

UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
TECNOLOGIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO

UMPC – Unidade Móvel de Pesquisa Científica: um sistema desenvolvido para aferições em tempo real das propriedades físico-químicas de fluidos de perfuração

SÉRGIO DA CRUZ MAGALHÃES FILHO

Agosto, 2015



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

UMPC – Unidade Móvel de Pesquisa Científica: um sistema desenvolvido para aferições em tempo real das propriedades físico-químicas de fluidos de perfuração

SÉRGIO DA CRUZ MAGALHÃES FILHO

Sob a Orientação de
Cláudia Míriam Scheid

e Co-orientação de
Luís Américo Calçada

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau em **Mestre em Ciências** em engenharia química, área de concentração em Tecnologia Química.

Seropédica, RJ
Agosto, 2015

622.3381

M188u

T

Magalhães Filho, Sérgio da Cruz, 1983-
UMPC - Unidade Móvel de Pesquisa
Científica: um sistema desenvolvido para
aferições em tempo real das propriedades
físico-químicas de fluidos de perfuração /
Sérgio da Cruz Magalhães Filho. - 2015.
314 f.: il.

Orientador: Cláudia Miriam Scheid.

Dissertação (mestrado) - Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Química.

Bibliografia: f.137-140.

1. Poços de petróleo - Perfuração -
Teses. 2. Poços de petróleo - Perfuração -
Processamento de dados - Teses. 3.
Indústria petrolífera - Automação - Teses.
4. Físico - química - Teses. 5. Sistemas de
controle supervisorio - Teses. I. Scheid,
Cláudia Miriam, 1968- II. Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de
Pós-Graduação Engenharia Química. III.
Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

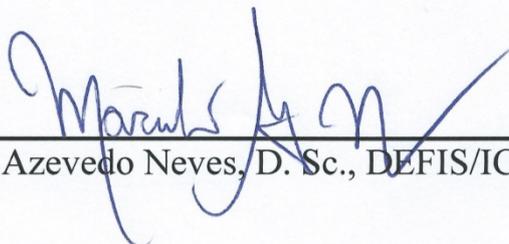
SÉRGIO DA CRUZ MAGALHÃES FILHO

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau em **Mestre em Ciências**, no curso de pós-graduação em engenharia química, área de concentração em Tecnologia Química.

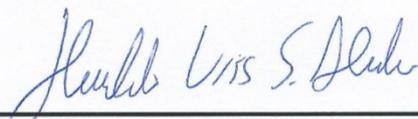
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 31/08/2015.



Cláudia Míriam Scheid, D. Sc., DEQ/IT/UFRRJ
(Orientador (a))



Marcelo Azevedo Neves, D. Sc., DEFIS/ICE/UFRRJ



Heraldo Luís Silveira de Almeida D. Sc., DEL/POLI/UFRRJ

Saúdo a minha família: Conceição, Álvaro, Andressa, Giovana e Beatriz.

Agradecimentos

Àquele cuja razão de eu existir é devida. Além do sopro de vida, abdicou de si próprio, fez-se em três, sempre foi, é e sempre existirá. Sofreu na carne meu pecado me concedendo a dádiva da vida após a vida, razão real pela qual eu vivo. Que essa conquista sirva única e exclusivamente para engrandecer ao Seu nome. Obrigado Pai, porque até aqui Tu tens me ajudado.

Mãe, eu te amo. Quando perdi meu pai aos nove anos você abriu mão de si própria em prol de mim e meu irmão, me formou o profissional e homem que sou. Como retribuir tamanho amor? Não há palavras, talvez nem gestos; dedico esta vitória a você. Que este trabalho se torne uma lembrança de que você fez o suficiente, que você chegou lá e que nada nem ninguém lhe digam o contrário. Agora que sou pai começo a entender quão árdua é a tarefa de educar, no sentido mais amplo possível desta palavra.

Pai, a vida não permitiu que continuássemos juntos, e como sinto sua falta. Confesso que mesmo homem feito, agora pai de duas meninas, não tenho pudores em chorar sua ausência quando estou só. Hoje, maduro, percebo que seu carinho para conosco e preocupação permitiram que eu chegasse até aqui. Ao partir, você garantiu que tivéssemos segurança financeira. Mesmo em meio às suas dores você lembrou-se de nós. Nunca vou te esquecer (em memória).

Ao meu irmão Álvaro, que ombro a ombro, como militantes numa guerra, vencemos os desafios quando estávamos ambos na graduação na UFRRJ.

Dizem que quando se tem uma má esposa, sua chance de sucesso é de 0%, quando se tem uma boa esposa, suas chances aumentam para 50%. Amor meu, tudo que eu tenho é teu, assim como este trabalho. Porque se você não tivesse comigo este tempo todo certamente eu não teria chegado, eu simplesmente não teria vontade. De que adianta a vitória se não se pode compartilhar a alegria que ela traz com a pessoa que se ama. Amo-te.

Às minhas filhas, Giovana e Beatriz. Espero que este trabalho sirva de exemplo para vocês algum dia no futuro. Certa vez ouvi de um filósofo: “Seus atos falam tão alto que eu não consigo ouvir o que falas”. E para quando souberem ler vejam isto: Em todos os momentos em que parei de escrever para brincar com vocês não me arrependi nem um minuto, aqueles momentos me enchem de energia para continuar.

Aos meus queridos orientadores, meu muito obrigado. Pela oportunidade, pelo respeito mútuo, pela consideração e carinho com minha vida acadêmica e profissional. Tê-los como orientadores foi uma honra, espero ter feito jus à dedicação de vocês.

Por último, mas não menos importante, dedico este trabalho à minha equipe de inigualável valor. Sem vocês não teríamos atingido tão nobre resultado. Passamos por muita coisa juntos, sofremos, vencemos, perdemos, rimos, choramos; tudo isso só fez nos unir. Somos mais que uma equipe, somos uma fraternidade. Meu muito obrigado ao

Elias Valim, Eduardo Cunha, Frederico Belfort (em memória) e Gabrielle Fontella, e aos vários outros nomes que vieram e se foram, nomes estes que deixaram um pouquinho de suas contribuições.

Sumário

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Estrutura do trabalho	3
CAPÍTULO II	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Introdução ao processo de perfuração convencional e não convencional	4
2.2. O fluido de perfuração e suas ações no processo	9
2.3. O atual estado das técnicas de aferição das propriedades de fluidos de perfuração em bancada.....	14
2.3.1. A atual técnica de aferição de viscosidade	15
2.3.2. A atual técnica de aferição de densidade.....	17
2.3.3. A atual técnica de aferição de estabilidade elétrica.....	18
2.3.4. A atual técnica de aferição de teor de água em óleo e concentração de sólidos.....	20
2.4. O atual estado das técnicas de aferição das propriedades de fluidos de perfuração em tempo real.....	21
2.5. Outros trabalhos de monitoramento em tempo real em áreas afins da engenharia	49
CAPÍTULO III	58
3. MATERIAL E MÉTODOS	58
3.1. Sensores adquiridos.....	59
3.1.1. Sensor de tamanho e contagem de partículas	59
3.1.2. Sensor de fração de água em óleo	60
3.2. Readequação do <i>loop</i> de Magalhães <i>et al.</i> (2014).....	62
3.3. Construção da infraestrutura de comunicação de dados e IHM	64
CAPÍTULO IV	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
4.1. Resultados típicos dos sensores adquiridos.....	72
4.1.1. Resultados típicos do sensor de tamanho e contagem de partículas FBRM, modelo E25. 72	
4.1.2. Resultados típicos do sensor de fração de água em óleo.....	75
4.2. Resultados obtidos para a readequação do <i>loop</i> de fluidos de Magalhães <i>et al.</i> (2014) 76	
4.3. Resultados obtidos para a implementação do sistema supervisor, conexão de clientes remotos e IHM	80
4.3.1. Algoritmos do “Controle de <i>Software</i> ”	83
4.3.2. Algoritmos do “Controle Operacional – Admissão de Fluidos”	87
4.3.3. Algoritmos da “Condição Operacional e Monitoramento do Fluido”.....	102
4.3.4. Algoritmos da “Viscosimetria”	107
4.3.5. Algoritmos da “Estabilidade elétrica”.....	116
4.3.6. Algoritmos do “Controle do Container”	120
4.3.7. Algoritmos do “Controle Operacional – Retro lavagem”	121
4.3.8. Resultados dos módulos de <i>software</i> criados para acessar o histórico da viscosimetria e estabilidade elétrica.....	124
4.3.9. Resultado da interface criada para conexão de clientes remotos.....	129
CAPÍTULO V	134

5. CONCLUSÃO	134
CAPÍTULO VI.....	136
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	136
CAPÍTULO VII	137
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
ANEXO A – Artigo publicado de Magalhães <i>et al.</i> , 2014.....	141
ANEXO B – Características e linguagem da plataforma <i>LabView®</i>	154
ANEXO C – Prêmios recebidos durante o desenvolvimento do trabalho de Magalhães <i>et al.</i> , 2014.....	157
ANEXO D – Patente requerida durante o trabalho de Magalhães <i>et al.</i> , 2014.	158
ANEXO E – Artigos aceitos e publicados	181
E ₁ – Desenvolvimento de uma Unidade Móvel para Monitoramento Remoto das Propriedades Físico Químicas de Fluidos Perfuração.....	181
E ₂ – Determinação das propriedades Físico-Químicas de Fluidos de Perfuração em Tempo Real em uma Unidade de Escoamento de Fluidos	188
E ₃ – <i>Real Time Measurements of the Physicochemical Properties of Drilling Fluids</i>	196
ANEXO F – Artigos em processo de submissão em periódicos internacionais.....	212
F ₁ – <i>Study of Continuous Rheological Measurements in Drilling Fluids</i>	212
F ₂ – <i>Prediction of solids content into suspension in drilling fluids from real time data of ultrasonic attenuation, sound velocity, density and apparent viscosity using statistic model</i>	250
F ₃ – <i>Robust Automated Software using Hybrid Method for Process Control</i>	267
F ₄ – <i>Improving drilling performance with continuous Online Measurements of Electrical Stability and Conductivity in Oil Based Drilling Fluids</i>	288

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de um sistema de perfuração (perfuratriz). Fonte: acervo pessoal do autor, adaptado de Halliburton INC.	4
Figura 2. A) Esquema de uma coluna de perfuração e broca. B) Coluna e broca em ação com fluido de perfuração sendo ejetado e produzindo limpeza do poço. Fonte: acervo pessoal do autor, adaptado de Halliburton INC.	5
Figura 3. Esquema de um poço convencional <i>off shore</i> . Fonte: acervo pessoal do autor, adaptado de autor desconhecido.	6
Figura 4. Esquema de um poço direcional <i>on shore</i> . Fonte: adaptado de https://www.youtube.com/watch?v=fBQCQ6HL2Yw , acessado em 20/07/15.	7
Figura 5. Esquema de um poço direcional <i>on shore</i> . Fonte: adaptado de https://www.youtube.com/watch?v=fBQCQ6HL2Yw , acessado em 20/07/15.	8
Figura 6. Sistema supervisorio (1) durante operação de perfuração direcional. Fonte: adaptado de https://www.youtube.com/watch?v=cl8BBoCV7gU , acessado em 20/07/15.	8
Figura 7. Sistema supervisorio (2) durante operação de perfuração direcional. Fonte: adaptado de https://www.youtube.com/watch?v=cl8BBoCV7gU , acessado em 20/07/15.	9
Figura 8. Perfuratriz, imagem real, comparação com Figura 1. Fonte: Acervo pessoal do autor.	9
Figura 9. Colunas de perfuração e detalhe no estabilizador, componente que precede a broca de perfuração. Fonte: Acervo pessoal do autor.	10
Figura 10. Bombas especiais que admitem os fluidos de perfuração para dentro do sistema coluna/broca. Fonte: Acervo pessoal do autor.	10
Figura 11. Amostra de fluido de perfuração. Fonte: Acervo pessoal do autor, adaptado de autor desconhecido.	11
Figura 12. Tanque de produção e armazenamento de fluido de perfuração. Fonte: Acervo pessoal do autor.	11
Figura 13. Esquema do viscosímetro FANN 35A. Fonte: adaptado do manual FANN 35A.	15
Figura 14. Esquema do densímetro “balança de lama pressurizada”. Fonte: Adaptado do manual FANN <i>Pressurized Mud Balance</i>	18
Figura 15. Foto do medidor de estabilidade elétrica FANN 23D. Fonte: Adaptado do manual FANN 23D.	19
Figura 16. Esquema do equipamento da FANN Quite Retorta. Adaptado do manual do FANN <i>Retort Kit</i>	20
Figura 17. Primeiro esquema da unidade experimental construída no <i>Cubility Test Center</i> . Fonte: adaptado de Saasen <i>et al.</i> (2009).	22
Figura 18. Segundo esquema da unidade experimental construída no <i>Cubility Test Center</i> , detalhes sobre o sistema de caracterização de sólidos. Fonte: adaptado de Saasen <i>et al.</i> (2009).	23
Figura 19. Resultados em tempo real de tensão cisalhante (sistema inglês) e densidade (sistema inglês) obtidos por Saasen <i>et al.</i> (2009), em função do tempo absoluto. Fonte: adaptado de Saasen <i>et al.</i> (2009).	24
Figura 20. Foto do protótipo de estabilidade elétrica criado por Saasen <i>et al.</i> (2009). Fonte: adaptado de Saasen <i>et al.</i> (2009).	25
Figura 21. Resultados em tempo real de estabilidade elétrica, densidade e tensão de cisalhamento à 1021 s^{-1} obtidos por Saasen <i>et al.</i> (2009), em função do tempo absoluto. Fonte: adaptado de Saasen <i>et al.</i> (2009).	25

Figura 22. Resultados em tempo real de concentração de sólidos obtidos por Saasen <i>et al.</i> (2009), em função do tempo absoluto. Fonte: adaptado de Saasen <i>et al.</i> (2009).	27
Figura 23. Foto do aparato desenvolvido por Broussard <i>et al.</i> (2010) para medições de viscosidade aparente e densidade. Fonte: adaptado de Broussard <i>et al.</i> (2010).	28
Figura 24. Tensão de cisalhamento em função do tempo absoluto para primeiro poço testado com fluido sintético, tensões medidas a altas velocidades. Fonte: adaptado de Broussard <i>et al.</i> (2010).	29
Figura 25. Tensão de cisalhamento em função do tempo absoluto para primeiro poço testado com fluido sintético, tensões medidas a baixas velocidades. Fonte: adaptado de Broussard <i>et al.</i> (2010).	29
Figura 26. Tensão de cisalhamento em função do tempo absoluto para segundo poço testado com fluido aquoso, tensões medidas a altas velocidades. Fonte: adaptado de Broussard <i>et al.</i> (2010).	30
Figura 27. Tensão de cisalhamento em função do tempo absoluto para segundo poço testado com fluido aquoso, tensões medidas a baixas velocidades. Fonte: adaptado de Broussard <i>et al.</i> (2010).	30
Figura 28. Densidade em função do tempo absoluto para primeiro poço testado com fluido sintético. Fonte: adaptado de Broussard <i>et al.</i> (2010).	31
Figura 29. Densidade em função do tempo absoluto para segundo poço testado com fluido aquoso. Fonte: adaptado de Broussard <i>et al.</i> (2010).	31
Figura 30. Esquema da estrutura de informática desenvolvida por Broussard <i>et al.</i> (2010). Fonte: adaptado de Broussard <i>et al.</i> (2010).	32
Figura 31. IHM construída para administração do sistema de medição remoto, foco na interface de viscosidade. Fonte: adaptado de Broussard <i>et al.</i> (2010).	33
Figura 32. IHM construída para administração do sistema de medição remoto, foco na interface de densidade. Fonte: adaptado de Broussard <i>et al.</i> (2010).	33
Figura 33. Aparato experimental para determinação da viscosidade aparente a uma taxa fixa e densidade. Fonte: adaptado de Miller <i>et al.</i> (2011).	34
Figura 34. Resultados de viscosidade aparente, densidade e temperatura aferidos em tempo real pelo instrumento desenvolvido por Miller <i>et al.</i> (2011). Fonte: adaptado de Miller <i>et al.</i> (2011).	34
Figura 35. Esquema do viscosímetro desenvolvido por Rondon <i>et al.</i> (2012). Fonte: adaptado de Rondon <i>et al.</i> (2012).	36
Figura 36. Foto do viscosímetro desenvolvido por Rondon <i>et al.</i> (2012), abaixo, e esquema da geometria formada para escoamento do fluido, acima. Fonte: adaptado de Rondon <i>et al.</i> (2012).	37
Figura 37. Esquema do <i>loop</i> de fluidos construído por Rondon <i>et al.</i> (2012). Fonte: adaptado de Rondon <i>et al.</i> (2012).	39
Figura 38. Esquema da sonda escola utilizado por Carlsen <i>et al.</i> (2012). Fonte: adaptado de Carlsen <i>et al.</i> (2012).	40
Figura 39. Densidade em tempo real calculada e densidade de referência aferida na balança de lama em função da pressão total do sistema obtidos por Carlsen <i>et al.</i> (2012). Fonte: adaptado de Carlsen <i>et al.</i> (2012).	41
Figura 40. Tensão de cisalhamento em tempo real calculada e tensão cisalhante de referência aferida no viscosímetro FANN, ambos em função da velocidade angular do viscosímetro. Fonte: adaptado de Carlsen <i>et al.</i> (2012).	42

Figura 41. <i>Loop</i> de fluidos desenvolvido por Magalhães <i>et al.</i> (2014). Fonte: adaptado de Magalhães <i>et al.</i> (2014).....	44
Figura 42. Resultados de tensões cisalhantes obtidas em tempo real e em bancada no viscosímetro FANN 35A por Magalhães <i>et al.</i> (2014). Acima medições em fluido de perfuração aquoso, abaixo, medições em fluido sintético. Fonte: adaptado de Magalhães <i>et al.</i> (2014).....	45
Figura 43. Resultados de densidade obtidas em tempo real e em bancada na balança de lama por Magalhães <i>et al.</i> (2014). Acima medições em fluido de perfuração aquoso, abaixo, medições em fluido sintético. Fonte: adaptado de Magalhães <i>et al.</i> (2014).	46
Figura 44. Resultados de estabilidade elétrica obtidas em tempo real e em bancada no FANN 23D por Magalhães <i>et al.</i> (2014). Fluido a 30/70 (Água/Óleo). Fonte: adaptado de Magalhães <i>et al.</i> (2014).	47
Figura 45. Resultados de estabilidade elétrica obtidas em tempo real e em bancada no FANN 23D por Magalhães <i>et al.</i> (2014). Fluido a 40/60 (Água/Óleo). Fonte: adaptado de Magalhães <i>et al.</i> (2014).	48
Figura 46. Resultados de estabilidade elétrica obtidas em tempo real e em bancada no FANN 23D por Magalhães <i>et al.</i> (2014). Fluido a 50/50 (Água/Óleo). Fonte: adaptado de Magalhães <i>et al.</i> (2014).	48
Figura 47. IHM desenvolvida para controle de um motor remotamente. Adaptado de Jui-Hong Horng (2007).	49
Figura 48. Sistema a ser monitorado: ruídos da turbina eólica próxima a residências. Adaptado de Lin <i>et al.</i> (2010).	50
Figura 49. Esquema montado por de Lin <i>et al.</i> (2010) utilizando a solução comercial da <i>National Instruments</i> para monitoramento remoto de ruídos de turbinas eólicas próximas a residências. Adaptado de Lin <i>et al.</i> (2010).	50
Figura 50. IHM montada por Lin <i>et al.</i> (2010) utilizando o <i>LabView®</i> para monitoramento remoto de ruídos de turbinas eólicas próximas a residências. Adaptado de Lin <i>et al.</i> (2010). ...	51
Figura 51. Esquema montado por Péter <i>et al.</i> (2004) para aferições de histerese de campos eletromagnéticos. Adaptado de Péter <i>et al.</i> (2004).	52
Figura 52. IHM montada por Péter <i>et al.</i> (2004) utilizando o <i>LabView®</i> para monitoramento em tempo real da histerese de campos eletromagnéticos. Adaptado de Péter <i>et al.</i> (2004).	52
Figura 53. Esquema montado por Wang <i>et al.</i> (2012) para monitoramento em tempo real de imagens espectrais, acima. Abaixo é demonstrada a IHM montada utilizando o <i>LabView®</i> para visualização dos dados, modelagem e controle das câmeras e criação do banco de dados. Adaptado de Wang <i>et al.</i> (2012).	53
Figura 54. Esquema montado por Anjos <i>et al.</i> (2013) para controle de um protótipo robótico multifuncional. Adaptado de Anjos <i>et al.</i> (2013).	54
Figura 55. Esquema montado por Alegria <i>et al.</i> (2009) para monitoramento em tempo real de contaminação de diesel em solos, acima. Abaixo é demonstrada a IHM montada utilizando o <i>LabView®</i> . Adaptado de Alegria <i>et al.</i> (2009).	55
Figura 56. Esquema montado por Tomic <i>et al.</i> (2014) para monitoramento em tempo real da contaminação por gases poluentes em área urbana. Adaptado de Tomic <i>et al.</i> (2014).	56
Figura 57. IHM montada para PC (acima) e para <i>Android</i> (abaixo), por Tomic <i>et al.</i> (2014). Foi utilizado o <i>LabView®</i> para monitoramento em tempo real de poluentes atmosféricos. Adaptado de Tomic <i>et al.</i> (2014).	57
Figura 58. Sonda do FBRM instalada na tubulação do <i>loop</i> de Magalhães <i>et al.</i> , 2014.	59
Figura 59. Esquema didático do processo ótico usado no FBRM. Fonte: Arquivo cedido pela Mettler Toledo.	60

