WPiBoDo

considered sufficient for the subsequent studies of three-phase flow through the wire-mesh sensor. Therefore, the Maxwell-Garnett model is adopted for the analysis of the data acquired by the wire-mesh sensor for all three-phase flow patterns.

The WMT system's measurement uncertainty for three-phase flow has not yet been calculated and is expected to be analyzed in future work. Until now, Tompkins *et al.* [42] made an uncertainty analysis for several gas-liquid flow patterns, settling that the WMS has a void-fraction measurement uncertainty of $\pm 10.5\%$.

IV. CONCLUSION

In this article, we introduce a WMT technique to measure simultaneously the conductivity and permittivity of fluids in a typical oil-water-air three-phase flow, with a digital technique. The implemented technique to determine the complex permittivity of the fluids was based on measuring its real and imaginary parts using a digital IQ demodulator. The circuit was simplified, because the physical implementation of the analog multipliers or LPFs is no longer necessary, and it avoids transmitting an analog reference signal, reducing noise. Due to the very good synchronization, using a PLL, and the fact that the number of samples per cycle (N_s) is an integer, the computational workload is decreased significantly allowing a high rate of frames per second and the study of fleeting transient structures. It is the first time that this system is explained in the available literature, describing essential processing details.

The system was tested in a big vertical experimental setup and several flow patterns were visually observed, with both

water and oil as the dominant liquid phase. The flow patterns had mixed phases, not separated or stratified, and also big interfacial structures such as Taylor bubbles.

The qualitative results are promising and suggest that the technique is a good option for three-phase flow tomography. The developed technique opens a great range of research possibilities, for example, new data to adjust or improve volumetric-fraction mathematical prediction models. Data as interfacial areas, bubble size classification, among others, can be easily obtained from the images. One of the advantages of the proposed technique is the relatively simple way of calibrating the system. The WMT has a high temporal resolution, which makes it feasible to apply it in the study of transient phenomena in multiphase flow. This system allows the real-time monitoring of extremely fast three-phase flow events, i.e., actual 3-D details about the Taylor bubbles and phases distributions can be visualized inside of the pipeline.

Also, quantitatively, the results are encouraging, having average relative errors for the volumetric phase fractions, compared with QCVs, of 12% for water, 13% for air, and 22% for oil. Future work will be focused on improving the relation models, quantitative results, and uncertainty analyses.