Figura 60. Foto do equipamento, acima, e esquema do OW-201, abaixo. Fonte: arquivo cedido pela <i>Agar Corporation</i>	61
Figura 61. Esquema da unidade móvel proposta para readequar o <i>loop</i> construído por Magalhães <i>et al.</i> (2014).	63
Figura 62. Esquema da infraestrutura de informática proposta por este trabalho.	65
Figura 63. Esquema proposto para o sistema supervisorio.	67
Figura 64. Esquema proposto para a IHM do sistema supervisorio.	69
Figura 65. Foto do equipamento para medição de tamanho de partículas em bancada, Malvern, modelo MasterSizer 2000.	73
Figura 66. Curvas de distribuição de tamanhos providas em tempo real pelo FBRM e em bancada pelo Malvern.	73
Figura 67. Número de partículas e classificação de tamanhos em função da densidade do fluido de perfuração.	74
Figura 68. Fração de água em óleo em função do volume de água adicionado ao tanque.	75
Figura 69. Fração de água em óleo em função da densidade do fluido de perfuração.	76
Figura 70. Foto do <i>loop</i> de fluidos montado por Magalhães <i>et al.</i> (2014), abrigado no LEF, UFRRJ.	77
Figura 71. Foto do interior do container reformado, à esquerda, e seu perfil externo, à direita.	78
Figura 72. Fotos do interior do container com as linhas hidráulicas e sensores instalados.	78
Figura 73. Foto parcial dos novos circuitos de automação produzidos por este trabalho (detalhe no chassi cDAQ e placas modulares), à esquerda. Quadros de proteção e distribuição, à direita.	79
Figura 74. Foto do quadro de automação, à frente, e quadro de inversores de frequência e comandos de luz, ar e exaustor, ao fundo.	79
Figura 75. Foto da câmera interna, acima, e externa, abaixo.	80
Figura 76. Parte do código responsável pela modelagem dos dados de viscosidade.	81
Figura 77. Parte do código responsável pela aquisição de dados dos sensores.	81
Figura 78. Foto da IHM construída para a UMPC.	82
Figura 79. Zoom em “Controle de <i>Software</i> ”.	83
Figura 80. Foto do relatório gerado automaticamente pelo sistema supervisorio construído.	85
Figura 81. <i>Pop up</i> criado para acessar o histórico de viscosimetria e estabilidade elétrica.	86
Figura 82. Zoom em “Controle Operacional – Admissão de Fluidos”.	87
Figura 83. IHM produzida para o <i>PIDDesign</i>	92
Figura 84. Fluxograma do funcionamento do <i>PIDDesign</i>	94
Figura 85. Resultados de vazão volumétrica observada durante manipulação da abertura da válvula de entrada em função do tempo.	96
Figura 86. Fluxograma do funcionamento do algoritmo de auto ajuste contido no <i>software PIDDesign</i>	99
Figura 87. Resultados de vazão volumétrica observada durante manipulação da abertura da válvula de entrada em função do tempo durante teste servo (mudanças de <i>set point</i>).	100
Figura 88. Resultados de vazão volumétrica observada durante teste regulador (mudanças no valor da vazão por interferências externas mantendo-se o mesmo <i>set point</i>).	101
Figura 89. Zoom em “Condição Operacional e Monitoramento do Fluido”.	103
Figura 90. Fluxograma dos algoritmos presentes na seção “Condição Operacional” e “Monitoramento de Fluido”.	106

Figura 91. Cilindros coaxiais do viscosímetro da BROOKFIELD, modelo TT-100, à esquerda. Instrumento montado na UMPC, à direita.....	108
Figura 92. Cilindros coaxiais do viscosímetro da FANN, modelo 35A, à esquerda desmontado. Instrumento montado, à direita.....	108
Figura 93. Fluxograma do algoritmo de administração do viscosímetro TT-100.....	110
Figura 94. Fluxograma do algoritmo de tratamento de dados pós-teste de viscosidade	111
Figura 95. IHM da Viscosimetria em três momentos diferentes durante rotina de operação. ..	112
Figura 96. Acima sistema em detecção de fluido base água, abaixo, sistema em detecção de fluido a base óleo.	116
Figura 97. Fluxograma do algoritmo de autoclassificação dos fluidos	117
Figura 98. Fluxograma do algoritmo de testes de estabilidade elétrica.	118
Figura 99. Zoom na IHM da “Estabilidade Elétrica” e funcionamento.	119
Figura 100. Esquema da lógica disponível para controle da segurança e climatização do container.....	120
Figura 101. Zoom em “Controle do Container”.....	120
Figura 102. Zoom em “Retro lavagem”.....	121
Figura 103. Esquema hidráulico simplificado das linhas hidráulicas da UMPC. Enfoque no sistema de retro lavagem.....	122
Figura 104. Foto das válvulas I e II, acima e respectivamente. Foto da válvula III, abaixo.	123
Figura 105. Foto Bomba instalada para retro lavagem no interior da UMPC.....	123
Figura 106. IHM do <i>software</i> desenvolvido para acessar o histórico de viscosidade aparente.	125
Figura 107. Histórico de viscosimetria obtido a partir dos testes executados durante o dia 17/8/2015 com fluido de perfuração de base aquosa.	126
Figura 108. Histórico de estabilidade elétrica obtido a partir dos testes executados no dia 18/8/2015 com fluido de perfuração de base oleosa.	128
Figura 109. Imagem da tela inicial da IHM criada para uso do usuário no <i>Data Dashboard</i> , rodando em ambiente <i>Android 4.2.2</i> em Tablet, acima. Abaixo uma tela subsequente ao deslizar para o lado no aplicativo.	130
Figura 110. Imagem da tela inicial da IHM criada para uso do administrador no <i>Data Dashboard</i> , rodando em ambiente <i>Android 4.2.2</i> em Tablet, acima. Abaixo uma tela subsequente ao deslizar para o lado no aplicativo.....	131
Figura 111. Usuário conectado ao computador <i>host</i> via <i>Browser</i> de uma PC (acima) e via <i>Browser</i> de um <i>smartphone</i> (abaixo).	132
Figura 112. Fluxograma do tráfego de dados para as duas ferramentas utilizadas para permitir conexão remota de clientes ao computador <i>host</i>	133
Figura 113. Exemplo de programação em <i>Maple</i> ®.	154
Figura 114. Exemplo de programação em <i>LabView</i> ®.	154
Figura 115. Tela do programador, à esquerda, e tela do operador, à direita.	155
Figura 116. Exemplo de programação com mudança em tempo real de parâmetros.	155

Índice de Tabelas

Tabela 1. Componentes adquiridos para construção da infraestrutura de informática.....	66
Tabela 2. Legenda da Figura 83.	93
Tabela 3. Correlações para cálculo de Δ , τ e td	96
Tabela 4. Correlações para cálculo de Kc , τ_i e τ_d	97
Tabela 5. Tabela de frequência praticas pelo FANN e sua respectiva equivalência encontrada para o TT-100.....	107
Tabela 6. Dados técnicos do viscosímetro FANN 35A e BROOKFIELD TT-100	107
Tabela 7. Informações sobre as capacidades de cada ferramenta para conexão remota de clientes à IHM.	129

Nomenclatura

A	Área da seção transversal da tubulação
A_1, A_2, A_3, A_4, A_5	Parâmetros empíricos para regressão
Bu	Varição dos estados estacionários após uma perturbação
d	Diâmetro da tubulação
f	Fator de atrito de Fanning
f_{slot}	Fator geométrico de Rondon <i>et al.</i> (2012)
g	Gravidade
h	Cota de altura da tubulação retilínea de Carlsen <i>et al.</i> (2012)
H	Altura submersa do cilindro sensor de torque
k	Constante elástica da mola ou elemento sensor de torque
K	Índice de consistência
K_c	Parâmetro de sintonia do controlador ligado ao ganho geral do controlador
L	Medida geométrica do viscosímetro de Rondon <i>et al.</i> (2012)
l	Comprimento de tubulação retilínea
m	Massa do fluido de perfuração
M	Magnitude da perturbação
n	Índice de comportamento
n'	Pseudo-índice de comportamento
P_1, P_2, P_3, P_4	Pressões manométricas do aparato de Carlsen <i>et al.</i> (2012)
$P_{v,f}$	Perda por atrito no trecho retilíneo de Carlsen <i>et al.</i> (2012)
Q	Vazão volumétrica
Re	Número de Reynolds
r_1	Raio externo do cilindro interno do viscosímetro
r_2	Raio interno do cilindro externo do viscosímetro
r_0	Medida geométrica do viscosímetro de Rondon <i>et al.</i> (2012)
r_i	Medida geométrica do viscosímetro de Rondon <i>et al.</i> (2012)
S	Salinidade do fluido de perfuração de base aquosa
t_1	Parâmetro de S&K calculado a 35,3% da curva de reação
t_2	Parâmetro de S&K calculado a 75,3% da curva de reação
td	Parâmetro de controle calculado: tempo morto
v	Velocidade do fluido
V	Volume do fluido de perfuração
VC	Variável Controlada
V_e	Abertura da válvula de entrada
VM	Variável Manipulada
V_{bp}	Abertura da válvula de <i>by pass</i>

Letras gregas

α	Medida geométrica do viscosímetro de Rondon <i>et al.</i> (2012)
β	Razão entre os raios dos cilindros coaxiais
γ	Taxa de deformação
Δ	Parâmetro de controle calculado: Ganho do sistema
ΔP	Diferencial de pressão para o viscosímetro de Rondon <i>et al.</i> (2012)
θ	Deflexão angular do elemento de torque do viscosímetro
μ	Viscosidade absoluta dinâmica
μ_{ap}	Viscosidade aparente
ρ ou ρ_{mist}	Densidade do fluido de perfuração
ρ^*	Densidade característica
$\rho_{líq}$	Densidade da fase líquida do fluido de perfuração
$\rho_{sól}$	Densidade média da fase sólida do fluido de perfuração
τ	Tensão de cisalhamento ou constante de tempo do sistema (se aplicado nas equações de controle)
τ_d	Parâmetro de sintonia do controlador ligado à ação derivativa do controlador
τ_i	Parâmetro de sintonia do controlador ligado à ação integral do controlador
Ψ	Fator de correção
ω	Velocidade angular do cilindro externo do viscosímetro

RESUMO

MAGALHÃES, Sérgio da Cruz Filho **UMPC – Unidade Móvel de Pesquisa Científica: um sistema desenvolvido para aferições em tempo real das propriedades físico-químicas de fluidos de perfuração** 2015. 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2015.

Na última década, os processos de perfuração têm experimentado um avanço tecnológico significativo, permitindo que se alcançassem maiores profundidades, maiores produtividades e não obstante uma maior segurança operacional com maior flexibilidade nas operações de perfuração. Um símbolo da perfuração moderna são os poços direcionais, que agregam uma relação custo/benefício, na maioria dos casos, melhor do que os poços convencionais (puramente vertical). Para se perfurar direcionalmente, um conglomerado de ciências e tecnologias de ponta é necessário, desde o desenvolvimento de novos metais até sistemas automatizados de controle de torque e direção. No entanto, é sabido desde os primeiros poços perfurados que a partir de determinada profundidade o uso de fluidos de perfuração é imperativo para a viabilidade do processo inteiro. Os fluidos de perfuração possuem a primordial função de resfriar e lubrificar o sistema sob elevado atrito, executar a limpeza do poço em relação aos cascalhos gerados pela perfuração, exercer pressão sobre a formação rochosa para controle da invasão dos fluidos contidos nas rochas, dar estabilidade estrutural ao poço, dentre outras. Apesar de notória importância, a tecnologia empregada para a aferição e controle das propriedades de tais fluidos permanece a mesma há cinquenta anos. A viscosidade, a densidade, a estabilidade elétrica, a concentração de água em óleo e a concentração de sólidos totais em suspensão são propriedades que estão diretamente ligadas às questões operacionais do poço. Ainda que se tenha o que há de mais moderno para se perfurar, um controle inadequado das propriedades físico-químicas do fluido de perfuração pode comprometer a segurança e a viabilidade do processo inteiro. Neste sentido, este trabalho propôs e construiu um sistema automatizado para aferição remota das propriedades físico-químicas de fluidos de perfuração outrora citados. Os resultados demonstraram que a automação de tais medidas é possível, validadas a partir da comparação direta entre medidas aferidas em tempo real e aquelas aferidas em instrumentos de bancada utilizados nos principais poços de perfuração. O sistema construído possui mobilidade, controle automático das variáveis operacionais, acesso remoto às informações e determina em tempo real viscosidade aparente, densidade, estabilidade elétrica, condutividade elétrica, teor de água em óleo, concentração de sólidos e tamanhos e contagem de partículas em suspensão. O sistema foi testado em ambientes laboratoriais e está pronto para prosseguir para testes em campo.

Palavras-Chaves: Automação, tempo real, perfuração, fluido de perfuração, controle.

ABSTRACT

MAGALHÃES, Sérgio da Cruz Filho **UMPC – Unidade Móvel de Pesquisa Científica: um sistema desenvolvido para aferições em tempo real das propriedades físico-químicas de fluidos de perfuração** 2015. 140p. Thesis (Master in Science, Chemical Engineering). Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, Rural Federal University of Rio de Janeiro, RJ, 2015.

During the last decade, the drilling process has been experiencing considerable technological advances and has achieved deeper wells, better productivity, safety and flexibility during drilling operations. A symbol of modern drilling is the directional drilling, which usually have a better cost/benefit ratio when compared to conventional wells (purely vertical). To drill directionally, a conglomerate of science and state of the art technologies is necessary, starting from new metal design and ending on automated torque control system and steering. However, it is known from the first drilled well that, from a certain depth, the use of drilling fluids is essential to the viability of the whole process. The drilling fluids have the primary function to cool and lubricate the system under high friction, perform cleaning of the well in relation to cuttings generated by drilling, apply pressure on the rock formation to control the invasion of the fluids contained in it and give structural stability. Despite its notorious importance, the technologies used to quantify and control the physicochemical properties of such fluids have not changed over the past fifty years. Viscosity, density, electrical stability, concentration of water in oil and concentration of total solids suspended are properties that are directly related to the operation of the well. Even with the most modern drilling apparatus at disposal, if the properties of the fluid are not adequate, it can harm the entire operation. Thus, this work has proposed and constructed an automated system to remotely measure in real time the physicochemical properties of drilling fluids. The results has shown that it is possible to perform such measurements in such fluids, validated by the direct comparison between real time data and data acquired in standard bench devices. The system built has mobility, automatic control of operational variables, remote access to all information and is capable to determine in real time apparent viscosity, density, electrical stability, electrical conductivity, concentration of water in oil and concentration and size distribution of solids suspended. The system was tested in laboratory environment and it is ready to proceed to field trials.

Keywords: Automation, real time, drilling, drilling fluid, control.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Apesar dos esforços e investimentos em novas fontes de energia, muitas delas renováveis, a queima de combustível fóssil ainda permanece majoritariamente como a opção primária. Tais combustíveis são retirados do petróleo, que, refinado, provê suas frações, conhecidas como gasolina, nafta, óleo diesel, dentre outras (Jones e Pujadó, 2008).

No entanto, extrair petróleo de suas respectivas jazidas subterrâneas não é um processo barato e, no atual mundo globalizado e competitivo, tornar esse processo cada vez mais economicamente viável é fundamental. Em cenários *on shore*, os poços de petróleo podem chegar a centenas de metros, já em cenários *off shore*, até milhares. Isso significa dizer que um conglomerado de ciências e tecnologias é necessário para se atingir os objetivos, além do uso de mão de obra extremamente especializada, significando assim um alto custo operacional. O custo de uma operação *off shore* pode chegar a até R\$ 1,5 milhão por dia (Shaughnessy *et al.*, 2007).

Neste sentido, minimizar custos num cenário onde o espaço para erros é cada vez menor significa melhorar os processos atuais, rever técnicas obsoletas de perfuração com pesquisa científica aplicada e produzir novas tecnologias. Entende-se que a minimização de custos não é necessariamente tornar a extração de petróleo mais barata, mas também ocorre ao aumentar a produtividade em termos de barril/dia e tornar as operações mais seguras (Aadnoy e Bernt, 1996, Waldmann, 2005 e Dias *et al.*, 2015).

Nos últimos dez anos, o setor de *drilling* sofreu um avanço tecnológico significativo. Para aumento da produtividade, novas tecnologias foram criadas e dá-se a ela todo crédito por tal efeito. A perfuração direcional foi um dos principais ícones deste avanço, permitindo que um poço fosse perfurado horizontalmente, e não somente verticalmente, como tradicionalmente era feito. Entrando-se horizontalmente a perda de carga que o petróleo sofre ao deixar a rocha reservatório é muito menor, aumentando a capacidade de extração. Poços injetores, que aumentam a pressão de poros do poço contribuem também para a produtividade, é outro avanço tecnológico recente. Perfurar direcionalmente exige tecnologia para controle automático de torque e de direção do sistema coluna/broca, técnicas que são praticamente impossíveis de serem aplicadas manualmente (Bourgoyne *et al.*, 1991, Aadnoy e Bernt, 1996).

O processo de perfuração está deixando de ser estritamente manual e atualmente já compartilha com *hardware* e *software* suas rotinas. (Oort *et al.* 2011).

O processo de perfuração não engloba somente destruição da formação geológica. A operação envolve inúmeras outras variáveis, como por exemplo, o controle dos fluidos confinados ao longo do caminho, controle da quantidade de cascalhos gerados pela broca, além da lubrificação e proteção das partes mecânicas que estão sob elevados atritos mecânicos. Desta forma, o processo de *drilling* além de envolver tecnologias de gerenciamento de torque, direção, sentido, peso, dentre outras, do sistema coluna/broca,

envolve também o uso de fluidos de perfuração, que é imperativo para tornar a operação viável após certa profundidade (Bourgoyne *et al.*, 1991, Aadnoy e Bernt, 1996).

Será o fluido de perfuração que atuará no controle de invasão dos fluidos da formação para dentro do poço, fará a limpeza dos cascalhos gerados, resfriará e lubrificará o sistema sob atrito, dentre outras funções. No entanto, para que o fluido de perfuração venha atuar devidamente, suas propriedades físico-químicas devem ser mantidas dentro de uma faixa operacional pré-determinada pelo engenheiro responsável pela sonda, levando em consideração fatores como profundidade, tipo de rocha, taxa de penetração na formação etc. (Caenn *et al.* 1996, Apaleke *et al.* 2012, Azar e Samuel, 2007).

Atualmente o controle destas propriedades é estritamente manual. As técnicas de aferição das propriedades mais importantes como reologia, densidade, estabilidade elétrica, teor de água em óleo e concentração de sólidos datam de mais de cinquenta anos e tecnologias para aferição em tempo real destas propriedades praticamente não existem no mercado. Tão importante quanto uma perfuração com tecnologia de ponta é o controle adequado e rápido das propriedades do fluido. Gandelman *et al.* (2013) afirmaram que mesmo o aparato mais avançado de perfuração não garante o sucesso das operações se o controle das propriedades do fluido não for adequado. Quando se compara o avanço tecnológico dos sistemas de perfuração com os avanços no controle de propriedades de fluidos, vê-se uma incongruência.

Neste sentido, este trabalho objetivou produzir um sistema automatizado para monitoramento remoto de determinadas propriedades físico-químicas de fluidos de perfuração como viscosidade aparente, densidade, estabilidade elétrica, condutividade elétrica, teor de água em óleo e concentração de sólidos suspensos. Baseado nas experiências relatadas na literatura, este trabalho produziu um módulo móvel de medição de propriedades de fluido, assim como toda uma infraestrutura de informática para viabilizar suas operações. É esperado que este trabalho contribua para o desenvolvimento de novas tecnologias, novas técnicas e mudanças de cultura acerca do controle das propriedades de fluido, pioneiramente a nível nacional, contribuindo para aumento da produtividade e segurança das operações de perfuração.

1.1. Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira:

- Capítulo I: Introdução ao tema;
- Capítulo II: Revisão Bibliográfica. Publicações científicas na área e afins nas quais este trabalho se baseou;
- Capítulo III: Material e Métodos. Descreve a metodologia, equipamentos, técnicas e ciências utilizadas para se atingir os objetivos propostos;
- Capítulo IV: Resultados e Discussão. Demonstra o resultado que se obteve ao engenho o sistema de monitoramento remoto das propriedades de fluidos de perfuração. Discorre brevemente os resultados típicos que se obtém de cada técnica utilizada e aborda de forma mais contundente o inevitável fato de se ter um sistema supervisorio (em forma de *software*) para viabilizar o funcionamento prático de todo o sistema;
- Capítulo V: Conclusões. Abordam as conclusões sobre o trabalho;
- Capítulo VI: Sugestões para Trabalhos Futuros. Sugestões para continuação dos trabalhos, apontando de forma transparente os possíveis *upgrades* cabíveis;
- Capítulo VII: Referências Bibliográficas. Transcreve as referências completas para consultas.
- Anexos.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução ao processo de perfuração convencional e não convencional

A perfuração de poços de petróleo, numa descrição básica, consiste em destruir a formação geológica acima da rocha reservatório de petróleo, abrindo assim um canal físico entre a jazida e a superfície. Para tanto, é aplicado peso sobre uma broca, que está ligada a uma coluna, que por sua vez está conectado a um sistema produtor de torque que gira todo o sistema broca/coluna (Craft, 1962, Thomas, 2001). Vide Figura 1.



Figura 1. Esquema de um sistema de perfuração (perfuratriz). Fonte: acervo pessoal do autor, adaptado de Halliburton INC.

Com maiores detalhes são demonstrados na Figura 2 (a) e (b) como que este sistema de perfuração atua na destruição geológica, utilizando um fluido de perfuração. Geralmente a broca utilizada possui dentes diamantados e são tricônicas rotativas. As colunas de perfuração possuem vinte e sete metros de comprimento e são interligadas na perfuratriz por meio de rosca com alto torque. Logo, entende-se que a cada vinte e sete metros uma pausa é necessária para adição de mais um vão de coluna. O fluido de perfuração é bombeado por dentro da coluna e sai nos chatos da broca, ascendendo à superfície. Na Figura 2 a) é ilustrado o sistema em rotação para destruição geológica, em b) é ilustrado o avanço da coluna com o uso do fluido de perfuração. O esquema da Figura 2 é representativo de um poço convencional.

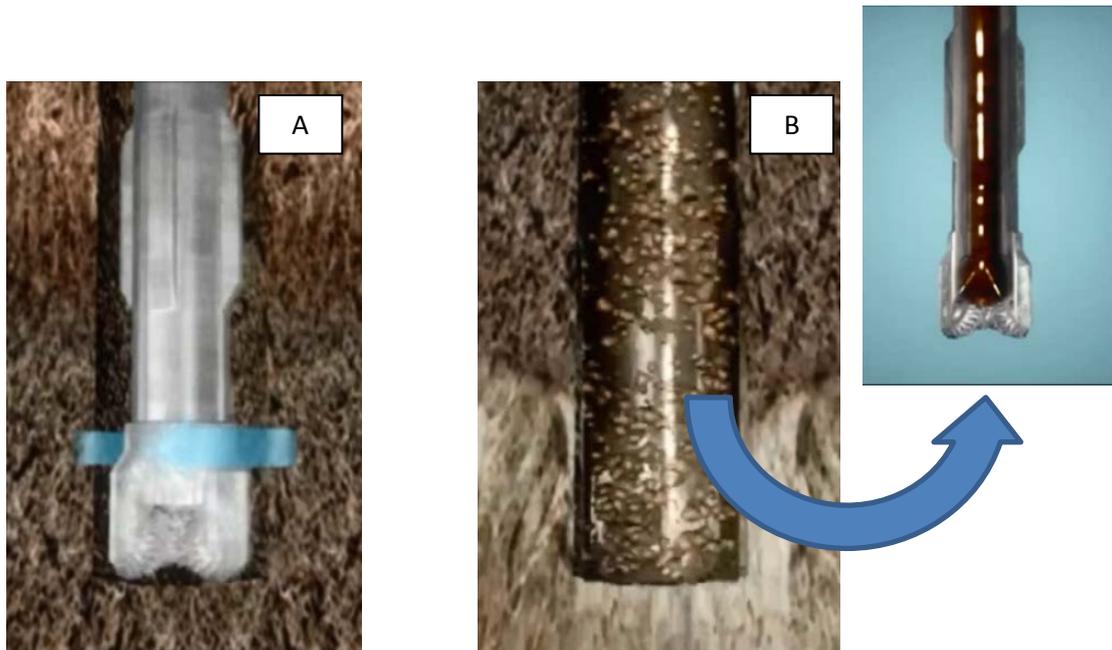


Figura 2. A) Esquema de uma coluna de perfuração e broca. B) Coluna e broca em ação com fluido de perfuração sendo ejetado e produzindo limpeza do poço. Fonte: acervo pessoal do autor, adaptado de Halliburton INC.

Poços convencionais, no Brasil, são aqueles em que não há mudança de direção durante a perfuração, ou seja, a forma geométrica do poço é totalmente vertical. O poço é perfurado em fases, onde cada uma possui um diâmetro distinto, e conseqüentemente seu revestimento adequado. O controle das pressões é por técnica *overbalance*, ou seja, a perfuração é feita mantendo-se a pressão hidráulica de bombeio acima da pressão de poros¹ e abaixo da pressão de fratura². Assim, ao final da perfuração o que se tem é um poço vertical com formato telescópico. Na Figura 3 é demonstrado um esquema de um poço *off shore* convencional completo (Craft, 1962, Thomas, 2001).

¹ Estimativa das pressões nas quais os fluidos das formações se encontram nos poros das rochas ou veios geológicos (lençóis d'água, gases). Caso a pressão hidráulica fique abaixo da pressão de poros ocorrerá a invasão dos fluidos da formação no poço em perfuração. O descontrole pode levar a acidentes fatais.

² Pressão máxima que a formação geológica suporta antes de sofrer ruptura (abertura de fissuras). Esse tipo de dano pode ser reversível ou irreversível, dependendo do tipo de rocha e extensão do dano.

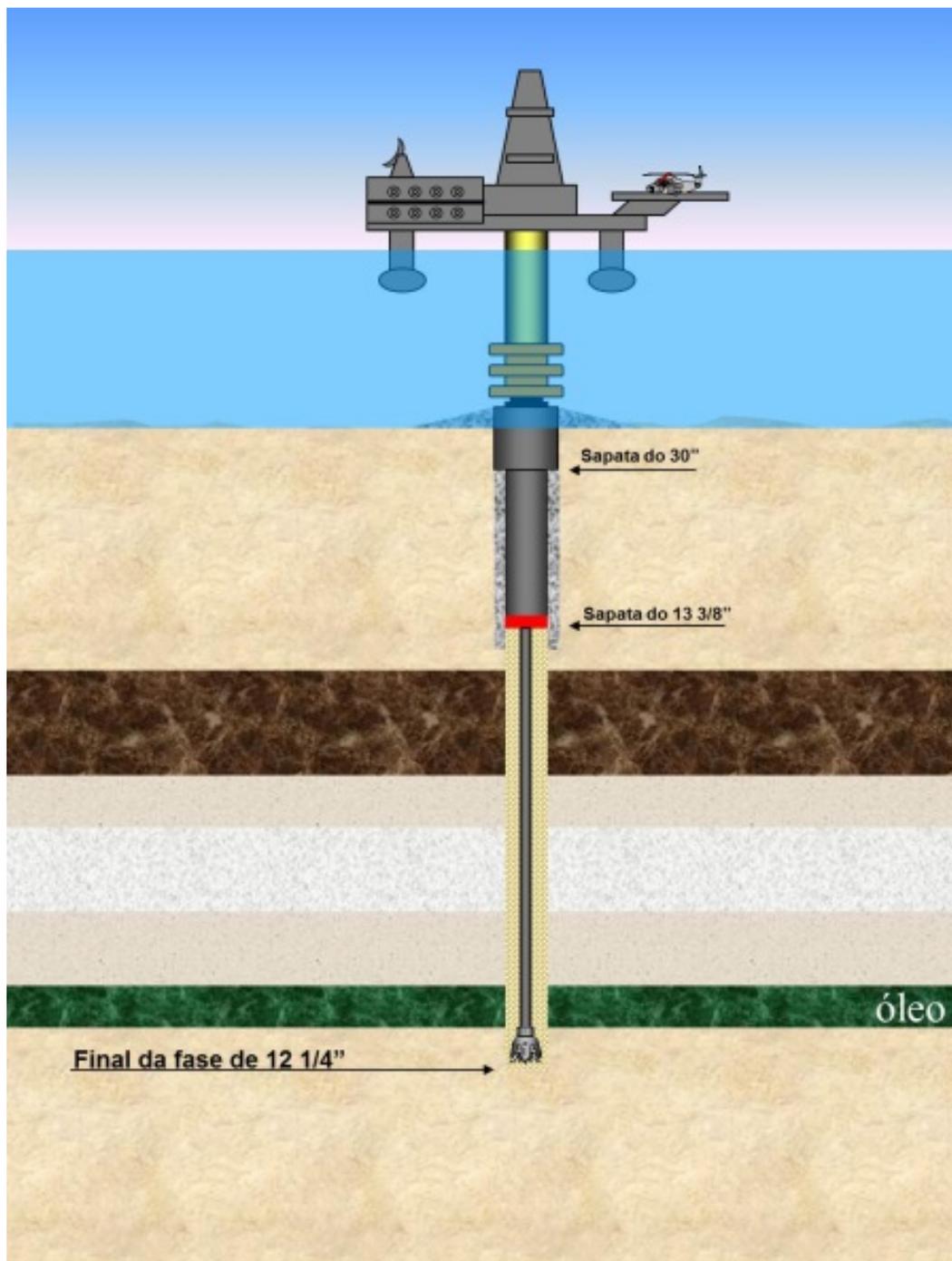


Figura 3. Esquema de um poço convencional *off shore*. Fonte: acervo pessoal do autor, adaptado de autor desconhecido.

Os poços não convencionais são aqueles em que há mudança de direção durante a perfuração. Também é dito não convencional quando se perfura em técnica *underbalance*, em que as pressões hidráulicas no interior do poço podem ou não estar acima da pressão de poros. A principal vantagem da técnica *underbalance* em detrimento a *overbalance* são as taxas de penetração mais elevadas, pois se tem como aliado a saída dos fluidos das formações rochosas, isto diminui a resistência mecânica das rochas. Taxas mais elevadas levam a uma perfuração mais rápida, e quanto mais rápida mais rentável. No entanto, este elemento aliado também é sua principal

desvantagem, pois a todo o momento teria a invasão dos fluidos da formação rochosa para o interior do poço. Desta forma a unidade de perfuração que opera em *underbalance* precisará, além da remoção dos cascalhos, de uma completa unidade de operações unitárias, sendo assim, implicará em mais espaço físico e componentes de segurança adicionais para prevenção de acidentes. A escolha entre uma e outra técnica é um processo de otimização econômica, e deve ser tratado caso a caso, poço a poço. Num cenário *off shore*, onde cada centímetro quadrado é disputado, espaço pode ser um grande limitante.

Os poços direcionais vêm sendo cada vez mais utilizados nas perfurações brasileiras. Uma grande vantagem da perfuração direcional é a área de escoamento que se abre na jazida. Isto implica em menores perdas de carga para o petróleo no momento da extração. Vide Figura 4 em comparação com a Figura 3. Enquanto no poço vertical grande parte do óleo deve escoar pelos poros da rocha até chegar ao canal do poço, no poço direcional este canal se alonga por toda a jazida. Outra função importante do poço direcional é a versatilidade do local de instalação da sonda perfuratriz. Enquanto em um poço vertical a sonda deve estar posicionada acima da jazida, no poço direcional a sonda pode ser posicionada, por exemplo, a quilômetros de distância da jazida (Craft, 1962, Bourgoyne *et al.*, 1991, Aadnoy e Bernt, 1996, Thomas, 2001, Azar e Samuel, 2007). Vide ilustração na Figura 4.

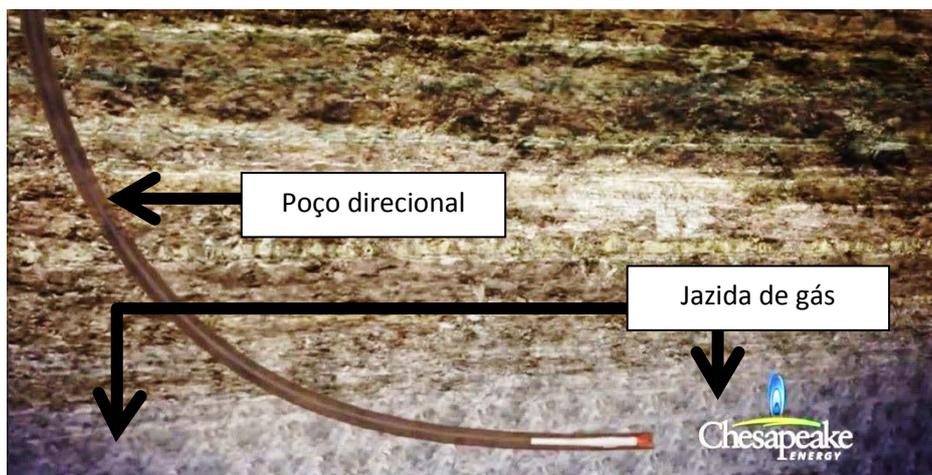


Figura 4. Esquema de um poço direcional *on shore*. Fonte: adaptado de <https://www.youtube.com/watch?v=fBQCQ6HL2Yw>, acessado em 20/07/15.

Em um estudo de caso realizado pela empresa Chesapeake Energy, seis poços direcionais conseguem produzir o correspondente a trinta e dois poços verticais tradicionais, uma vez definida a área de exploração. Vide Figura 5 (a e b).

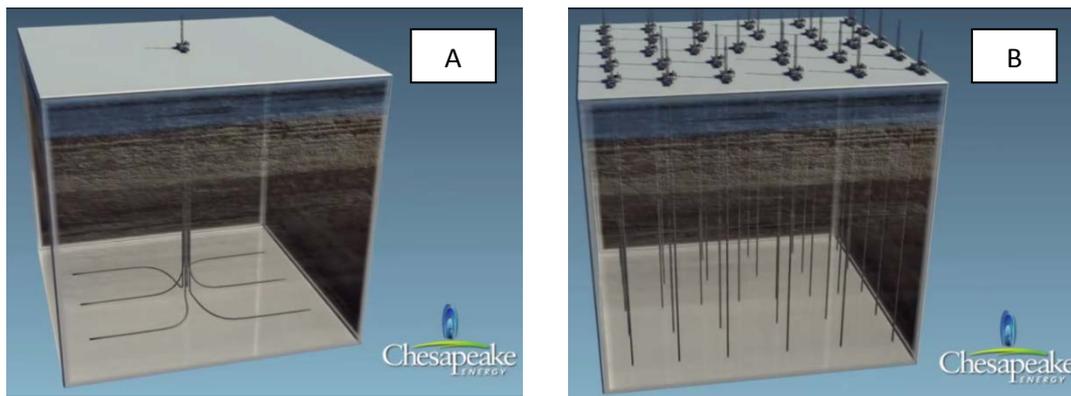


Figura 5. Esquema de um poço direcional *on shore*. Fonte: adaptado de <https://www.youtube.com/watch?v=fBQCQ6HL2Yw>, acessado em 20/07/15.

As operações de perfuração direcional se tornaram realidade quando a tecnologia foi empregada. Estes maquinários contam com: motores direcionais automáticos com controle de torque; guia de posição eletrônico com GPS; sensores de pressão e carga ao longo da coluna e engrenagens hidráulicas controladas remotamente. Porém esta tecnologia sem a inteligência de um sistema supervisor que os administra e interpreta, gerenciado pelo operador, não se traduz em utilidade. Sensores, atuadores, motores, quaisquer que sejam os componentes do *hardware*, são apenas engrenagens para um propósito, e quem dita este propósito é o sistema supervisor, ou simplesmente “o” *software*. É e sempre será necessária uma central de computação de dados que recebe o tráfego dos sensores, o interpreta, o transfere para seus algoritmos de controle e tomada de decisão, e devolve, na mesma linguagem, os comandos que todos os componentes de *hardware* deverão obedecer nos próximos segundos. É um ciclo, *hardware* sem *software* é apenas circuitaria, *software* sem *hardware* é apenas um simulador. Na Figura 6 e Figura 7 pode ser observada uma perfuração direcional sendo controlada pelo sistema supervisor.



Figura 6. Sistema supervisor (1) durante operação de perfuração direcional. Fonte: adaptado de <https://www.youtube.com/watch?v=cl8BBoCV7gU>, acessado em 20/07/15.



Figura 7. Sistema supervisorío (2) durante operação de perfuração direcional. Fonte: adaptado de <https://www.youtube.com/watch?v=cl8BBoCV7gU>, acessado em 20/07/15.

2.2. O fluido de perfuração e suas ações no processo

Independentemente da técnica (*overbalance/underbalance*) ou se o poço é convencional ou não convencional, o fluido de perfuração atua conjuntamente com a broca e a coluna, sendo este bombeado por dentro da coluna e ejetado na broca. A coluna de perfuração na realidade é um tubo hidráulico, com paredes espessas preparadas não somente para aguentar as pressões hidráulicas do bombeio, mas também a transferência da força mecânica até a broca. Vide fotos do acervo do autor em visita a uma sonda brasileira.



Figura 8. Perfuratriz, imagem real, comparação com Figura 1. Fonte: Acervo pessoal do autor.



Figura 9. Colunas de perfuração e detalhe no estabilizador, componente que precede a broca de perfuração. Fonte: Acervo pessoal do autor.

Na Figura 10 as bombas triplex (em azul) são bombas de alta potência, podem atingir até 300 CV, operam em corrente contínua a 780V e possuem eficiência total de até 98%. Cada uma necessita de uma bomba centrífuga de alta vazão para alimentá-las. As pressões de bombeio podem chegar a até 6000 psi.



Figura 10. Bombas especiais que admitem os fluidos de perfuração para dentro do sistema coluna/broca. Fonte: Acervo pessoal do autor.



Figura 11. Amostra de fluido de perfuração. Fonte: Acervo pessoal do autor, adaptado de autor desconhecido.

Estes fluidos são produzidos e estocados em grandes tanques, como mostra a Figura 12.



Figura 12. Tanque de produção e armazenamento de fluido de perfuração. Fonte: Acervo pessoal do autor.

O fluido ao chegar à superfície, segue para o devido tratamento de remoção de cascalhos. Em seguida retorna ao tanque principal (Figura 12) para manter a operacionalidade do processo.

É esperado do fluido de perfuração que ele exerça as seguintes principais funções:

- Resfria e lubrifica imediatamente a broca que está sob elevado atrito;
- Carreia os cascalhos para superfície;
- Exerce pressão hidráulica sobre a formação (*overbalance*);
- Minimiza a invasão de filtrado;

Estas funções devem ser exercidas independentemente da formulação do fluido, já que existem atualmente no Brasil diversas formulações diferentes de fluidos de perfuração. Estes podem ser classificados em dois grandes grupos, os fluidos a base de água e os fluidos a base de óleo (sintéticos).

Os fluidos aquosos geralmente são compostos por água como base, sais solúveis (NaCl, KCl) para aumento da atividade iônica, polímeros para viscosificação primária (GX³ e CMC⁴), argilas organofílicas como viscosificantes secundários (bentonita) e agente obturante⁵, sais insolúveis como adensante (barita ou calcário) e compostos secundários como antiespumantes e bactericidas, por exemplo.

Os fluidos de base sintética se diferem por possuir uma base composta por uma emulsão estável entre uma base orgânica (geralmente parafina ou olefina) e água saturada em NaCl (a saturação é opcional, algumas companhias produzem salmouras de outros sais e em outras concentrações sem ser a saturação total). Obrigatoriamente, por se tratar de uma emulsão, esses fluidos possuem um tenso-ativo primário para diminuição da tensão superficial entre óleo e água, assim como outro tenso-ativo secundário para diminuir a tensão superficial entre os sólidos insolúveis e a fase contínua do fluido (óleo – chamado de emulsão inversa). Os sólidos suspensos são bentonita (agente viscosificantes secundário) e barita (adensante). Este fluido não é compatível quimicamente com os polímeros de viscosificação primária (GX e CMC) e nem com calcário (adensante). Impreterivelmente é usado somente barita como adensante e como viscosificantes primário polímeros a base de ácidos graxos. As proporções da fase emulsionada geralmente variam de 30 a 40% em volume de água (salmoura) na emulsão. Os fluidos sintéticos levam aditivos secundários também, como hidróxido de cálcio e redutores de filtrado.

Os fluidos de base aquosa são mais simples de serem produzidos, mais baratos e biodegradáveis. Já os fluidos de base oleosa são mais difíceis de preparar, pois requerem uma alta energia de mistura, além de não poderem ser descartados na natureza devido a não degradabilidade do componente oleoso da mistura emulsionada. Isto significa custos mais elevados. Apesar de aparentemente inviável, o fluido sintético (emulsão) é largamente utilizado, principalmente em poços de alto risco operacional.

³ Goma Xantana

⁴ Carboxi-Metil-Celulose

⁵ Sólidos para formação de reboco. Este auxilia na estabilidade do poço e no combate à invasão do fluido para a formação rochosa por consequência da técnica *overbalance*.

Os fluidos aquosos possuem uma desvantagem acentuada frente ao fluido sintético: eles variam suas propriedades bruscamente ao longo da operação ao receber intempéries como variação de temperatura, incorporamento de sólidos finos como argilas, invasão de água etc. Como o controle das propriedades do fluido está diretamente ligado ao controle da pressão do poço, é indesejável, principalmente em operações de alto risco, um fluido cuja reologia varie a todo tempo, por exemplo. Os fluidos sintéticos neste sentido são conhecidos por sua estabilidade, uma vez que apresentam variações menos acentuadas de suas propriedades nos cenários elucidados. São operações de alto risco poços cuja janela operacional⁶ é estreita, onde não há margens para erros. Geralmente poços *off shore* ultra profundos apresentam tal característica, já que a janela operacional é inversamente proporcional à profundidade. Quanto mais profundo, menor é a janela. Existem poços na região do pré-sal que chegam a mais de 9000 metros de profundidade (Caenn *et al.*, 1996, Apaleke *et al.*, 2012).

Independentemente se aquoso ou sintético todos os fluidos devem exercer suas ações esperadas e isto só ocorre em detrimento de um controle adequado de suas propriedades físico-químicas. As principais propriedades ligadas ao controle de pressão do poço são viscosidade, densidade, estabilidade elétrica, teor de água em óleo e concentração de sólidos, e atualmente sua aferição é estritamente manual, resumindo-se ao recolhimento de alíquotas para uso em equipamentos de bancada. As principais desvantagens deste método são: as alíquotas geralmente não representam bem o processo, pois existe um tempo mínimo requerido para que os testes sejam executados, a impossibilidade de se distribuir os resultados rapidamente entre os postos de comando e a inviabilidade de se aplicar algoritmos de controle e otimização para uma intervenção mais precoce no processo.

Os fluidos de perfuração tendem a ser viscosos, densos e opacos. Isso sugere que as medições de suas propriedades não são algo trivial. O comportamento reológico de tais fluidos é não Newtoniano⁷, pseudoplástico⁸, apresentando, em geral, tensão mínima para escoamento. Isto exclui uma série de equipamentos disponíveis no mercado.

O adensamento do fluido é primordial para se manter a pressão hidráulica do poço sob controle em momentos em que o fluido está estático (sem bombeio). Isto ocorre, por exemplo, durante a instalação de mais uma coluna para continuar a penetração. Como a pressão de poros aumenta com a profundidade do poço, o único recurso para se aumentar a pressão no interior do poço é aumentar a densidade do fluido.

Os sólidos em suspensão atuam não somente no adensamento do fluido, mas também como agentes obturantes para minimizar a invasão do fluido na rocha reservatório. A técnica *overbalance* consiste em aplicar pressões de bombeio maiores que a pressão de poros, se o fluido de perfuração não possuir estes agentes obturantes,

⁶ Faixa de pressão hidráulica no interior do poço admissível para operação. Seu limite inferior é a pressão de poros e seu limite superior é a pressão de fratura.

⁷ Sua viscosidade varia em função não somente da temperatura, mas também da taxa de deformação a qual a amostra em aferição está submetida.

⁸ A viscosidade aparente diminui seu valor à medida que a taxa de deformação imprimida na amostra aumenta.

uma incontrolada invasão na jazida de petróleo ocorreria, causando problemas ao testemunhá-lo⁹, já que esta jazida estaria com alto grau de contaminação devido ao fluido de perfuração. Já com os sólidos em suspensão, ao encontrar uma parede rochosa, o fluido invade a formação apenas por um curto período de tempo, pois um reboco¹⁰ se forma com permeabilidade significativamente menor que a da formação.

Os sólidos constituintes dos fluidos são mantidos em suspensão justamente devido às características viscosas do fluido, que garantem a sustentação deles e dos cascalhos. Estes sólidos, por sua vez, geralmente inviabilizam instrumentos que possuam partes mecânicas com pequenos orifícios ou que necessitem que o fluido passe por pequenos espaços contendo partes mecânicas móveis. A experiência mostra que ao longo do tempo os sólidos danificam/colmatam/inviabilizam o uso da tecnologia. O fato de ser opaco inviabiliza qualquer técnica ótica. Os fluidos aquosos ainda são mais suscetíveis a medições, pois são polares¹¹, assim sensores resistivos e indutivos funcionam. Os fluidos sintéticos são apolares¹², o que agrava o quadro de possibilidade de sensores já que nem os indutivos e nem os resistivos funcionam neste tipo de fluido (Caenn *et al.*, 1996, Apaleke *et al.*, 2012).

As afirmações acima têm o propósito de demonstrar que os fluidos de perfuração não se aplicam no “*pool*” de empresas de tecnologia que atualmente dominam os mercados de química analítica e de instrumentação de medição, a nível mundial. Tão pouco são alvo de investimentos em tecnologias para aferição em processo em tempo real. O que se tem hoje não mudou significativamente em relação ao que se tinha há 50 anos, que são algumas empresas no mundo produzindo tecnologias de bancada única e exclusivamente para servir a este setor.