REFERENCES

- [1] B. Jia, J.-S. Tsau, and R. Barati, "A review of the current progress of CO₂ injection EOR and carbon storage in shale oil reservoirs," *Fuel*, vol. 236, pp. 404–427, Jan. 2019, doi: [10.1016/j.fuel.2018.08.103](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.103).
- [2] S. Huang, B. Zhang, J. Lu, and D. Wang, "Study on flow pattern maps in hilly-terrain air–water–oil three-phase flows," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, vol. 47, pp. 158–171, May 2013, doi: [10.1016/j.expthermflusci.2013.01.011](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.01.011).
- [3] P. Hanafizadeh, A. Shahani, A. Ghanavati, and M. A. Akhavan-Behabadi, "Experimental investigation of air–water–oil three-phase flow patterns in inclined pipes," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, vol. 84, pp. 286–298, Jun. 2017, doi: [10.1016/j.expthermflusci.2017.02.009](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.02.009).
- [4] K. Gawas, *Studies in Low-Liquid Loading in Gas/Oil/Water Three Phase Flow in Horizontal and Near Horizontal Pipes*. Tulsa, OK, USA: Univ. Tulsa, 2013.
- [5] S. Wang, H.-Q. Zhang, C. Sarica, and E. Pereyra, "Experimental study of high-viscosity oil/water/gas three-phase flow in horizontal and upward vertical pipes," *SPE Prod. Oper.*, vol. 28, no. 3, pp. 306–316, Jul. 2013, doi: [10.2118/163148-PA](https://doi.org/10.2118/163148-PA).
- [6] X. Liu, H. Zhong, Y. Li, Z. Li, and Q. Wang, "Experimental study of flow patterns and pressure drops of heavy oil–water–gas vertical flow," *J. Hydrodyn. B*, vol. 26, no. 4, pp. 646–653, Sep. 2014, doi: [10.1016/S1001-6058\(14\)60071-8](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60071-8).
- [7] B. Xie, D. Kong, L. Kong, W. Kong, and L. Li, "Analysis of vertical upward oil–gas–water three-phase flow based on multi-scale time irreversibility," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 62, pp. 9–18, Aug. 2018, doi: [10.1016/j.flowmeasinst.2018.03.003](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.03.003).
- [8] L. M. Al-Hadhrani, S. M. Shaahid, L. O. Tunde, and A. Al-Sarkhi, "Experimental study on the flow regimes and pressure gradients of air–oil–water three-phase flow in horizontal pipes," *Sci. World J.*, vol. 2014, Jan. 2014, Art. no. 810527, doi: [10.1155/2014/810527](https://doi.org/10.1155/2014/810527).
- [9] G. Oddie, H. Shi, L. J. Durlifsky, K. Aziz, B. Pfeffer, and J. A. Holmes, "Experimental study of two and three phase flows in large diameter inclined pipes," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 29, no. 4, pp. 527–558, Apr. 2003, doi: [10.1016/S0301-9322\(03\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(03)00015-6).
- [10] C. Zhao, G. Wu, H. Zhang, and Y. Li, "Measurement of water-to-liquid ratio of oil–water–gas three-phase flow using microwave time series method," *Meas. J. Int. Meas. Ed.*, vol. 140, pp. 511–517, Jul. 2019, doi: [10.1016/j.measurement.2019.03.054](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.054).
- [11] M. W. Yaqub, R. Marappagounder, R. Rusli, D. M. R. Prasad, and R. Pendyala, "Review on gas–liquid–liquid three-phase flow patterns, pressure drop, and liquid holdup in pipelines," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 159, pp. 505–528, Jul. 2020, doi: [10.1016/j.cherd.2020.04.029](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.04.029).
- [12] L. Edwards, D. Dhanpat, and D. P. Chakrabarti, "Hydrodynamics of three phase flow in upstream pipes," *Cogent Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–28, Jan. 2018, doi: [10.1080/23311916.2018.1433983](https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1433983).
- [13] E. N. dos Santos, T. P. Vendruscolo, R. E. M. Morales, E. Schleicher, U. Hampel, and M. J. Da Silva, "Dual-modality wire-mesh sensor for the visualization of three-phase flows," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 10, Oct. 2015, Art. no. 105302, doi: [10.1088/0957-0233/26/10/105302](https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/10/105302).
- [14] F. D. A. Dias *et al.*, "New algorithm to discriminate phase distribution of gas–oil–water pipe flow with dual-modality wire-mesh sensor," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 125163–125178, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.3007678](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007678).
- [15] L. Zhai, Y. Wang, J. Yang, and N. Jin, "A three-phase flow visualization method using wire-mesh sensor based on continuous phase conductance compensation," in *Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. (IMTC)*, May 2021, pp. 1–6, doi: [10.1109/I2MTC50364.2021.9459918](https://doi.org/10.1109/I2MTC50364.2021.9459918).
- [16] G. Bochio, M. M. H. Cely, A. F. A. Teixeira, and O. M. H. Rodriguez, "Experimental and numerical study of stratified viscous oil–water flow," *AIChE J.*, vol. 67, pp. 1–15, Feb. 2021, doi: [10.1002/aic.17239](https://doi.org/10.1002/aic.17239).
- [17] J. L. Kickhofel, R. Zboray, M. Damsohn, A. Kaestner, E. H. Lehmann, and H.-M. Prasser, "Cold neutron tomography of annular coolant flow in a double subchannel model of a boiling water reactor," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.*, vol. 651, no. 1, pp. 297–304, Sep. 2011, doi: [10.1016/j.nima.2011.01.062](https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.01.062).
- [18] Z. Wu, H. McCann, L. E. Davis, J. Hu, A. Fontes, and C. G. Xie, "Microwave-tomographic system for oil- and gas-multiphase-flow imaging," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 10, Oct. 2009, Art. no. 104026, doi: [10.1088/0957-0233/20/10/104026](https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/10/104026).
- [19] E. Schleicher, M. J. da Silva, S. Thiele, A. Li, E. Wollrab, and U. Hampel, "Design of an optical tomograph for the investigation of single- and two-phase pipe flows," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 9, Sep. 2008, Art. no. 094006, doi: [10.1088/0957-0233/19/9/094006](https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/9/094006).
- [20] T. Frøystein, H. Kvandal, and H. Aakre, "Dual energy gamma tomography system for high pressure multiphase flow," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 16, nos. 2–3, pp. 99–112, Apr. 2005, doi: [10.1016/j.flowmeasinst.2005.02.005](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2005.02.005).
- [21] S. Schug and W. Arlt, "Imaging of fluid dynamics in a structured packing using X-ray computed tomography," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 39, no. 8, pp. 1561–1569, Aug. 2016, doi: [10.1002/ceat.201600278](https://doi.org/10.1002/ceat.201600278).
- [22] M. Appel, J. J. Freeman, and D. Pusiol, "Robust multi-phase flow measurement using magnetic resonance technology," in *Proc. SPE Middle East Oil Gas Show Conf.*, Manama, Bahrain, Sep. 2011, doi: [10.2118/141465-MS](https://doi.org/10.2118/141465-MS).
- [23] A. Alfareh, M. H. F. Rahiman, M. T. M. Talib, J. Pusppanathan, and J. Jamaludin, "Simulation of invasive ultrasonic tomography for three phase mixture," *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng.*, vol. 10, nos. 1–13, pp. 129–133, 2018.
- [24] Y. Li *et al.*, "Gas/oil/water flow measurement by electrical capacitance tomography," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 7, Jul. 2013, Art. no. 074001, doi: [10.1088/0957-0233/24/7/074001](https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/7/074001).
- [25] B. Wang, Z. Gui, W. Tan, Z. Huang, H. Ji, and H. Li, "A new dual-modality ECT/ERT technique based on C4D principle," in *Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. (IMTC)*, May 2015, pp. 2061–2065, doi: [10.1109/I2MTC.2015.7151600](https://doi.org/10.1109/I2MTC.2015.7151600).
- [26] J. Sun and W. Yang, "A dual-modality electrical tomography sensor for measurement of gas–oil–water stratified flows," *Measurement*, vol. 66, no. 5, pp. 150–160, Apr. 2015, doi: [10.1016/j.measurement.2015.01.032](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.01.032).
- [27] Q. Wang *et al.*, "Capability of dual-modality electrical tomography for gas–oil–water three-phase pipeline flow visualisation," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 62, pp. 152–166, Aug. 2018, doi: [10.1016/j.flowmeasinst.2018.02.007](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.02.007).
- [28] F. Hernandez-Alvarado, S. Kleinbart, D. V. Kalaga, S. Banerjee, J. B. Joshi, and M. Kawaji, "Comparison of void fraction measurements using different techniques in two-phase flow bubble column reactors," *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 102, pp. 119–129, May 2018, doi: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.02.002](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.02.002).
- [29] A. J. Dave, A. Manera, M. Beyer, D. Lucas, and H.-M. Prasser, "Uncertainty analysis of an interfacial area reconstruction algorithm and its application to two group interfacial area transport equation validation," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 310, pp. 620–637, Dec. 2016, doi: [10.1016/j.nucengdes.2016.10.038](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.10.038).
- [30] I. D. Johnson, "Method and apparatus for measuring water in crude oil," U.S. Patent 4664263, Feb. 17, 1987.