Apesar dos equipamentos que hoje servem à indústria petrolífera serem robustos e engenhados para dar bons resultados com um fluido tão complexo e cheio de limitações, estes são dotados de pouca ou quase nenhuma tecnologia, o que justifica este trabalho no sentido de diminuir a distância existente entre aferição e controle (Magalhães *et al.*, 2014).

2.3. O atual estado das técnicas de aferição das propriedades de fluidos de perfuração em bancada.

Atualmente quem produz equipamentos nesta área com mais proeminência são as empresas americanas FANN INSTRUMENTS, OFFITE, CHANDLER E GRACE INSTRUMENTS. Serão demonstrados os equipamentos comercializados da FANN, pois estes são amplamente usados nos poços de perfuração brasileiros.

⁹ Recolher alíquotas para testes laboratoriais para se determinar a qualidade do petróleo.

¹⁰ Também conhecido como torta, surge do processo natural de “filtração” do fluido de perfuração.

¹¹ Conduz eletricidade, apresentam baixa resistividade.

¹² Não conduz eletricidade, apresentam elevada resistividade.

2.3.1. A atual técnica de aferição de viscosidade

Na Figura 13 pode ser observado o esquema do viscosímetro FANN, modelo 35A. Este instrumento é amplamente usado nas sondas de perfuração brasileiras.

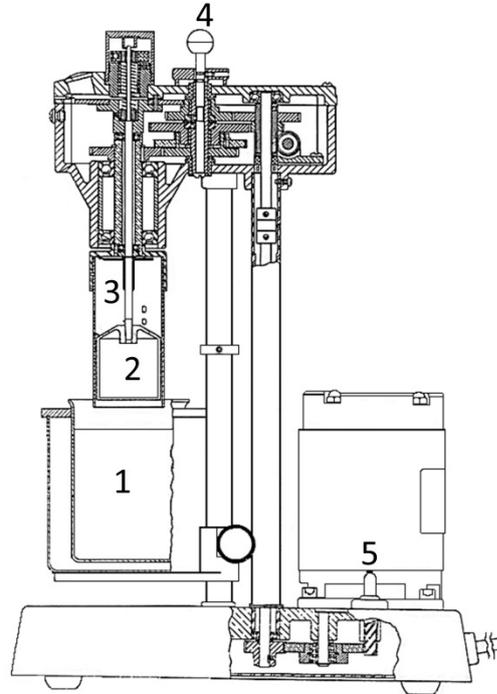


Figura 13. Esquema do viscosímetro FANN 35A. Fonte: adaptado do manual FANN 35A.

O princípio de funcionamento consiste em colocar uma alíquota no copo (1) de aferição, geralmente de 200 a 300 ml são necessários. O próximo passo é subir a base do copo até que os dois furos existentes no cilindro externo (3) sejam totalmente submersos. Manipulando a manopla (5) nas posições “Alta” ou “Baixa” juntamente com a marcha (4) é possível se fazer combinações que geram seis diferentes velocidades de giro no cilindro externo, a saber, 3, 6, 100, 200, 300 e 600 RPM. Cada velocidade imprime uma taxa de deformação diferente. O cilindro externo ao girar, causa uma força de arraste no fluido que está confinado no espaço anular formado entre os dois cilindros. Este arraste movimentava o fluido na direção radial até que o mesmo encontra o cilindro interno, que está ligado a uma mola. Este cilindro começa a flexionar a mola proporcionalmente ao torque causado pelo fluido em movimento. A medição se dá ao ler, *in loco*, o valor de cada deflexão angular, em graus, a cada velocidade correspondente. Para cálculo da tensão de formação, o manual 208878, revisão O, informa a seguinte equação:

$$\tau = 0,51 \times \theta,$$

Equação 1

onde θ ($^\circ$) é a deflexão angular lida no equipamento e τ é dado em (Pa).

Para a taxa de deformação, segue que,

$$\dot{\gamma} = 1,703 \times RPM,$$

Equação 2

onde γ é dado em (s^{-1}).

Alternativamente, segundo Machado (2002), o cálculo da tensão de cisalhamento em qualquer viscosímetro de cilindros coaxiais é dado pela equação:

$$\tau = \left(\frac{k}{2\pi r_1^2 H} \right) \theta,$$

Equação 3

onde k ($N.m^\circ$) é a constante elástica da mola ou do elemento sensor de torque, r_1 (m) é o raio externo do cilindro sensor de torque (cilindro interno), H (m) é a altura submersa do cilindro sensor de torque e θ ($^\circ$) é a deflexão angular sofrida pela mola ou elemento de torque.

O cálculo da taxa de deformação é dado por (Machado, 2002),

$$\dot{\gamma} = \Psi \left(\frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right) \omega,$$

Equação 4

onde Ψ é um fator adimensional de correção, r_2 (m) é o raio interno do cilindro externo (rotor), r_1 (m) é o raio externo do cilindro interno (estator ou sensor de torque) e ω (rad/s) é a velocidade angular do rotor.

O fator de correção visa atenuar os erros de cálculo da taxa de deformação quando se usa a Equação 4 para fluidos não Newtonianos. Machado (2002) afirma que estes erros são causados devido ao perfil não linear de tensões durante o escoamento destes tipos de fluidos. Matematicamente Ψ é dado por

$$\Psi = \left(\frac{\beta^{\frac{2}{n}}}{n \cdot \beta^2} \right) \left(\frac{\beta^2 - 1}{\beta^{\frac{2}{n}} - 1} \right),$$

Equação 5

onde β é uma relação entre raios e n é o índice de comportamento do fluido.

Observa-se que este tipo de equacionamento é válido para fluidos do tipo *Ostwald-de-Waele*¹³.

¹³ Fluidos pseudoplástico ou dilatantes são ditos fluidos de *Ostwald-de-Waele*. Seguem a equação $\tau = K(\dot{\gamma})^n$. Se $n > 1$ dilatante (viscosidade aumenta com a taxa), se $n < 1$ pseudoplástico (viscosidade diminui com a taxa), se $n = 1$, fluido newtoniano (viscosidade constante com aumento ou diminuição da taxa).

Frequentemente vê-se em manuais de viscosímetros a omissão deste termo, que implica em $\Psi = 1$, logo se assume fluido com comportamento Newtoniano (Equação 2). O equívoco ocorre quando se usa esta suposição na análise de fluidos não Newtonianos. A taxa para fluidos não Newtonianos é dependente do índice de comportamento do mesmo e da geometria do equipamento.

Atualmente muitos trabalhos usam β para representar o “gap” ou região anular de medição como

$$\beta = \frac{r_2}{r_1}.$$

Equação 6

Machado (2002) argumenta que quanto mais próximo de 1,00 for o valor de β , menos pronunciado é o erro proveniente da não linearidade dos fluidos não Newtonianos no cálculo da taxa de deformação.

Para encontrar o índice de comportamento do fluido antes de realizar a reologia do fluido, a aproximação comumente utilizada por trabalhos é

$$n = n' = \frac{d \ln(\tau)}{d \ln(\omega)}.$$

Equação 7

A Equação 7 representa o coeficiente angular da reta formada entre o logaritmo neperiano da tensão em função do logaritmo neperiano da velocidade angular.

Alguns trabalhos demonstram métodos alternativos para cálculo do índice de comportamento, mas são computacionalmente complicados quando comparados com a simplicidade de cálculo da Equação 7. Cabe avaliar o custo benefício da dualidade erro x esforço computacional (Billon, 1996).

2.3.2. A atual técnica de aferição de densidade

A atual técnica de medição de densidade de fluidos de perfuração é baseada no equilíbrio entre dois pesos, de um lado o peso da amostra de fluido e do outro uma escala graduada e calibrada. O esquema do equipamento pode ser visto na Figura 14. Este equipamento recebe o nome de balança de lama, e possuem dois modelos, o pressurizado e o sem pressão. Geralmente o modelo pressurizado permite, por meio de um êmbolo, que o usuário injete sob pressão o fluido na câmara, diminuindo os erros por aprisionamento de ar.

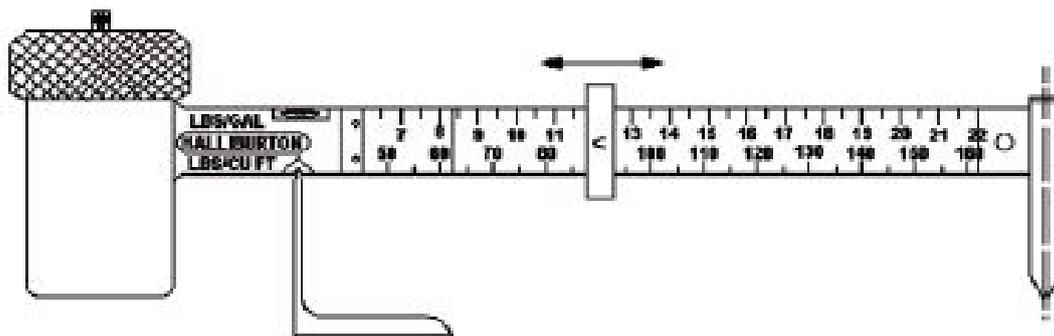


Figura 14. Esquema do densímetro “balança de lama pressurizada”. Fonte: Adaptado do manual FANN *Pressurized Mud Balance*.

Após o preenchimento da câmara, à esquerda, o usuário completa o volume restante com o êmbolo que se encaixa na parte superior da câmara. Em seguida, o usuário deve deslizar a barra até obter o perfeito equilíbrio entre o peso da balança e o peso da amostra, observando o medidor de nível na parte superior da peça. Estabelecido o equilíbrio, lê-se diretamente na escala graduada o valor de densidade (Manual 100063065, revisão J).

2.3.3. A atual técnica de aferição de estabilidade elétrica

Os fluidos sintéticos, como comentado anteriormente, são compostos em que sua fase líquida é constituída por uma emulsão de água em óleo. Geralmente as bases orgânicas são parafinas ou olefinas. As proporções entre ambos variam de 60/40 a até 70/30 (óleo/água). Como as emulsões desta natureza são termodinamicamente instáveis, é necessário um agente externo para mantê-las estáveis. Geralmente usa-se tenso-ativos com afinidade ao óleo. Segundo a literatura, a fase contínua da emulsão será aquela na qual o tenso ativo tem maior afinidade química (Salager, 1999).

A estabilidade de uma emulsão é a estabilidade cinética das gotículas de água dentro das micelas de óleo. As micelas são formadas por adsorção, e se a fase contínua é o óleo, a fase polar está orientada para dentro da micela e a apolar para fora. Basicamente uma emulsão é dita estável do ponto de vista cinético quando suas gotículas de água não sofrem coalescência devido ao seu choque, fruto do próprio movimento molecular. A coalescência leva as gotículas a se juntarem e formarem gotas maiores, que posteriormente levam à formação de duas fases, descaracterizando a emulsão (Auflem, 2002).

Uma emulsão estável pode permanecer até mesmo anos sem coalescer, já uma emulsão instável pode coalescer em questão de minutos, ou até mesmo segundos. Como avaliar, usando técnicas viáveis em campos de perfuração, se um fluido sintético está estável? A técnica amplamente utilizada é baseada no princípio de rigidez dielétrica do fluido (Growcock *et al.*, 1995).

O teste consiste em aplicar um diferencial de tensão senoidal entre dois eletrodos de geometria e espaçamento conhecidos, e à medida que este potencial aumenta, a intensidade do campo elétrico começa a provocar rearranjos espaciais no seio do fluido.

Estes rearranjos dependem intrinsecamente dos componentes presentes nos fluidos de perfuração. Como este teste é tipicamente aplicado em fluidos sintéticos e estes possuem alta carga de barita, Growcock *et al.* (1995) afirmam que, neste caso específico, existe um momento em que a intensidade deste campo elétrico é suficiente para reorientar as partículas polarizadas de barita até a formação de uma ponte condutora entre um eletrodo e outro. Quando isto ocorre é provido um meio físico para a transposição da corrente elétrica, que aumenta de intensidade exponencialmente e assintoticamente em $61\mu\text{A}$.

Em suma, o que o teste se propõe a prever é a tensão necessária para romper a rigidez dielétrica do fluido (seja por reorganização dos sólidos, em presença de barita, ou por reorganização das gotículas de água e argila, em ausência de barita). A ideia é que quanto maior a rigidez dielétrica, melhor blindada está a fase dispersa (água) e/ou melhor adsorvido está o sólido na estrutura micelar. Pela natureza do teste, entende-se que o mesmo é aplicável somente em fluidos sintéticos.

O equipamento utilizado para o teste em bancada é o FANN 23D, cujo esquema técnico não foi disponibilizado pelo fabricante, no lugar foi colocada uma foto demonstrativa do equipamento.



Figura 15. Foto do medidor de estabilidade elétrica FANN 23D. Fonte: Adaptado do manual FANN 23D.

O procedimento para o teste é simples. De posse de uma alíquota em qualquer reservatório, basta submergir a sonda totalmente no fluido e apertar o botão “test”. Uma crescente voltagem alternada¹⁴ a 340Hz, cuja amplitude aumenta à taxa de 150V/s, é aplicada. Quando a corrente chega ao valor limite o *display* interrompe a curva mostrando o último valor, sendo este o valor de estabilidade elétrica. Este valor representa a voltagem que foi necessária para se transitar uma corrente elétrica de intensidade de 61 micro amperes.

¹⁴ O equipamento provê valores do pico positivo da onda, e não o RMS (*Root Mean Square*).

Para o teste, o fluido deve estar impreterivelmente parado. Velocidades relativas não nulas entre fluido e sonda podem ocasionar desvios nos valores de estabilidade elétrica. Geralmente quanto maior a velocidade relativa maiores são os valores de tensão elétrica necessária (Manual 102149576, revisão B).

2.3.4. A atual técnica de aferição de teor de água em óleo e concentração de sólidos

Falar em teor de água em óleo é determinar que o teste é específico para fluidos de base sintética, já a concentração de sólidos é válida para ambos os tipos de fluidos. Apesar de serem duas aferições distintas, são obtidas no mesmo equipamento durante o mesmo teste. A viscosidade aparente do fluido e a razão água em óleo estão diretamente ligadas entre si. A concentração de sólidos se relaciona com a densidade, e menos pronunciadamente com a viscosidade. Uma perturbação na viscosidade aparente do fluido pode ser explicada a partir de resultados do teor de água em óleo, assim como uma perturbação na densidade pode ser explicada a partir de resultados da concentração de sólidos suspensos. Impreterivelmente, nos fluidos sintéticos de mistura água/parafina, a incorporação de água aumenta a viscosidade aparente, diminui a densidade e a concentração de sólidos, assim como a estabilidade elétrica. A adição de emulsificante aumenta em geral a estabilidade, assim como um aumento na concentração de sólidos também a aumenta, que por consequência eleva a densidade. Todos os testes são complementares entre si, e todas as propriedades intrinsecamente dependem uma das outras. Na Figura 16 pode ser observado um esquema do equipamento, denominado Quite Retorta.

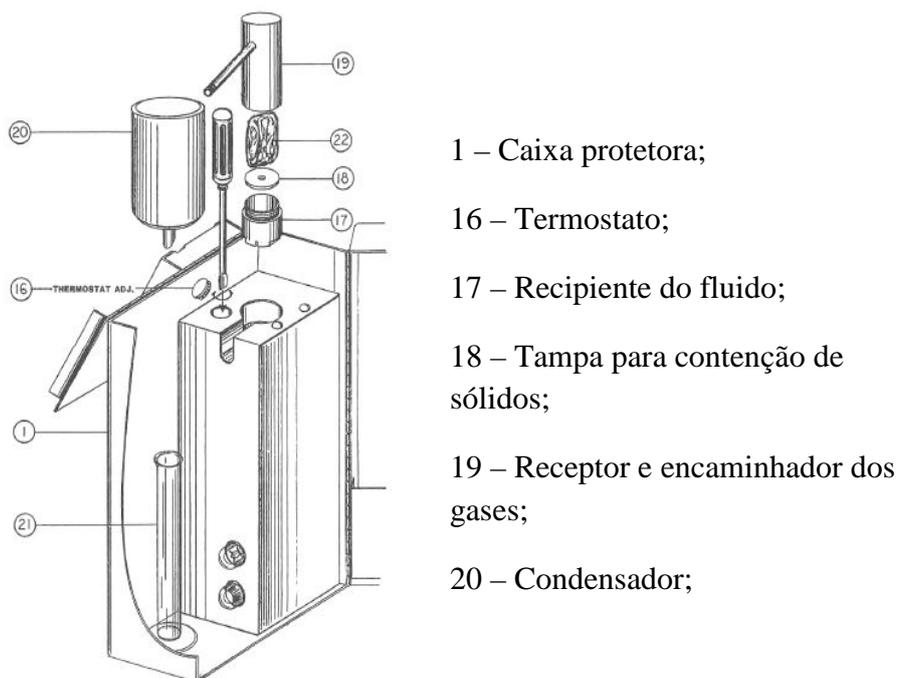


Figura 16. Esquema do equipamento da FANN Quite Retorta. Adaptado do manual do FANN Retort Kit.

O procedimento consiste em obter uma alíquota de 10 ml de fluido de perfuração e depositá-la no compartimento próprio (17). Depois de depositado o fluido, deve-se colocar o tampão (18) pressionando-o para baixo até que parte do fluido seja ejetada pelo orifício, garantindo que não haja ar. A certeza de que 10 ml foram colocados ali é fundamental para o posterior cálculo do teor de sólidos.

Em seguida é colocada palha de aço dentro do condutor de gases (19). Esta palha funciona como um filtro para retenção de possíveis sólidos que são carreados com os gases no momento da destilação. Com os aparatos (17, 18, 22 e 19) prontos, enrosca-se o condensador 20 no conjunto, bem como se coloca a proveta (21) em seu devido lugar para receber o fluido condensado. Após, regula-se o termostato (16) para a temperatura adequada (varia de fluido para fluido, geralmente base sintética requer 282°C). Nos próximos minutos ocorre o aquecimento da alíquota de 10 ml, que em geral, se vaporiza por completo após 30 minutos de teste. Este vapor (água + óleo) é levado até o condensador que conduz as fases agora liquefeitas para dentro da proveta. Com o auxílio de algumas gotas de tenso ativo na proveta para aumentar a tensão superficial entre água e óleo e facilitar a leitura do menisco, é possível se calcular a fração de água no volume total. Já que a vaporização proporciona a quebra da emulsão estável, que após condensação, formam duas fases distintas na proveta.

No compartimento de 10 ml sobrarão todos os sólidos que estavam suspensos, mais sais de cloreto¹⁵ e uma massa inexpressível de emulsificante. Por técnica gravimétrica¹⁶ é possível se obter a concentração de sólidos. Uma vez que se é previamente conhecido o grau de saturação dos sais de cloreto na fase aquosa da emulsão (Manual 210445, Revisão E).

É possível perceber que no estado da arte atual, todas as técnicas utilizadas são impreterivelmente manuais, e nesta conjuntura é impossível se pensar em automatização do controle das propriedades dos fluidos de perfuração. No entanto, tais técnicas geram resultados que são base para tomadas de decisão durante as operações. Assim, este trabalho almejou buscar as mais recentes publicações tecnológicas que trazem algum nível de comparação entre medidas em tempo real com medidas feitas utilizando as técnicas em bancada. Uma vez que o primeiro passo para o controle de tais propriedades é aferi-las em tempo real.

2.4. O atual estado das técnicas de aferição das propriedades de fluidos de perfuração em tempo real.

Não existem trabalhos divulgados por grupos brasileiros, este trabalho é pioneiro no país em desenvolver um sistema automatizado para aferições em tempo real das propriedades de fluidos de perfuração.

Em termos mundiais, um dos trabalhos mais relevantes nesta área é desenvolvido na Noruega, por um grupo de pesquisa que está inserido em um consórcio tecnológico

¹⁵ Geralmente a fase aquosa da emulsão é saturada em NaCl.

¹⁶ Consiste em aferir a massa do sistema alíquota + compartimento antes e depois da vaporização, por subtração obtém-se a massa de sólidos seco.

entre várias empresas e universidades. Este grupo, cujo trabalho foi divulgado por Saasen *et al.* (2009), desenvolveu uma série de sensores *in*¹⁷ e *at*¹⁸ *line* para aferir remotamente as seguintes propriedades de fluidos de perfuração:

- Viscosidade – Aferição da viscosidade em diferentes taxas de deformação;
- Densidade – Aferição da massa total e do respectivo volume que ela ocupa;
- Estabilidade Elétrica – Aferição da tensão necessária para se atingir 61 micro amperes;
- Volume de filtrado – Aferir o volume de líquido após o fluido ser submetido a uma filtração estática a alta pressão e temperatura;
- pH – Medição do teor íons H⁺ livres em fluidos a base aquosa;
- Concentração de H₂S – Detecção deste gás;
- Tamanho de partículas e caracterização – Aferir o tamanho das partículas e contagem;
- Concentração de sólidos – Aferir a concentração de sólidos;
- Análise de conteúdo de cascalhos – Determinação da morfologia dos sólidos;

O objetivo dos autores é tornar a perfuração um processo automatizado como um todo, e afirmam categoricamente que para se chegar a tal é fundamental que as propriedades dos fluidos sejam aferidas em tempo real e remotamente. O primeiro esquema do aparato experimental pode ser visto na Figura 17.

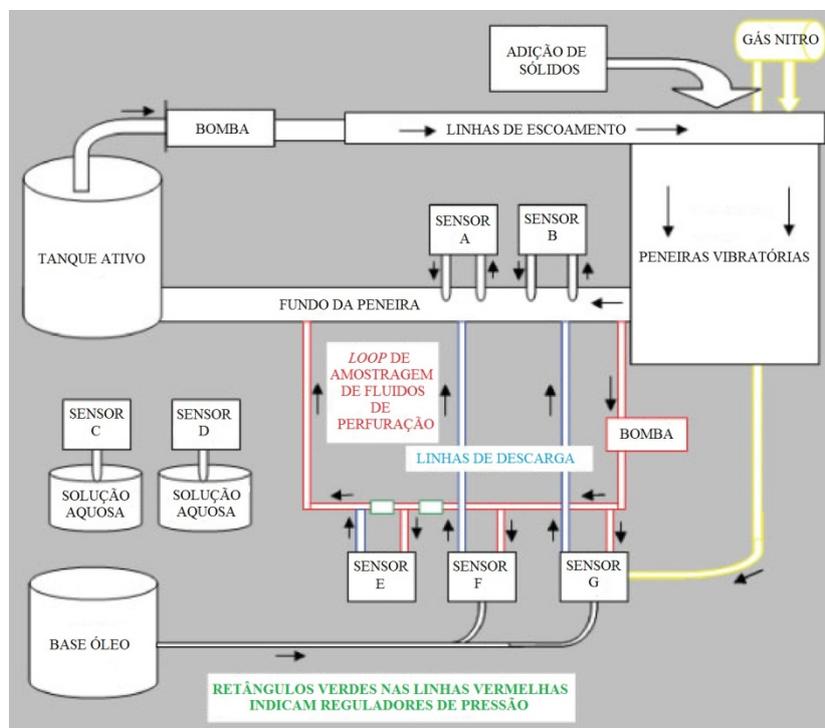


Figura 17. Primeiro esquema da unidade experimental construída no *Cubility Test Center*. Fonte: adaptado de Saasen *et al.* (2009).

¹⁷ Sensores que são inseridos diretamente na tubulação.

¹⁸ Sensores que são postos próximos à tubulação recolhendo alíquotas de tempos em tempos

Nesta primeira parte do aparato, os autores possuíam um tanque com fluido sintético, o qual alimentava parte do sistema. Existiam tanques para sensores que só se aplicavam a fluidos aquosos e um tanque com cascalhos para simular os sólidos provenientes da perfuração. O sensor E é a estabilidade elétrica, o sensor F o medidor de tamanhos de partículas (PSD – *Particle Size Distribution*) e o G o sensor de volume de filtrado. Os sensores C e D são, respectivamente, o sensor de pH e detecção de H₂S, ambos aplicáveis somente a fluidos a base de água. O sensor A é o viscosímetro e o sensor B o densímetro. Um segundo esquema é demonstrado com mais detalhes sobre o sistema de caracterização de sólidos.

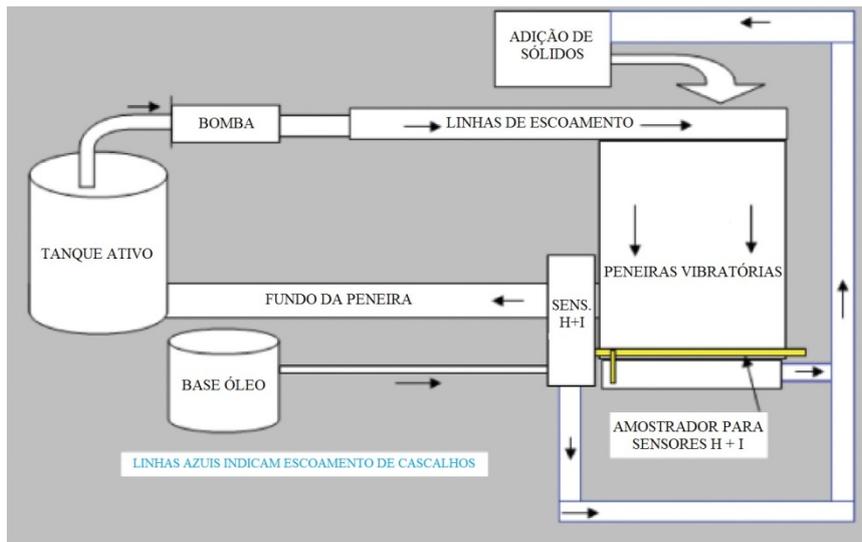


Figura 18. Segundo esquema da unidade experimental construída no *Cubility Test Center*, detalhes sobre o sistema de caracterização de sólidos. Fonte: adaptado de Saasen *et al.* (2009).

Neste esquema da Figura 18, com foco nos aparatos de caracterização de sólidos, pode ser visto aonde foram instalados os sensores H, I e J. São eles o sensor de morfologia dos sólidos, mineralogia e sensor de vazão de sólidos.

Para a viscosidade os autores utilizaram um viscosímetro de cilindros coaxiais, já que esta técnica de medição é a mais adequada vista a alta carga de sólidos e comportamento não Newtoniano dos fluidos. Os autores afirmam que outras técnicas como garfos vibrantes não atenderiam aos requisitos técnicos. Os cilindros coaxiais, além de permitirem a avaliação em várias taxas, o que o garfo vibrante não permite, utiliza a mesma técnica que o instrumento de bancada. O texto deixa implícito que os autores modificaram o projeto original do equipamento para permitir total automação do instrumento. No entanto, não apresentaram comparação entre os dados obtidos em tempo real e os dados obtidos em viscosímetros de bancada. Nos mesmos gráficos os autores demonstram resultados de medição em tempo real de densidade utilizando técnica de medição de força de Coriolis. A escolha desta técnica é quase universal, e os autores afirmam que esta técnica é a que produz os resultados mais precisos, além de os instrumentos não apresentarem limitações em termos de operacionalidade com carga de

sólidos ou tipo de fluido (aquoso/sintético). A Figura 19 demonstra um resultado típico obtido pelos autores.

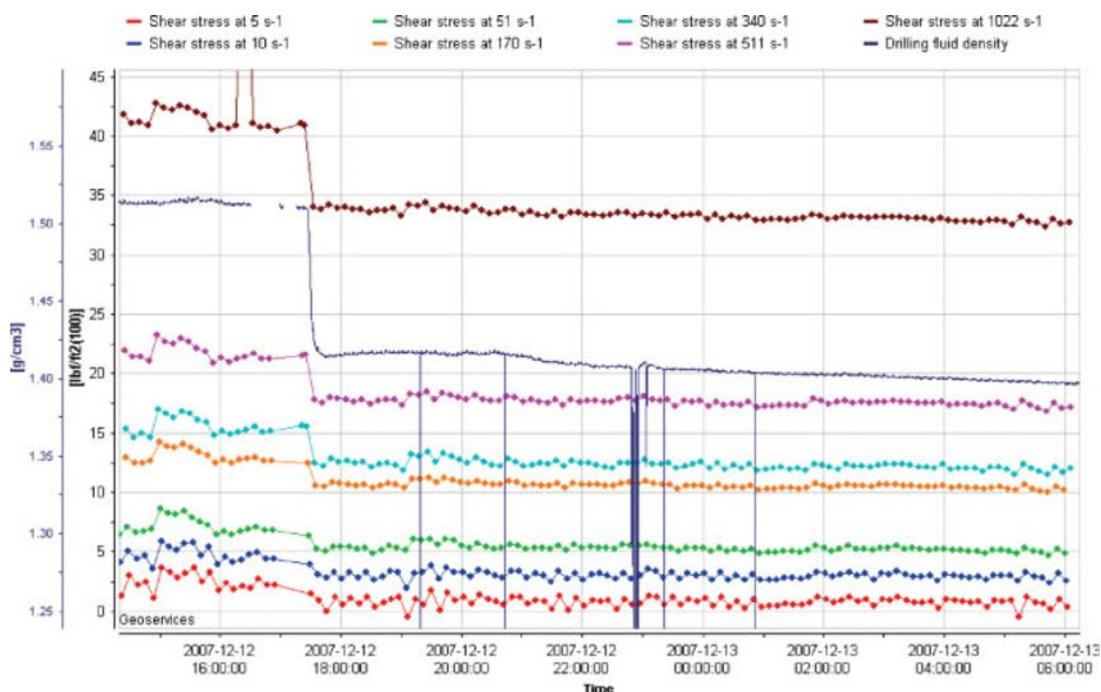


Figura 19. Resultados em tempo real de tensão cisalhante (sistema inglês) e densidade (sistema inglês) obtidos por Saasen *et al.* (2009), em função do tempo absoluto. Fonte: adaptado de Saasen *et al.* (2009).

Apesar dos autores comentarem em seu texto que as viscosidades aferidas a partir das tensões demonstradas na Figura 19 foram similares àquelas obtidas em viscosímetro de bancada, estes últimos não foram demonstrados. No gráfico da Figura 19 apenas constam os resultados *in line*. É possível observar que às 17:00 tanto a densidade quanto as tensões aferidas nas diferentes taxas sofrem um decréscimo, consequência da adição de uma amostra de Premix¹⁹. As abruptas quedas na densidade em momentos distintos não foram comentadas. No entanto, é possível verificar que os autores obtiveram leituras de tensões estáveis em tempo real ao longo de várias horas de operação.

Foram relatados alguns problemas operacionais envolvendo o viscosímetro. Afirmam os autores que após certo tempo ocorreu acúmulo de sólidos no interior da câmara de medição, o que levou à criação de uma rotina de auto limpeza programada. Não foram relatados problemas operacionais com o medidor Coriolis (densímetro). Não há fotos nem esquemas mencionados a respeito destes dois medidores.

Para o sensor de estabilidade elétrica os autores desenvolveram um protótipo para leituras desta grandeza em tempo real. Pela peculiaridade e especificidade do teste não existe a nível mundial um equipamento projetado para testes em tempo real. O protótipo dos autores pode ser visto na Figura 20. O esquema técnico não está disponível.

¹⁹ Nome comercial para um aditivo constituinte do fluido sintético.

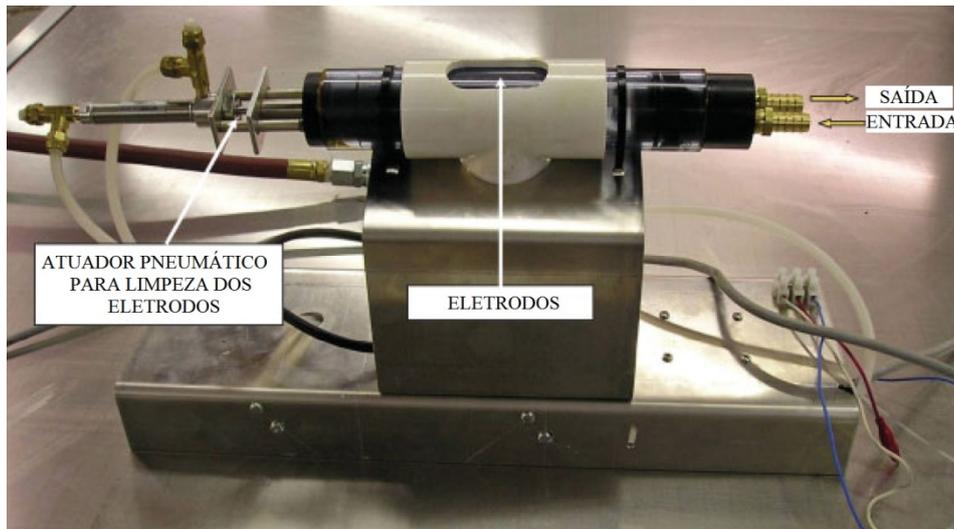


Figura 20. Foto do protótipo de estabilidade elétrica criado por Saasen *et al.* (2009).
 Fonte: adaptado de Saasen *et al.* (2009).

O protótipo é constituído por uma câmara, eletrodos e um sistema de auto limpeza. O fluido é admitido na entrada *Mud in* e após o teste deixa a câmara pela saída *Mud Out*. Os parâmetros do teste seguem os mesmos descritos pelo teste de bancada. Os resultados obtidos pelos autores podem ser observados na Figura 21.

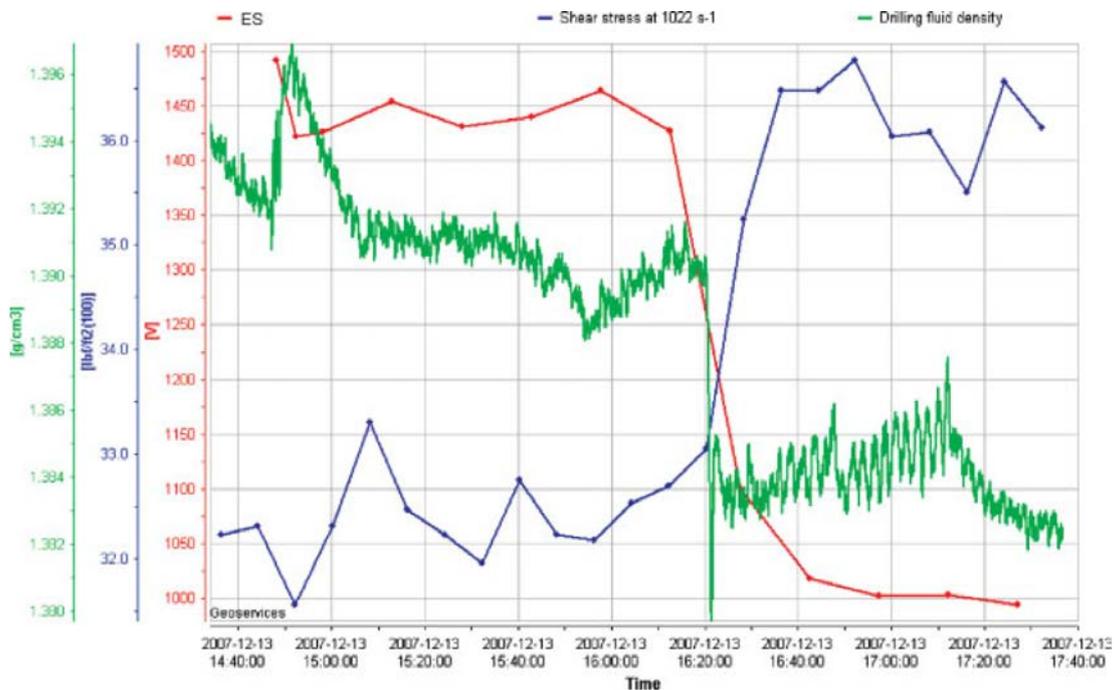


Figura 21. Resultados em tempo real de estabilidade elétrica, densidade e tensão de cisalhamento à 1021 s^{-1} obtidos por Saasen *et al.* (2009), em função do tempo absoluto.
 Fonte: adaptado de Saasen *et al.* (2009).

Durante este teste, os autores mediram continuamente a estabilidade elétrica, a densidade e a tensão cisalhante a 1021 s^{-1} . Num dado momento, foi adicionado ao sistema 200 litros de água ao fluido sintético. Os autores observaram um decréscimo na

estabilidade elétrica, assim como na densidade, e um aumento da tensão cisalhante que significa um aumento na viscosidade aparente. Os resultados demonstraram coerência nas tendências e respostas frente à entrada de água. É esperada a diminuição da concentração de sólidos, logo a densidade impreterivelmente deve diminuir. O aumento da razão de água em óleo facilita a formação da ponte condutora no momento da quebra dielétrica do fluido, uma vez que mais gotículas de água estão disponíveis no sistema. Assim, a estabilidade elétrica também impreterivelmente deve diminuir com o aumento da concentração de água.

A água, nos sistemas emulsionados, é a fase dispersa da emulsão, o óleo a fase contínua. Ao entrar no sistema, sob agitação, a mesma imediatamente se dispersa em forma de gotículas e são adsorvidas na estrutura micelar. Quanto maior for a energia de mistura, menor tendem a ser as gotículas, levando à formação de uma emulsão mais estável. Desta forma, a entrada de água tem uma resposta inversa, ao invés de se diminuir a viscosidade, ela a aumenta. Neste caso específico, de emulsões água/parafina, quanto mais água mais viscoso é o fluido. O contrário é válido, quanto se adiciona parafina ou olefina ao sistema, menos viscoso ele fica. Isto pode ser explicado justamente na adsorção da mesma. A água não permanece livre no sistema, a adsorção dificulta o movimento molecular, o que causa uma maior dificuldade de escoamento, sendo o aumento da viscosidade apenas o reflexo macro deste arranjo na escala micro.

Logo, é também impreterível que a adição de água aumente a tensão de cisalhamento²⁰.

Apesar do sucesso da medição em tempo real e das tendências qualitativas estarem coerentes, não há menção à comparação destes valores com aqueles obtidos em instrumentos de bancada.

Os autores reportaram problemas operacionais envolvendo o protótipo. Problemas da ordem de escoamento ineficiente e incrustações, o que levou o instrumento a exigir constantes intervenções. Possíveis modificações futuras foram apontadas.

Dentre as propriedades restantes que Saasen *et al.* (2009) mediram, a concentração de sólidos é a última propriedade correlata com este trabalho. As medições de pH, mineralogia, morfologia, caracterização de partículas e volume de filtrado não serão abordados no escopo deste trabalho. No entanto, este trabalho abordará medições de teor de água em óleo em tempo real, propriedade esta que não foi abordada por Saasen *et al.* (2009).

Concernente à concentração de sólidos, os autores utilizaram técnicas de raios X. Segundo eles, foram necessárias calibrações especiais para melhorar a precisão das medições. Foram testadas duas calibrações, uma considerando fatores de fábrica e outra considerando que a fase sólida se comporta com as propriedades da barita. Essa última hipótese é razoável uma vez que os fluidos sintéticos possuem alta carga de barita. Comparativamente, a quantidade de barita frente aos outros sólidos constituintes (sais solúveis e bentonita) superam 95% em massa. Na Figura 22 podem ser observados os

²⁰ Entenda-se que taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), tensão cisalhante (τ) e viscosidade aparente (μ_{ap}) se relacionam pela lei de Newton generalizada: $\tau = \mu_{ap} \cdot \dot{\gamma}$

resultados obtidos pelos autores para monitoramento em tempo real da concentração de sólidos.

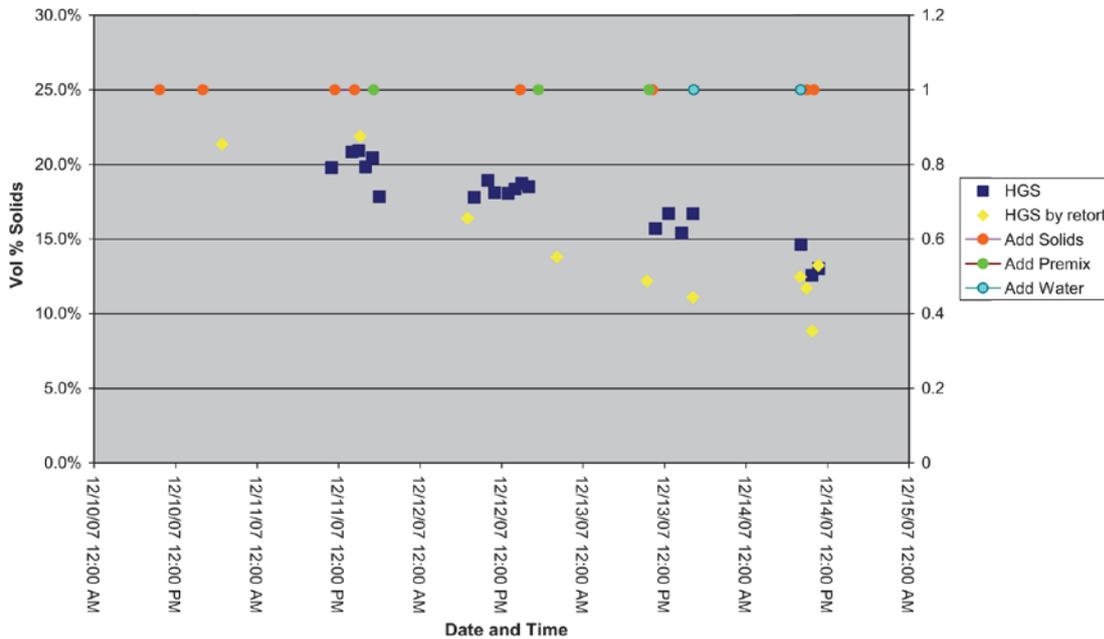


Figura 22. Resultados em tempo real de concentração de sólidos obtidos por Saasen *et al.* (2009), em função do tempo absoluto. Fonte: adaptado de Saasen *et al.* (2009).

Para este teste foi demonstrado à comparação direta entre a medida em tempo real (HGS em azul) e medida de referência (HGD em amarelo), utilizando o *Kit* Retorta anteriormente mencionado. Os autores conseguiram monitorar com sucesso a concentração de sólidos, porém existem desvios entre medidas em tempo real e as medidas de referência. As possíveis causas para estes desvios são comentadas pelos autores. Residem nas questões de calibração do equipamento, na complexidade da fase sólida e nos erros experimentais associados à técnica de bancada.

Como conclusão dos trabalhos desenvolvidos pelo Saasen *et al.* (2009), os autores apontam que, de fato, existem ainda muitas deficiências e desafios a serem vencidos para tornar o controle das correções dos fluidos automatizado. O primeiro passo é desenvolver uma malha sensorial que possa ser robusta o suficiente para suportar os ambientes inadequados para eletrônicos nas sondas de perfuração e que produzam resultados confiáveis. Eles apontam que somente uma rede integrada de *hardware*, *software* e engenheiros serão capazes de vencer os desafios, além de uma profunda mudança nos costumes e culturas que hoje determinam as tomadas de decisões operacionais. Ratifica-se a importância deste entendimento de que o avanço tecnológico tem que vir acompanhado de uma reestruturação cultural observando-se a afirmação dos autores em sua conclusão:

“Tradicionalmente, a equipe responsável pelas operações na sonda está diretamente ligada com o sucesso e segurança das operações de perfuração; no entanto, medidas em tempo real permitiriam a possibilidade, por exemplo, de realocar os engenheiros de fluido de perfuração para um centro de apoio on shore. Será isto desejável? Ou o centro de apoio on shore deveria desempenhar somente um papel de suporte e consultoria?”

De fato, a automação das medições não é algo que atua somente a nível técnico, existem repercussões gerenciais que podem economizar milhares de dólares ao ano. Quando se fala em sondas *off shore*, qual a ordem de grandeza gasta em logísticas com helicópteros e navios para deslocamento de pessoal? Atualmente, se gasta cerca de 3000 a 5000 reais para deslocamento de um engenheiro para os campos de perfuração.

Os autores consideram os resultados destes testes satisfatórios, mas deixaram claro que o atual estágio do desenvolvimento de tais tecnologias ainda é prematuro.

Broussard *et al.* (2010) desenvolveram um aparato único que afere remotamente e em tempo real a viscosidade aparente e densidade de fluidos de perfuração. Em concordância com Saasen *et al.* (2009), Broussard *et al.* (2010) também utilizaram o princípio da força de Coriolis para medições de densidade e técnica dos cilindros coaxiais para medições de viscosidade aparente.

Broussard *et al.* (2010) não detalharam seu aparato e nem disponibilizaram esquemas técnicos, porém, comparativamente com Saasen *et al.* (2009), os autores detalharam com mais profundidade seus resultados, e demonstraram a comparação direta entre os dados medidos em tempo real e os dados medidos nos instrumentos de bancada. Diferentemente de Saasen *et al.* (2009), que não anunciaram sobre seu sistema supervisor, Broussard *et al.* (2010) discutem a importância do *software* para tornar as medições aplicáveis, viáveis e passíveis de aplicação em campos reais de perfuração. A única foto do aparato está demonstrada na Figura 23.



Figura 23. Foto do aparato desenvolvido por Broussard *et al.* (2010) para medições de viscosidade aparente e densidade. Fonte: adaptado de Broussard *et al.* (2010).

O aparato dos autores foi desenvolvido em 18 meses de pesquisa científica e culminou em um estudo de caso em poços de petróleo sendo explorados no sul do Texas, EUA.