- [31] H.-M. Prasser, A. Böttger, and J. Zschau, "A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 9, no. 2, pp. 111–119, Jun. 1998.
- [32] M. J. Da Silva, E. Schleicher, and U. Hampel, "Capacitance wire-mesh sensor for fast measurement of phase fraction distributions," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 7, pp. 2245–2251, Jul. 2007, doi: [10.1088/0957-0233/18/7/059](https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/7/059).
- [33] H. F. V. Peña and O. M. H. Rodriguez, "Applications of wire-mesh sensors in multiphase flows," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 45, pp. 255–273, Oct. 2015, doi: [10.1016/j.flowmeasinst.2015.06.024](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2015.06.024).
- [34] M. J. da Silva, "Impedance sensors for fast multiphase flow measurement and imaging," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng., Dresden, Germany, TUDpress, 2008.
- [35] E. N. dos Santos, M. J. da Silva, R. E. M. Morales, S. Reinecke, E. Schleicher, and U. Hampel, "Dual-modality impedance wire-mesh sensor for investigation of multiphase flows," in *Proc. IEEE Int. Conf. Imag. Syst. Techn. (IST)*, Oct. 2014, pp. 316–319, doi: [10.1109/IST.2014.6958496](https://doi.org/10.1109/IST.2014.6958496).
- [36] E. N. dos Santos, "Development and application of wire-mesh sensors for high-speed multiphase flow imaging," M.S. thesis, Dept. Elect. Eng., Federal Univ. Technol. Paraná, Curitiba, Brazil, 2015.
- [37] H.-M. Prasser and R. Häfeli, "Signal response of wire-mesh sensors to an idealized bubbly flow," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 336, pp. 3–14, Sep. 2018, doi: [10.1016/j.nucengdes.2017.04.016](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.04.016).
- [38] H. Zhang, Y. Xiao, and H. Gu, "Numerical investigations of the accuracy of conductivity wire-mesh sensors," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 345, pp. 148–156, Apr. 2019, doi: [10.1016/j.nucengdes.2019.02.014](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.02.014).
- [39] M. J. Da Silva, F. Bruckner, E. Schleicher, and U. Hampel, "High-speed complex admittance/permittivity needle probe for investigation of multiphase flows," in *Proc. IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, Apr. 2006, pp. 1937–1941, doi: [10.1109/IMTC.2006.328315](https://doi.org/10.1109/IMTC.2006.328315).
- [40] A. Sihvola, *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*. London, U.K.: The Institution of Engineering and Technology, 1999.
- [41] I. H. Rodriguez, H. F. V. Peña, A. B. Riaño, R. A. W. M. Henkes, and O. M. H. Rodriguez, "Experiments with a wire-mesh sensor for stratified and dispersed oil-brine pipe flow," *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 70, pp. 113–125, Apr. 2015, doi: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.11.011](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.11.011).
- [42] C. Tompkins, H.-M. Prasser, and M. Corradini, "Wire-mesh sensors: A review of methods and uncertainty in multiphase flows relative to other measurement techniques," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 337, pp. 205–220, Oct. 2018, doi: [10.1016/j.nucengdes.2018.06.005](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.06.005).
- [43] D. M. Rocha, C. H. M. de Carvalho, V. Estevam, and O. M. H. Rodriguez, "Effects of water and gas injection and viscosity on volumetric fraction, pressure gradient and phase inversion in upward-vertical three-phase pipe flow," *J. Petroleum Sci. Eng.*, vol. 157, pp. 519–529, Aug. 2017, doi: [10.1016/j.petrol.2017.07.055](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.07.055).