Na Figura 24 observam-se os resultados típicos obtidos para o primeiro poço explorado. Estes resultados são para fluido a base sintética. Os autores tentaram medir a viscosidade aparente no início das operações onde as profundidades são menores, nesta etapa geralmente são usados fluidos a base de água. No entanto, problemas operacionais de formação de grumos poliméricos no interior da câmara de medição do viscosímetro impediram os testes de serem conduzidos. A causa apontada foi uma agitação precária nos tanques de mistura da sonda.

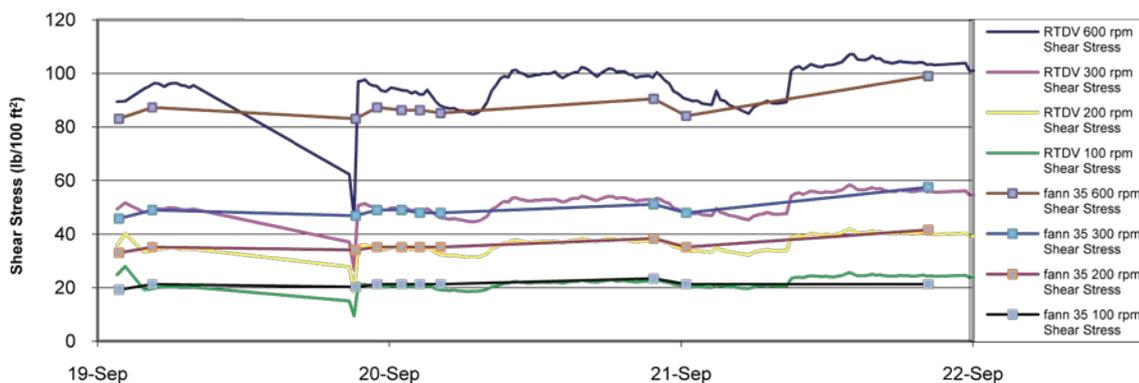


Figura 24. Tensão de cisalhamento em função do tempo absoluto para primeiro poço testado com fluido sintético, tensões medidas a altas velocidades. Fonte: adaptado de Broussard *et al.* (2010).

O instrumento desenvolvido pelos autores foi nomeado RTDV. Na Figura 24 estão demonstradas as tensões aferidas nas velocidades de 100, 200, 300 e 600 RPM. Os autores separaram as medições em alta velocidade e em baixa velocidade. Na Figura 24 estão consideradas as velocidades altas. As linhas contínuas são as aferições em tempo real, e os pontos são as medições feitas no equipamento de bancada FANN 35A. Existem momentos em que as medidas são similares, assim como há momentos em que as medidas divergem. Os autores apontam que as divergências residem em questões operacionais e em intempéries de força maior, como ambientes nocivos à eletrônica. Na Figura 25 estão os resultados para as medições em baixa velocidade.

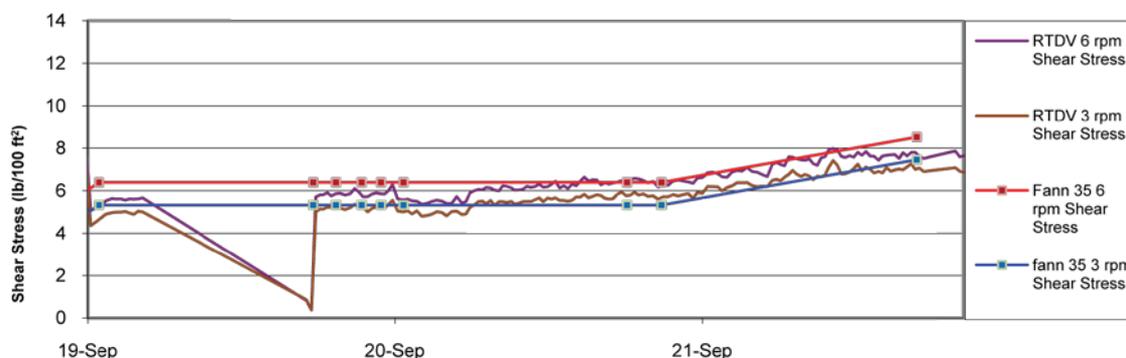


Figura 25. Tensão de cisalhamento em função do tempo absoluto para primeiro poço testado com fluido sintético, tensões medidas a baixas velocidades. Fonte: adaptado de Broussard *et al.* (2010).

Comparando os desvios encontrados na Figura 25 e Figura 24, é possível observar que o instrumento apresentou precisão semelhante.

Em um segundo poço os autores conseguiram medir a viscosidade aparente de um fluido a base de água. A justificativa para o sucesso reside no fato deste segundo poço possuir melhores condições de produção de fluido. Os resultados a alta velocidade podem ser vistos na Figura 26.

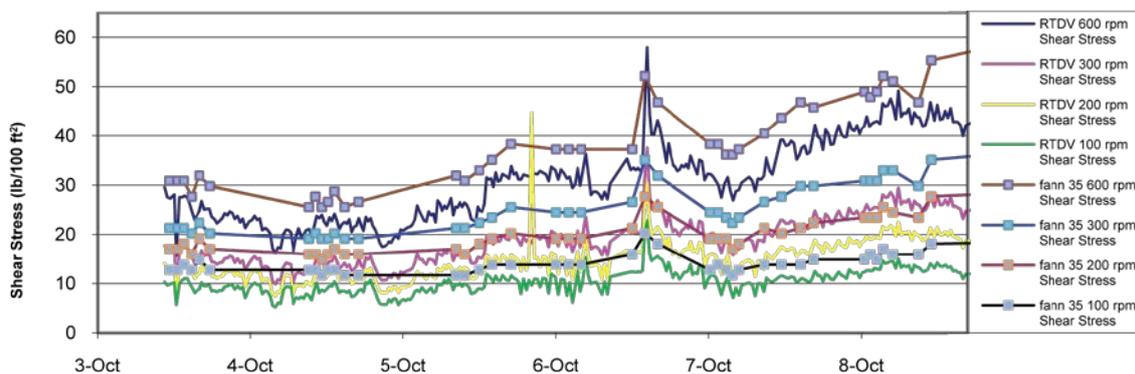


Figura 26. Tensão de cisalhamento em função do tempo absoluto para segundo poço testado com fluido aquoso, tensões medidas a altas velocidades. Fonte: adaptado de Broussard *et al.* (2010).

Na Figura 26 foram encontradas as maiores divergências até agora apresentadas, Houve uma região próxima a seis de outubro em que a aquisição de dados foi mais ruidosa. Os autores justificaram o comportamento afirmando que houve problema operacional neste momento, o mesmo apontado por Saasen *et al.* (2009): acúmulo de sólidos na câmara de medição. É possível que estes sólidos já viessem se acumulando ao longo do tempo, o que pode ter causado imprecisões ao longo de todo o teste. Vide resultados a baixa velocidade na Figura 27.

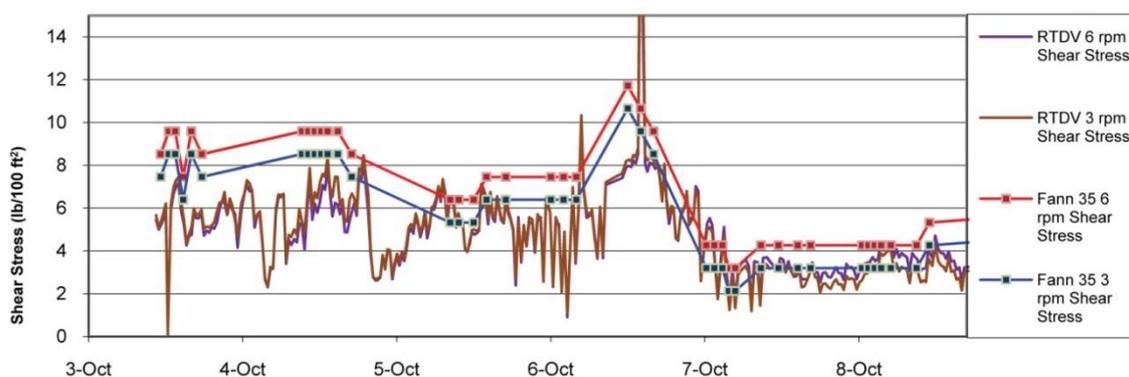


Figura 27. Tensão de cisalhamento em função do tempo absoluto para segundo poço testado com fluido aquoso, tensões medidas a baixas velocidades. Fonte: adaptado de Broussard *et al.* (2010).

Os resultados da Figura 27 continuam apresentando as mesmas tendências nos desvios quando comparado com a Figura 26. É possível que a fonte de erros seja a mesma, acúmulo de sólidos, já que os testes foram feitos na mesma data, apesar de estarem demonstrados em figuras distintas. Essa característica ruidosa na medida traduz de fato a presença de sólidos indesejáveis na medição, ora o rotor se prende, ora se solta, configurando um movimento oscilatório em função do aprisionamento e desprendimento dos sólidos acumulados na região anular do viscosímetro.

As conclusões acerca da medição de viscosidade em tempo real apontadas por Broussard *et al.* (2010) estão em concordância com aquelas levantadas por Saasen *et al.*

(2009). Ambos conseguiram com sucesso medir as grandezas, deixando claro que o viscosímetro de cilindros coaxiais é um instrumento adequado para trabalhar com fluidos de perfuração, não obstante está o fato do instrumento de referência de bancada ser um instrumento da mesma espécie. Interessante ressaltar que ambos os autores enfrentaram os mesmos problemas operacionais: acúmulo de sólidos no interior da câmara de medição, e apontaram que modificações customizadas são necessárias para a continuação do sucesso das aferições.

Os resultados de densidade obtidos por Broussard *et al.* (2010), podem ser vistos nas próximas figuras.



Figura 28. Densidade em função do tempo absoluto para primeiro poço testado com fluido sintético. Fonte: adaptado de Broussard *et al.* (2010).

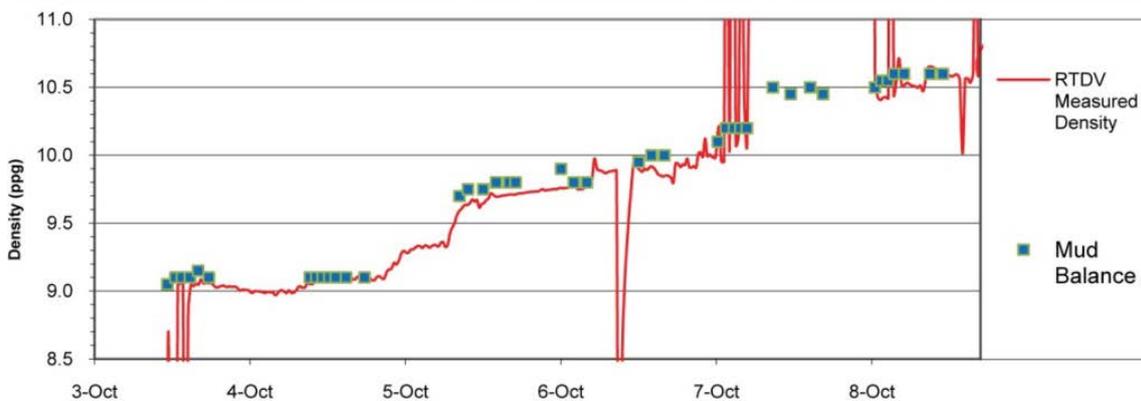


Figura 29. Densidade em função do tempo absoluto para segundo poço testado com fluido aquoso. Fonte: adaptado de Broussard *et al.* (2010).

De uma forma geral, analisando todos os resultados de densidade tanto para fluidos de base aquosa ou sintética, as tendências encontradas são as mesmas encontradas por Saasen *et al.* (2009). Ou seja, o instrumento baseado em técnica de medição da força Coriolis é de fato adequado para trabalhar com fluidos de perfuração.

Os autores, assim como os outros, obtiveram maiores acertos em determinadas situações e maiores desvios em outras, quando se parte do princípio que as aferições na balança de lama são referência. Nenhum dos autores reportou problemas operacionais com estes instrumentos ou limitações em termos de tipo de fluido ou aumento de carga

de sólidos. Os dados incongruentes da Figura 29 ocorreram durante as rotinas de limpeza, programados para ocorrer a uma dada frequência depois dos problemas de acúmulo de sólidos ocorridos no viscosímetro.

O trabalho dos autores ressalta ainda a importância de se ter uma estrutura de informática para tornar a operação viável nos processos de perfuração atual. Se uma das intenções de se automatizar as aferições das propriedades dos fluidos é tornar o contingente menor nas sondas de perfuração, incorrendo em diminuição de custos, então viabilizar uma rede de tráfego de dados é fundamental. Caso contrário, a situação seria pior do que já se encontra, ônus incorreriam a partir do momento que se necessitaria de pessoal com mão de obra ainda mais especializada e dedicada exclusivamente para a operação de tais instrumentos. Os autores construíram um sistema supervisorio associado a uma infraestrutura de rede para comando e visualização remota de todo o sistema. Sem esta construção fundamental, ao invés de agregar avanço o sistema proposto ocorreria retrocesso. Na Figura 30 pode ser visto um esquema ilustrativo da infraestrutura construída por Broussard *et al.* (2010).



Figura 30. Esquema da estrutura de informática desenvolvida por Broussard *et al.* (2010). Fonte: adaptado de Broussard *et al.* (2010).

A partir de um computador *host* localizado na sonda, é possível codificar e replicar os sinais para uma infraestrutura de rede sem fio. A partir de uma conexão ponto a ponto, os dados em interface sem fio são recebidos num segundo computador cliente, o qual recodifica as informações em sistemas supervisorios escravos, que podem se tornar terminais remotos. Nas próximas figuras são apresentadas as IHM²¹ do sistema supervisorio construído pelos autores.

²¹ IHM – Interface Homem Máquina

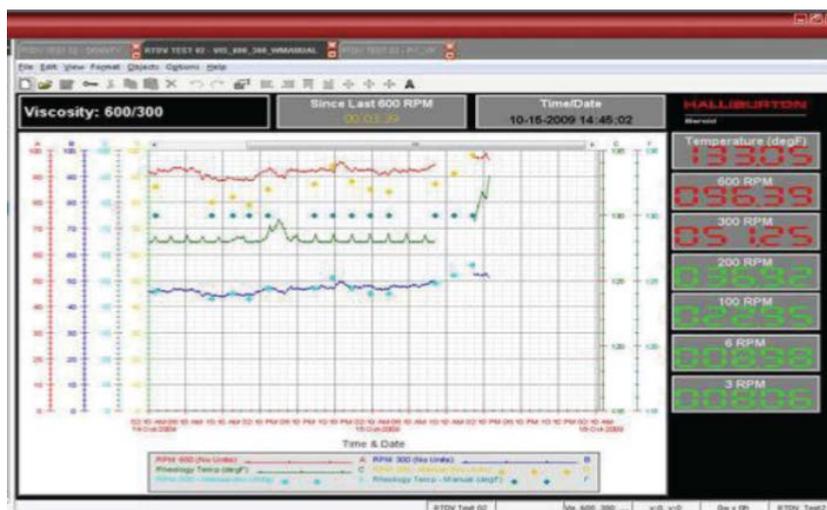


Figura 31. IHM construída para administração do sistema de medição remoto, foco na interface de viscosidade. Fonte: adaptado de Broussard *et al.* (2010).

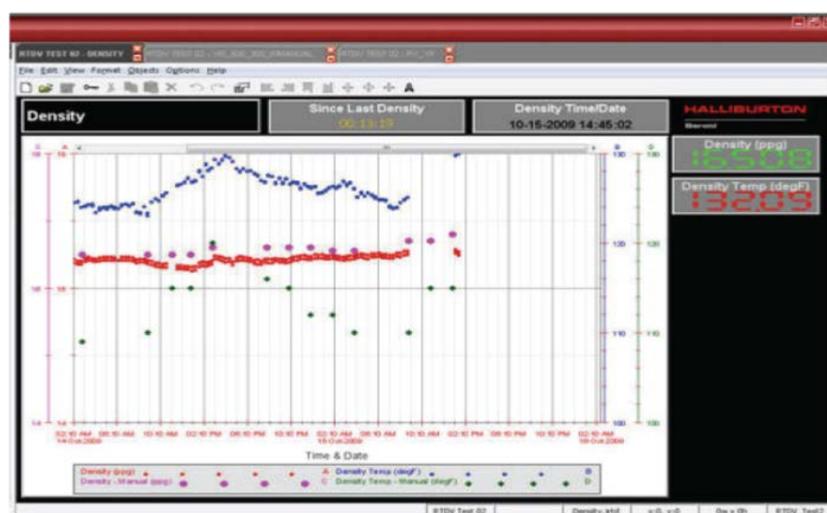


Figura 32. IHM construída para administração do sistema de medição remoto, foco na interface de densidade. Fonte: adaptado de Broussard *et al.* (2010).

O trabalho de Miller *et al.* (2011) divulgou o desenvolvimento de um sistema único que mede viscosidade aparente e densidade. Este trabalho diverge dos outros discutidos, pois utilizou uma única e diferente técnica para a aferição das grandezas: o método dos garfos vibrantes. Por meio de uma alta frequência, os “garfos” do sensor sofrem atenuação ao estarem submersos no fluido. A partir de calibrações prévias, é possível se correlacionar a densidade e a viscosidade dos fluidos com a atenuação da vibração. A desvantagem desta técnica é que a frequência de vibração é fixa. Isto significa que a viscosidade aparente é aferida somente a uma única taxa, não possibilitando a construção do reograma²² do fluido. O trabalho visa correlacionar a

²² Gráfico que se constrói a partir de pontos distintos de tensão de cisalhamento aferidos em diferentes taxas de deformação. O reograma possibilita visualizar a curva de viscosidade aparente do fluido em função da taxa de deformação e determinar o melhor modelo matemático que representa o comportamento viscoso do fluido.

viscosidade aparente medida com a viscosidade aferida no funil de *Marsh*²³, ao invés do FANN 35A. A densidade foi comparada com a densidade obtida na balança de lama, no entanto, não foram demonstrados. Na Figura 33 pode ser vista uma foto do aparato.



Figura 33. Aparato experimental para determinação da viscosidade aparente a uma taxa fixa e densidade. Fonte: adaptado de Miller *et al.* (2011).

Os autores não desenvolveram nenhuma infraestrutura de comunicação, no entanto, o equipamento possui protocolos analógicos para exportar os dados de densidade e viscosidade aparente. Na próxima figura pode ser visto um resultado típico do instrumento.

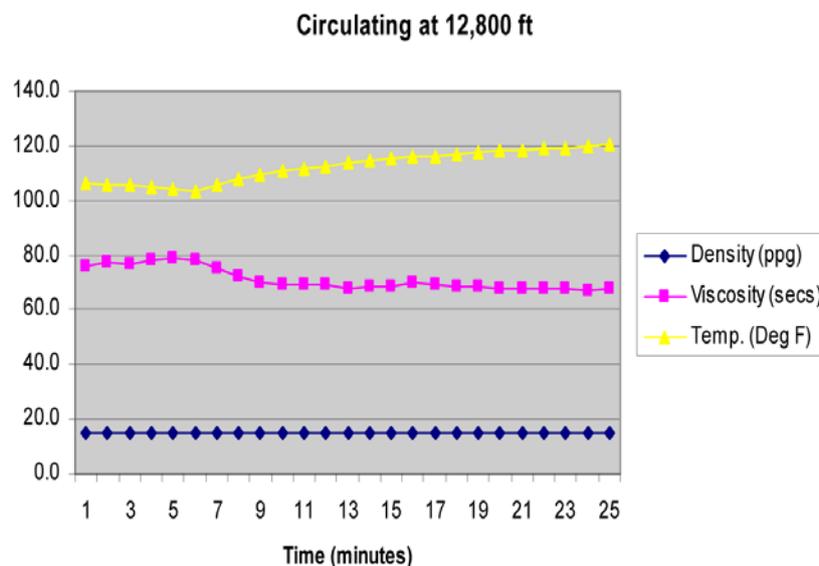


Figura 34. Resultados de viscosidade aparente, densidade e temperatura aferidos em tempo real pelo instrumento desenvolvido por Miller *et al.* (2011). Fonte: adaptado de Miller *et al.* (2011).

²³ O instrumento tem a forma de um funil com alça. A viscosidade aparente é determinada em função da vazão de saída do fluido no orifício inferior do funil.

O resultado demonstra que o equipamento é capaz de aferições das grandezas de forma estável e contínua, no entanto as medidas não foram validadas com medidas de referência em bancada. O instrumento, neste caso, estava calibrado para enviar dados de viscosidade *Marsh*, por isso está na unidade de segundos. Uma vantagem deste equipamento é que o mesmo não possui partes móveis, sendo menos suscetível aos problemas operacionais encontrados por Broussard *et al.* (2010) e Saasen *et al.* (2011). Por outro lado, a técnica agrega dificuldade quando exige que as aferições sejam feitas sob vazão constante, e na vazão de referência de calibração. Isto reside no fato do fluido de perfuração ser não Newtoniano, onde variações na vazão causam mudanças na viscosidade do fluido.

No escopo deste trabalho, Miller *et al.* (2011) contribuíram mais qualitativamente do que quantitativamente. Procura-se demonstrar que outras técnicas podem ser aplicadas além de força de Coriolis para cálculo da densidade e cilindros coaxiais para cálculo da viscosidade aparente. Mas a comparação entre elas demonstra que a técnica de garfos vibrantes é menos adequada do que as outras, haja vista a necessidade de se conhecer o reograma do fluido, e não somente a viscosidade em um único ponto.

Rondon *et al* (2012) desenvolveram um viscosímetro utilizando técnica distinta dos outros autores. Os mesmos basearam-se nas equações do movimento e da continuidade do fluido para determinação dos parâmetros reológicos do fluido. Os autores desenvolveram modelos considerando fluido Newtoniano²⁴ para validação das medidas em tempo real e posteriormente incorporaram a equação constitutiva da lei da potência²⁵, fazendo uma razoável aproximação de que os fluidos de perfuração apresentam tal comportamento reológico.

O instrumento foi desenvolvido para ser instalado em *downhole*²⁶, diferentemente dos outros autores cuja instrumentação está destinada às linhas hidráulicas na superfície, onde geralmente as pressões e temperaturas são mais brandas. Medições em *downhole* são sempre preferíveis às medições em superfície, porque representam as condições mais severas em que o fluido é submetido. Isto agrega inegável valor ao trabalho.

Na Figura 35 pode ser visto um esquema do instrumento desenvolvido.

²⁴ $\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$

²⁵ $\tau = K \cdot (\dot{\gamma})^n$

²⁶ Instrumentação destinada à instalação na própria coluna de perfuração. Desta forma os sensores irão descer até o interior do poço, aferindo as propriedades do fluido na região em que as condições operacionais são mais severas. Geralmente estas regiões são as mais importantes para o controle operacional. São nelas que o fluido deve desempenhar seu papel, assim, os sensores idealmente deveriam ser projetados para aferirem as propriedades dos fluidos nestas condições operacionais. Porém, devido às elevadas ordens de grandeza na pressão e temperatura, a reprodução destas condições em laboratório não é trivial.

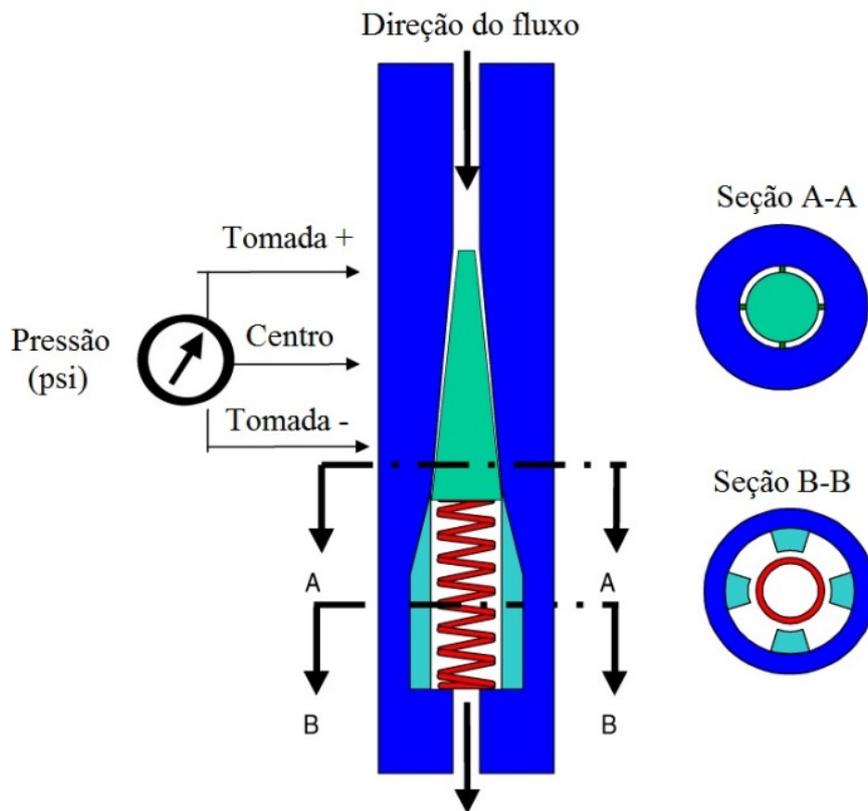


Figura 35. Esquema do viscosímetro desenvolvido por Rondon *et al.* (2012). Fonte: adaptado de Rondon *et al.* (2012).

O princípio de funcionamento consiste em escoar o fluido pelo interior da geometria, como demonstrado na Figura 35. O fluido ao entrar na câmara, empurra a mola deixando livre um canal com geometria definida. Ao escoar por estes canais formados entre a “agulha” central e o cilindro externo, um perfil de pressões é criado ao longo dos três orifícios laterais presentes no cilindro (vide Figura 36). Aferindo-se este diferencial de pressão juntamente com a vazão, é possível determinar os parâmetros reológicos do fluido a partir dos modelos propostos pelos autores. De posse dos parâmetros, é possível obter a viscosidade aparente ou tensão cisalhante em qualquer taxa.

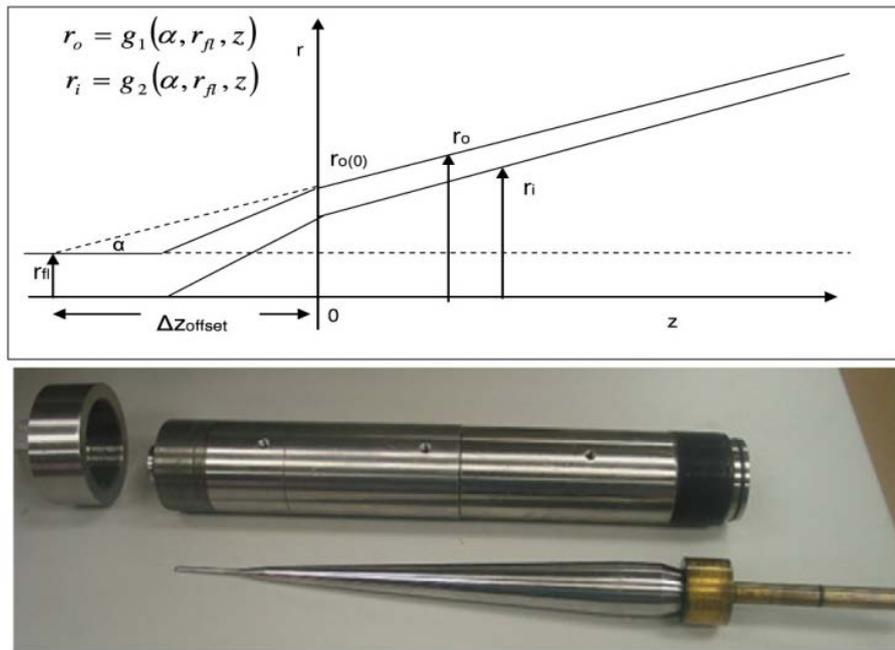


Figura 36. Foto do viscosímetro desenvolvido por Rondon *et al.* (2012), abaixo, e esquema da geometria formada para escoamento do fluido, acima. Fonte: adaptado de Rondon *et al.* (2012).

Após extensivo modelamento matemático utilizando a equação do movimento, da continuidade e a equação constitutiva da lei da potência, os autores chegam a uma equação que determina a perda de carga²⁷ ao escoar pela geometria desenvolvida em função da vazão, dos parâmetros reológicos e de um fator geométrico característico. A saber,

$$\Delta P = \frac{K}{72} \cdot (3,85 \cdot Q)^n \cdot f_{slot},$$

Equação 8

onde ΔP é a queda de pressão, K é o índice de consistência²⁸ do fluido Q é a vazão volumétrica, n é o índice de comportamento²⁹ do fluido e f_{slot} é o fator de geometria característico.

As variáveis de interesse na Equação 8 são K e n . Como a pressão e a vazão são informações experimentais aferidas e conhecido o fator geométrico f_{slot} , basta aplicar qualquer técnica de regressão de dados para estimação de K e n . O fator geométrico foi determinado pelos autores e é a solução da seguinte equação,

²⁷ Perda de energia interna do fluido em forma de pressão, seja por atrito, cinética ou potencial.

²⁸ Número associado à resistência ao escoamento, erroneamente confundido com a viscosidade. Este parâmetro não é a viscosidade do fluido.

²⁹ Número associado à linearidade da resposta da tensão frente a uma mudança na taxa. Quanto mais próximo de 1 mais linear é a relação, quanto mais longe da unidade (maior ou menor que a unidade) maior é a não linearidade.

$$f_{slot} = \frac{1}{\cos(\alpha)} \int_0^L \left\{ \frac{(4 + 2/n)}{\pi \cdot (r_0(z)^2 - r_i(z)^2) \cdot (r_0(z) - r_i(z))^{1+1/n}} \right\}^n ,$$

Equação 9

onde todas variáveis listadas são parâmetros geométricos do instrumento. Sendo assim, a Equação 9 possui solução analítica e pode ser substituída diretamente na Equação 8 para regressão, já que o parâmetro de geometria ficará em função somente de n .

Para validar a proposta, os autores construíram um *loop* de fluidos (Figura 37), onde foram testados fluidos a base de glicerina (Newtoniano) e soluções poliméricas de goma xantana (pseudoplástico). É importante ressaltar que não foram testados fluidos de perfuração com carga de sólidos em suspensão. As seguintes considerações foram feitas para a modelagem:

- Fluido incompressível: Em altas pressões e temperaturas isto pode não ser uma boa aproximação;
- Não há escoamento na direção a θ (considerando coordenadas cilíndricas);
- Regime estacionário (independente do tempo);
- Escoamento isotérmico: grande desvantagem, já que certamente não o é.
- Efeitos de borda desprezíveis: para fluidos não Newtonianos não é uma boa aproximação;
- Escoamento laminar: agrega dificuldade operacional, pois seria necessário o controle da vazão com determinação do número de Reynolds³⁰;
- Efeitos tixotrópicos foram desprezados.

³⁰ $Re = d \cdot v \cdot \rho / \mu$, em caso de fluidos Newtonianos. Para fluidos não Newtonianos, cada modelo possui sua própria correlação para determinação deste adimensional.

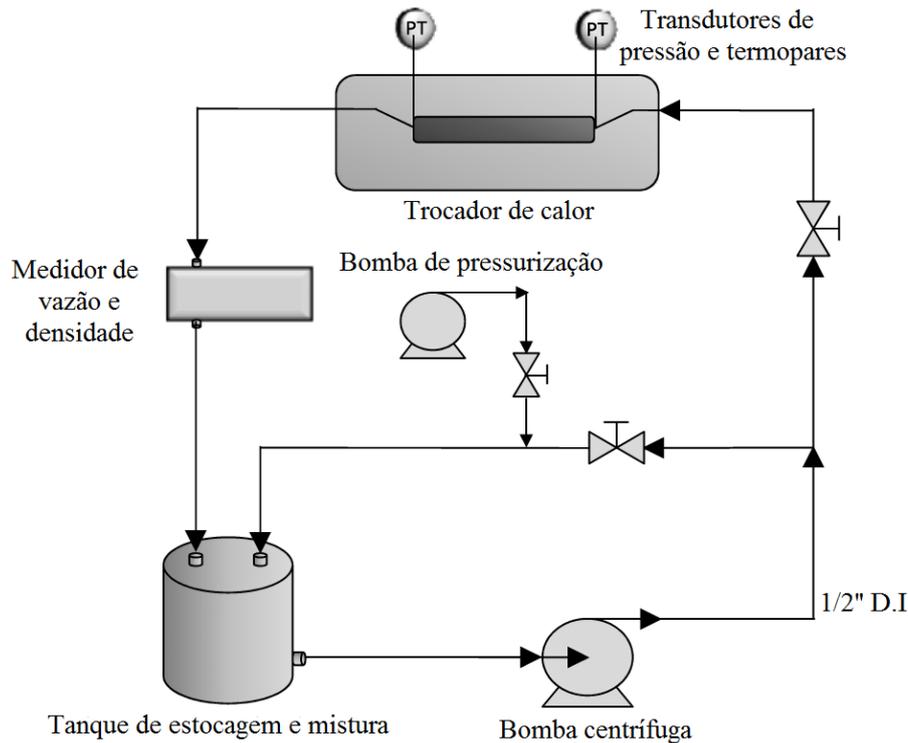


Figura 37. Esquema do *loop* de fluidos construído por Rondon *et al.* (2012). Fonte: adaptado de Rondon *et al.* (2012).

Os autores reconhecem que o atual estágio de desenvolvimento deste instrumento é preliminar. A complexidade matemática já é significativa considerando todas as simplificações feitas. A demonstração deste trabalho reforça a ideia que não existe somente uma única técnica para medição de viscosidade em tempo real, porém, no escopo de fluidos de perfuração, a técnica de cilindros coaxiais é a que apresenta o melhor custo benefício. Apesar dos problemas de acúmulo de sólidos, a técnica não exige modelamento matemático e nem controle de vazão. Os cilindros coaxiais são desenvolvidos para que no interior da região anular de medição o regime seja laminar, mas não necessariamente na tubulação do processo. No próximo capítulo será elucidada melhor esta característica destes viscosímetros.

Carlsen *et al.* (2012) utilizaram semelhantemente a Rondon *et al.* (2012), equações fenomenológicas para aferir em tempo real densidade e viscosidade aparente, ao invés de aplicar tecnologia pura para tais aferições. Por meio de princípios clássicos da hidráulica, Carlsen *et al.* (2012) propuseram que aferindo as pressões hidráulicas de escoamento juntamente com a vazão volumétrica, é possível se obter viscosidade aparente e densidade. Para atingir seus objetivos, os autores utilizaram uma sonda escola para testar suas propostas (Figura 38).

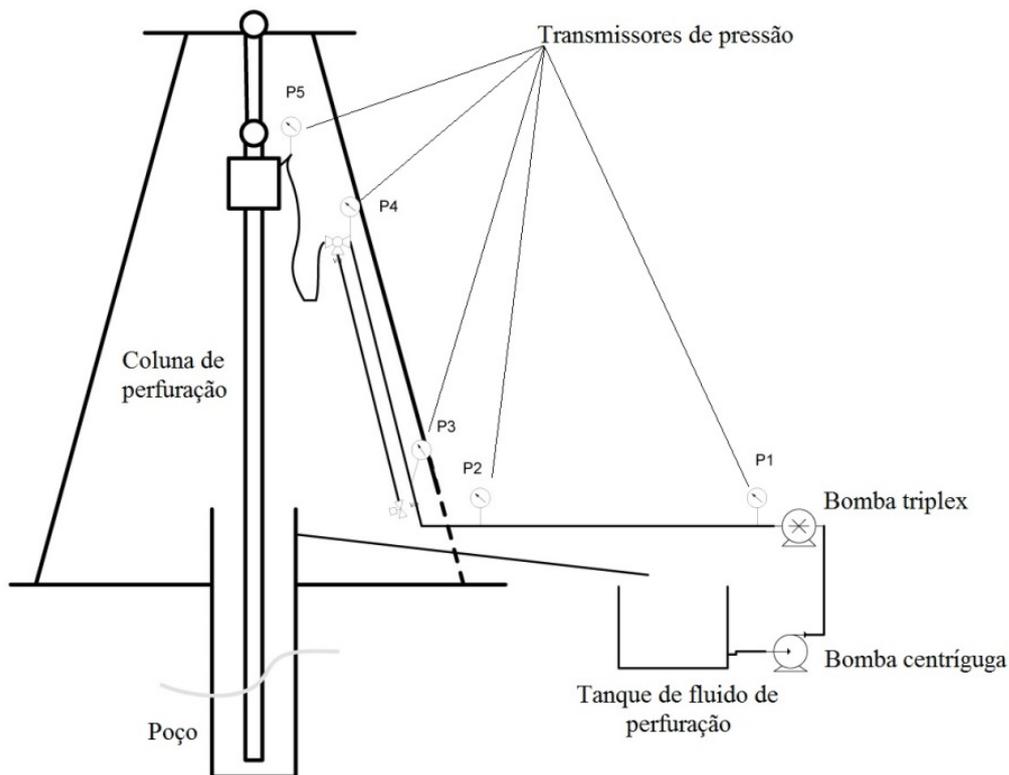


Figura 38. Esquema da sonda escola utilizado por Carlsen *et al.* (2012). Fonte: adaptado de Carlsen *et al.* (2012).

A sonda escola contém a perfuratriz, o poço, tubulações em um ciclo fechado, um tanque de fluido de perfuração, uma bomba triplex e sua centrífuga de alimentação e medidores de pressão em pontos específicos da tubulação. Após desenvolvimento dos cálculos, as equações finais que permitem a determinação da densidade e viscosidade aparente, respectivamente, estão demonstradas na Equação 10 e na Equação 11.

$$\rho = \frac{(P_3 - P_4 - P_1 + P_2)}{h \cdot g},$$

Equação 10

percebe-se que para medições de densidade não é necessário a determinação da vazão.

Para a viscosidade aparente, em regime laminar:

$$\mu_{ap} = \frac{1}{32} \cdot \frac{[d^2 \cdot (P_1 - P_2)]}{v \cdot l}.$$

Equação 11

Em caso de regime turbulento, a viscosidade aparente não poderá ser calculada pela Equação 11, uma vez que ela se apresenta desta forma por incorporar o fator de atrito como $16/Re$. Uma alternativa é voltar nos passos intermediários desta equação e calcular o fator de atrito segundo o ábaco de *Moody*, ou qualquer outra correlação de fator de atrito adequada para regime turbulento, como *Churchill* ou *Blasius*. Note que

para determinação da viscosidade aparente, nesta proposta de Carlsen *et al.* (2012) é necessário primeiro se conhecer a densidade. Para determinação das velocidades a partir da vazão, usa-se $v = Q/A$, onde Q é a vazão volumétrica e A é a área da seção transversal da tubulação. A vazão, segundo os autores, foi contabilizada a partir da contagem da frequência de empistamento da bomba, uma vez que cada pistão desloca um volume específico por ciclo. Desta forma, nenhuma tecnologia foi aplicada para aferições de vazão. Na Figura 39 podem ser observados os resultados de densidade obtidos pelos autores utilizando o equacionamento proposto acima.

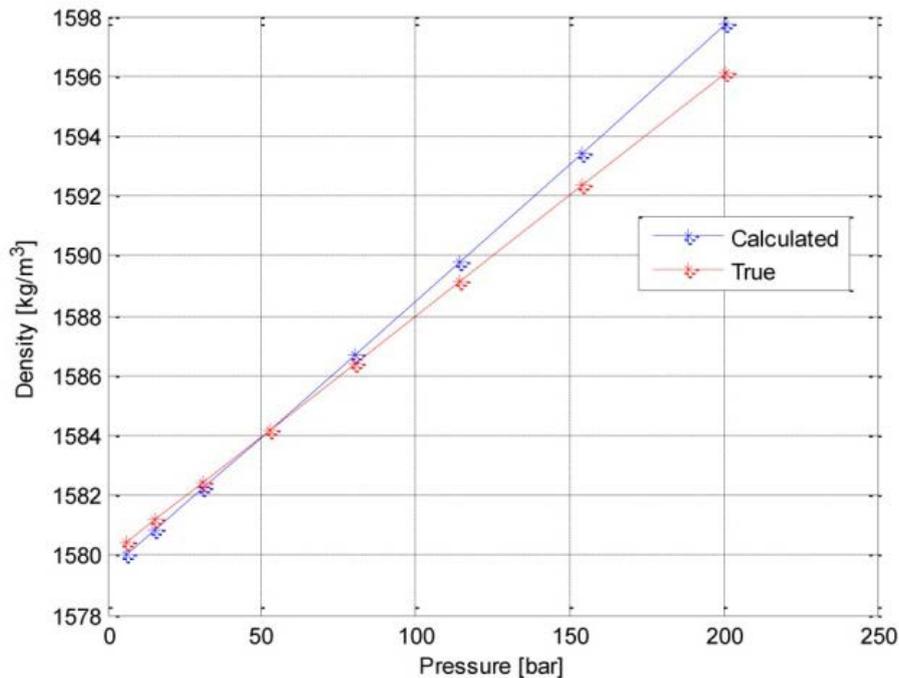


Figura 39. Densidade em tempo real calculada e densidade de referência aferida na balança de lama em função da pressão total do sistema obtidos por Carlsen *et al.* (2012).

Fonte: adaptado de Carlsen *et al.* (2012).

Observa-se que as medidas em tempo real (calculadas) e as medidas aferidas experimentalmente são similares a baixas pressões, e começam a apresentar divergência a altas pressões. Apesar dos autores não comentarem tais divergências, é possível que a causa das mesmas esteja na compressibilidade do fluido, que começa a ser significativa a altas pressões. Como o equipamento de bancada não possibilita a aferição a altas pressões, somente a pressão ambiente, é coerente a tendência dos dados aferidos diretamente no processo reportarem densidades maiores do que as aferidas em bancada, já que a compressão do fluido leva o fluido a possuir a mesma massa ocupando um volume menor.

Apesar de os autores encontrarem a viscosidade aparente como parâmetro primário, os dados foram convertidos para tensão cisalhante para facilitar a comparação direta entre os dados em tempo real e os dados providos pelo viscosímetro de bancada, vide Figura 40 para os resultados.

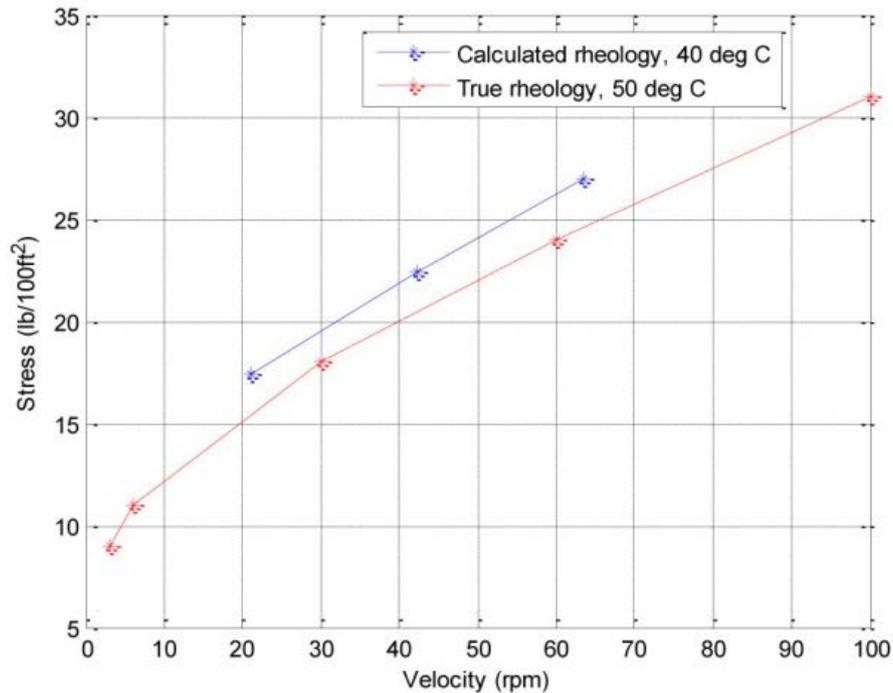


Figura 40. Tensão de cisalhamento em tempo real calculada e tensão cisalhante de referência aferida no viscosímetro FANN, ambos em função da velocidade angular do viscosímetro. Fonte: adaptado de Carlsen *et al.* (2012).

Incongruentemente as duas reologias foram aferidas em temperaturas diferentes, o que causou o distanciamento entre os dados. É coerente que o fluido a uma temperatura superior apresente menores viscosidades. É fato que se a reologia obtida em tempo real (dita calculada pelo autor) também fosse aferida a 50°C, os dados seriam mais similares.

O trabalho de Carlsen *et al.* (2012) chama a atenção de que para propriedades tais como viscosidade e densidade, é possível com baixo custo aferi-las em processo, utilizando princípios fenomenológicos da mecânica dos fluidos. No entanto, uma série de desvantagens são apontadas quando comparado com outras técnicas:

- Se houver problemas operacionais ou parada de fluxo, as propriedades não serão aferidas;
- É necessária a inserção no processo, ou seja, para as aferições é indispensável que a sonda opere de fato. Nos outros métodos, apenas um *by pass*³¹ no tanque pulmão bastaria para aferir as propriedades do fluido;
- Medir pressões de forma precisa exige conhecimento especializado, pois geralmente se o sensor é mal posicionado efeitos de entrada e saída podem inviabilizar os cálculos;

³¹ Linhas paralelas à principal.