Hugo Fernando Velasco-Peña (Senior Member, IEEE) received the B.S. degree in electronics engineering from the Francisco José de Caldas University, Bogotá, Colombia, in 2003, the M.Sc. degree in industrial automation from the National University of Colombia, Bogotá, in 2010, and the Ph.D. degree in mechanical engineering from the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, in 2015.

He is currently an Associate Professor with the Universidad de La Salle, Bogotá. His experience is related with industrial instrumentation, smart sensors, and signal and image processing.



Adriana Bonilla-Riaño received the B.S. degree in electronics engineering from the Francisco José de Caldas University, Bogotá, Colombia, in 2003, the M.Sc. degree in electronics engineering from Pontifical Javeriana University, Bogotá, in 2010, and the Ph.D. degree in petroleum sciences and engineering from the University of Campinas in Brazil, Campinas, Brazil, in 2015.

She had presented her research results in different international conferences and high-impact journals. Her research interests include signal and image

processing and electronic instrumentation.



Carlos Marlon Santos received the B.S. degree in mechanical engineering from the Federal University of Bahia, Salvador, Brazil, in 2002, the M.Sc. degree in mechanical engineering from the Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil, in 2005, and the Ph.D. degree in mechanical engineering from the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, in 2020.

His research interest includes multiphase flow.



Oscar M. H. Rodriguez received the B.S. degree in mechanical engineering from the Federal University of Uberlândia, Brazil, in 1996, and the M.Sc. and Ph.D. degrees in mechanical engineering from the State University of Campinas, Campinas, Brazil, 1998 and 2002, respectively.

He was a Research Fellow at the Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, and the University of Nottingham, Nottingham, U.K. He is currently an Associate Professor with the University of São Paulo (USP), São Paulo, Brazil, where he is

also the Coordinator of the Multiphase Flow Research Center. He has authored more than 150 complete scientific articles. His research interests include multiphase flow, hydrodynamic instability, electrical-impedance instrumentation, and energy industry.

Dr. Rodriguez is a member of the Management Board of the European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion (ERCOFTAC). He was a recipient of the EMBRAER Best Doctoral Thesis and PETROBRAS Technology Awards. He was the Chairperson for the 10th International Conference on Multiphase Flow—ICMF 2019.