- Medir experimentalmente o fator de atrito não é algo trivial, já que o mesmo possui grande sensibilidade paramétrica, por se tratar de um número na ordem de grandeza 10^{-3} , ou seja, a mínima imprecisão nas medidas de vazão e pressão pode incorrer em grandes flutuações no valor de f ;

Em resumo, Saasen *et al.* (2009), utilizaram tecnologias disponíveis no mercado, modificando-as e produzindo protótipos para aferir diversas propriedades dos fluidos de perfuração. Em seguida, Broussard *et al.* (2010), em concordância com Saasen *et al.* (2009), utilizaram das mesmas tecnologias para medições somente de viscosidade e densidade, sendo que ambos os autores obtiveram sucesso nas medições com fluidos de perfuração e apontaram que os problemas operacionais encontrados foram corrigidos com rotinas de auto limpeza. No ano seguinte, Miller *et al.* (2011), também obtiveram sucesso ao medir viscosidade e densidade em tempo real, utilizando outra técnica, no entanto, comparativamente, apresentou resultados mais limitados do que os autores anteriores. Na sequência, Rondon *et al.* (2012) e Carlsen *et al.* (2012) apresentaram propostas para se calcular a viscosidade e densidade em tempo real a partir de modelos fenomenológicos da mecânica dos fluidos. Os resultados do primeiro foram adquiridos em fluidos Newtonianos e soluções poliméricas; assim não se sabe a eficácia de seu instrumento em fluidos de perfuração. Já Carlsen *et al.* (2012) apresentaram resultados contundentes em fluidos de perfuração, no entanto uma série de desvantagens foi levantada quando comparados com as propostas dos dois primeiros autores.

A avaliação geral destes trabalhos levou Magalhães *et al.* (2014), a construir um *loop* de fluidos para desenvolver uma malha sensorial utilizando as técnicas apontadas por Saasen *et al.* (2009) e Broussard *et al.* (2010). Magalhães *et al.* (2014), julgaram que as técnicas apresentadas por tais autores apresentaram melhor custo benefício em relação as propostas de Miller *et al.* (2011), Rondon *et al.* (2012) e Carlsen *et al.* (2012). Magalhães *et al.* (2014) mediram em tempo real tensão cisalhante, densidade, estabilidade elétrica, condutividade elétrica e concentração de sólidos e compararam os dados obtidos com dados de referência aferidos em bancada. Para atingir seus objetivos, os autores adquiriram um viscosímetro de cilindros coaxiais e o modificaram. O densímetro, baseado em força de Coriolis recebeu calibração especial, assim como o medidor de concentração de sólidos baseado em técnicas ultrassônicas. Para medições de estabilidade elétrica, Magalhães *et al.* (2014) desenvolveram um protótipo próprio que opera em conjunto com um condutivímetro comercial. Magalhães *et al.* (2014) representam o primeiro trabalho brasileiro na área de automação em fluidos de perfuração. Na Figura 41 pode ser observado o *loop* de fluidos construído.

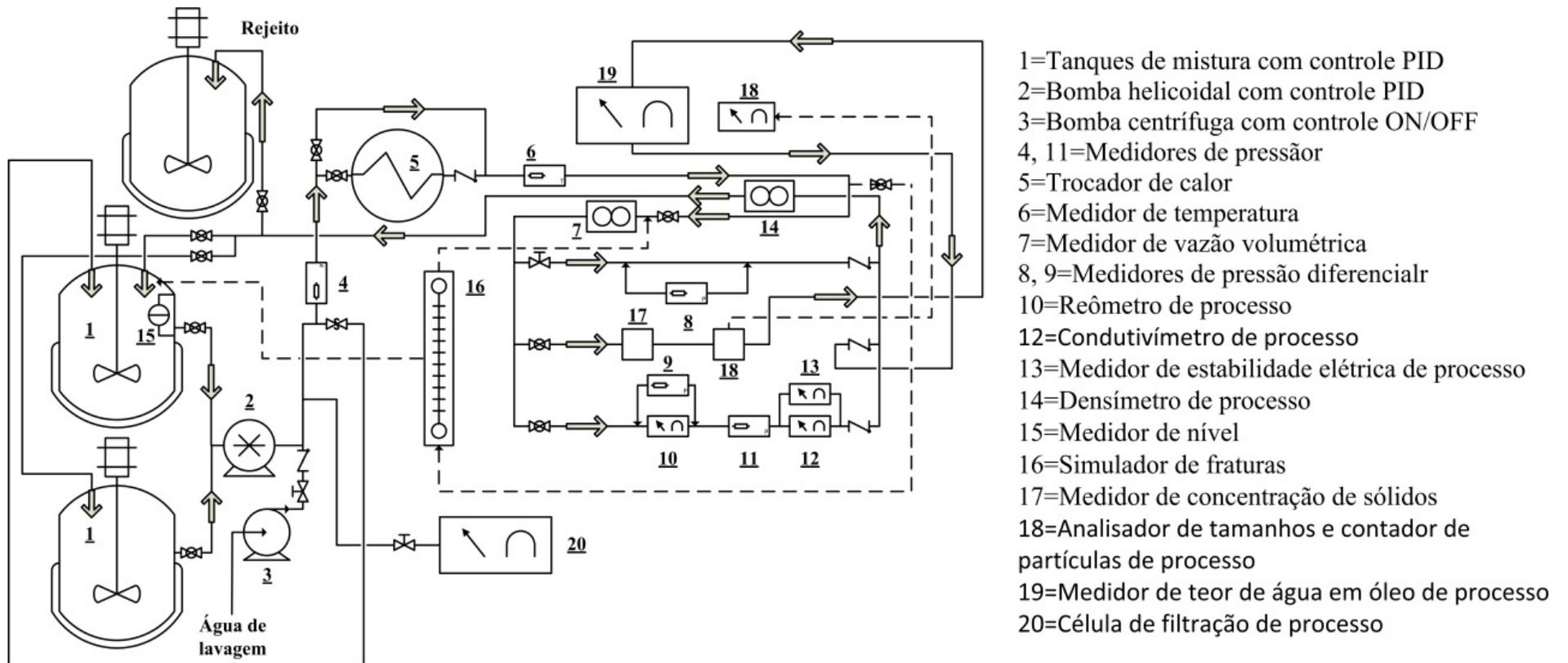


Figura 41. Loop de fluidos desenvolvido por Magalhães *et al.* (2014). Fonte: adaptado de Magalhães *et al.* (2014).

Em relação às medidas de tensão cisalhante obtidas em tempo real, os autores demonstraram resultados que apresentaram semelhança qualitativa em relação aos resultados apresentados por Saasen *et al.* (2009) e Broussard *et al.* (2010). Vide Figura 42 para reologias obtidas para um fluido de perfuração aquoso e sintético.

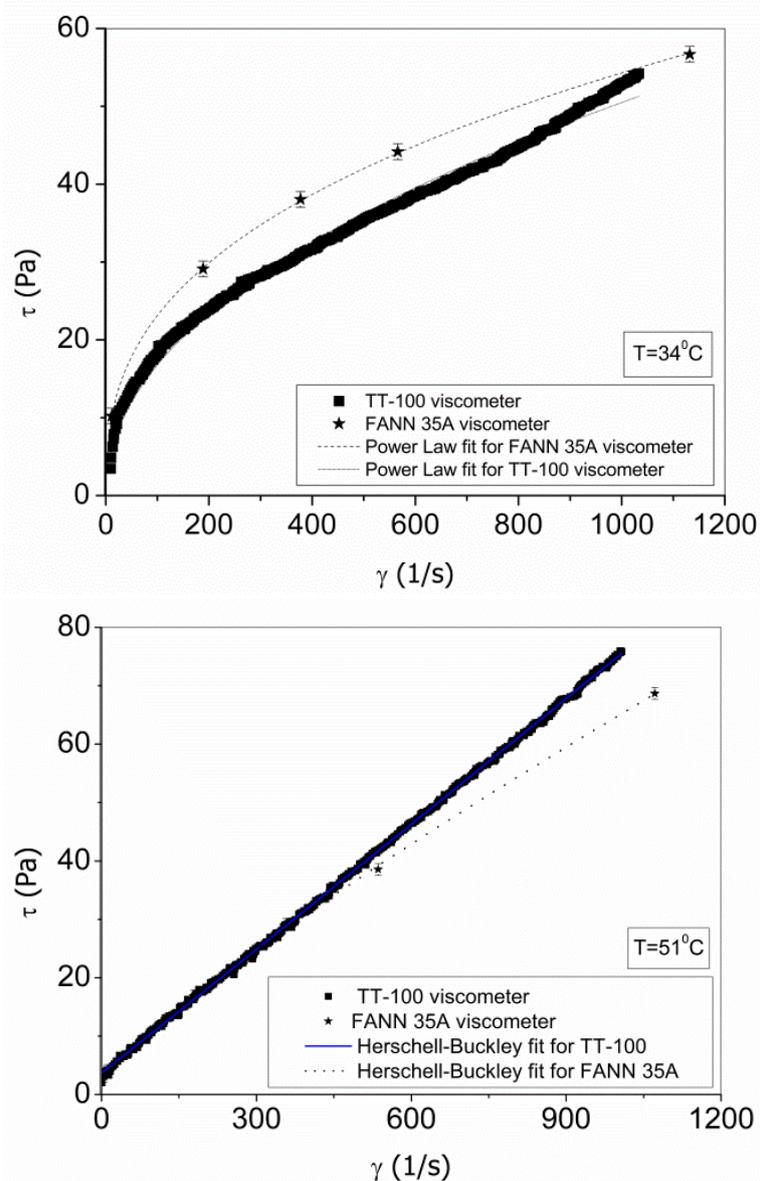


Figura 42. Resultados de tensões cisalhantes obtidas em tempo real e em bancada no viscosímetro FANN 35A por Magalhães *et al.* (2014). Acima medições em fluido de perfuração aquoso, abaixo, medições em fluido sintético. Fonte: adaptado de Magalhães *et al.* (2014).

As divergências entre medidas em tempo real (dados em alta frequência) e medidas em bancada (pontos distintos) foram apontadas pelos autores. Os mesmos especulam que efeitos de homogeneidade, escorregamento e a diferença entre o *gap*³² do instrumento de processo e o de bancada são as possíveis causas das divergências. Os

³² Espaço formado entre os cilindros coaxiais (região anular).

autores comentam que melhorias já estão sendo realizadas para minimizar estas divergências.

Em relação à densidade, os autores demonstraram resultados tanto em fluidos aquosos quanto em sintéticos. Os resultados foram comparados com os resultados obtidos pela balança de lama e podem ser vistos na Figura 43.

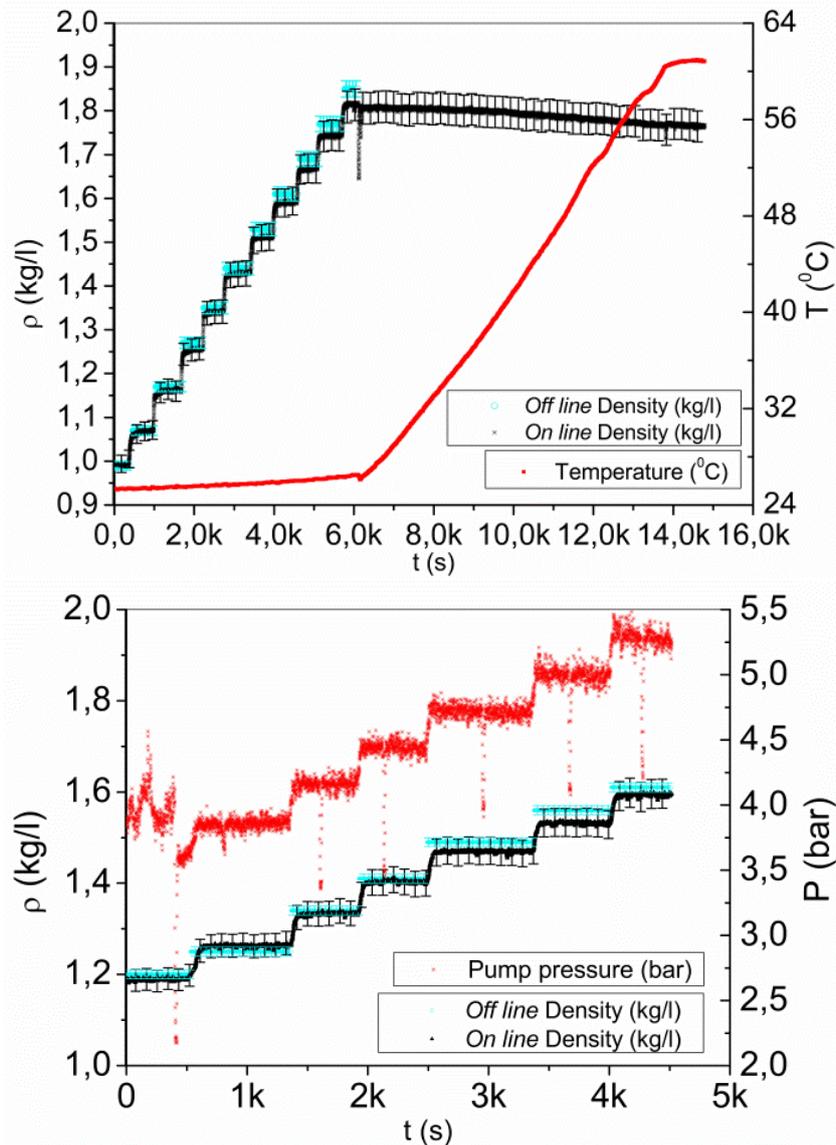


Figura 43. Resultados de densidade obtidas em tempo real e em bancada na balança de lama por Magalhães *et al.* (2014). Acima medições em fluido de perfuração aquoso, abaixo, medições em fluido sintético. Fonte: adaptado de Magalhães *et al.* (2014).

Em ambos os casos (fluido aquoso e sintético) há similaridade entre os resultados em tempo real e os de bancada. No fluido aquoso, foi feito um aquecimento e observado que o instrumento é capaz de corrigir a densidade em função do incremento da temperatura. Dados em bancada não foram aferidos, pois nesta situação não há possibilidade de controle da temperatura. O nível de acerto destes resultados concorda

com Saasen *et al.* (2009), que afirmaram que calcular a densidade a partir de medições de força de Coriolis é uma das maneiras mais precisas.

Para medições de estabilidade elétrica, os autores fabricaram fluidos sintéticos com diferentes teores de água em óleo. A parte orgânica foi parafina e a parte aquosa uma salmoura saturada em cloreto de sódio. As proporções variaram de 30 a 50% de água na emulsão. Foram utilizados os mesmos aditivos encontrados nos campos de perfuração, sob intensa agitação nos tanques demonstrados na Figura 41. Começou-se com 30% em água, aferindo-se a estabilidade elétrica nesta razão, e posteriormente adicionando mais salmoura, até que a razão limite de 50% fosse atingida. Além da emulsão, o fluido continha barita e bentonita em suspensão, hidróxido de cálcio, emulsificante primário em excesso, emulsificante secundário, modificador reológico e redutor de filtrado. Os resultados podem ser vistos nas figuras a seguir.

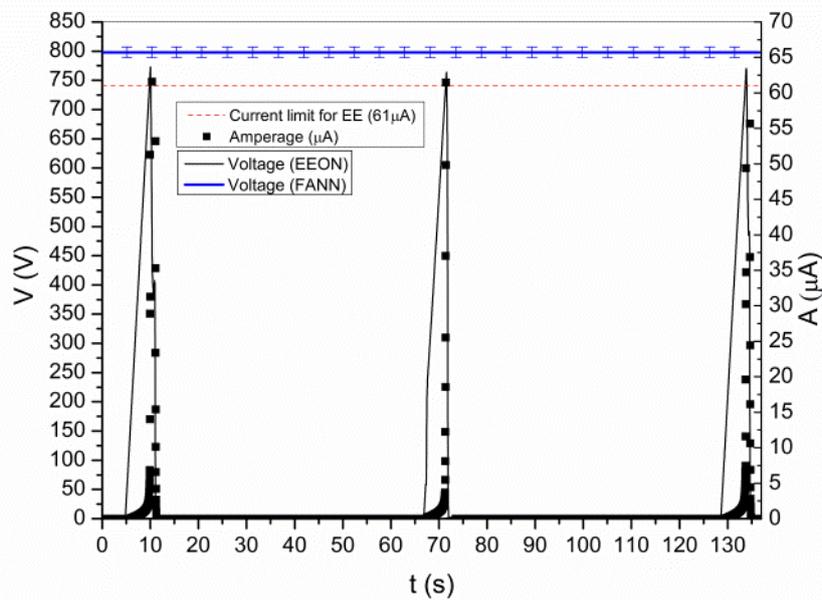


Figura 44. Resultados de estabilidade elétrica obtidas em tempo real e em bancada no FANN 23D por Magalhães *et al.* (2014). Fluido a 30/70 (Água/Óleo). Fonte: adaptado de Magalhães *et al.* (2014).

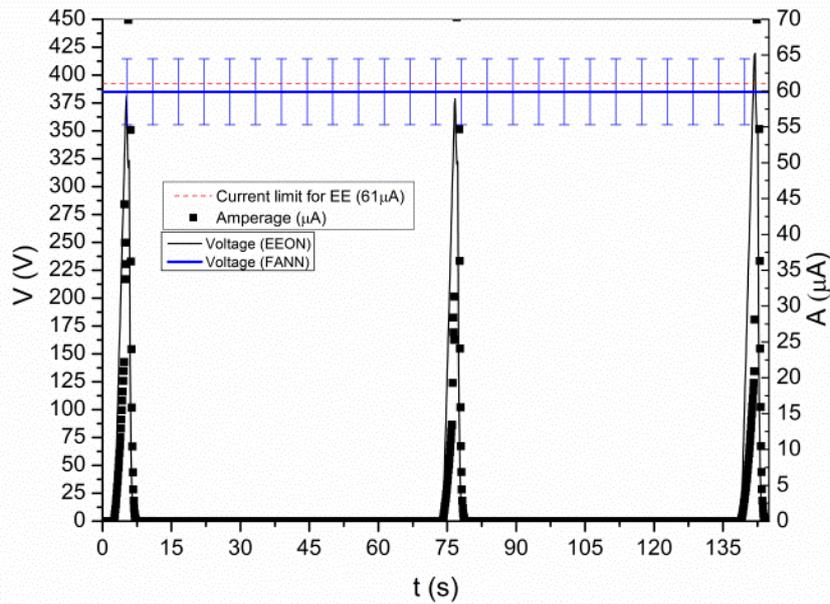


Figura 45. Resultados de estabilidade elétrica obtidas em tempo real e em bancada no FANN 23D por Magalhães *et al.* (2014). Fluido a 40/60 (Água/Óleo). Fonte: adaptado de Magalhães *et al.* (2014).

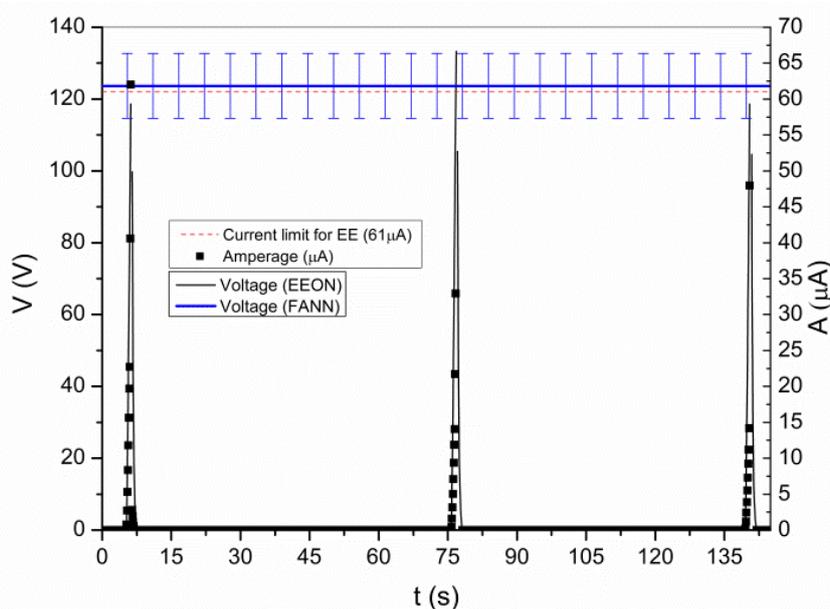


Figura 46. Resultados de estabilidade elétrica obtidas em tempo real e em bancada no FANN 23D por Magalhães *et al.* (2014). Fluido a 50/50 (Água/Óleo). Fonte: adaptado de Magalhães *et al.* (2014).

As linhas azuis representam as medições de bancada, as linhas contínuas pretas são os valores da tensão e os pontos os valores de corrente ao longo do teste. Percebe-se que as linhas apresentam picos que são cessados justamente quando a corrente ultrapassa 61 micro amperes. É possível observar nas três figuras que a admissão de água ao sistema diminui a estabilidade elétrica, tendência em concordância com Saasen *et al.* (2009). Observa-se também que o protótipo operou satisfatoriamente, reproduzindo resultados semelhantes aos resultados de referência.

Magalhães *et al.* (2014), além do sensor de estabilidade elétrica, acoplaram ao sistema um medidor de condutividade elétrica, assim foi possível identificar o exato ponto de quebra da estabilidade da emulsão durante uma simulação de invasão incontrolada de água. Os autores ainda desenvolveram uma calibração baseada em rede neuronal para viabilizar o uso da técnica de ultrassom para cálculo da concentração de sólidos suspensos. Para maiores detalhes sobre estes resultados consultar Anexo A.

2.5. Outros trabalhos de monitoramento em tempo real em áreas afins da engenharia

Outros trabalhos foram encontrados que divulgam técnicas e compartilham experiências de monitoramento em tempo real de propriedades da matéria. A relevância dos mesmos no escopo desta dissertação é demonstrar que toda medição em tempo real para fins de controle e monitoramento necessita de um sistema supervisorio. Durante esta revisão, foi percebido que o fabricante *National Instruments* foi amplamente utilizado como uma solução comercial para facilitar a aquisição de dados remotos, criação de sistemas supervisorios e IHMs.

Jui-Hong Horng (2007) utilizou o *LabView®* (software da *National Instruments*) juntamente com o *MATLAB®* para desenvolver um motor com controle remoto. Vide Figura 47.

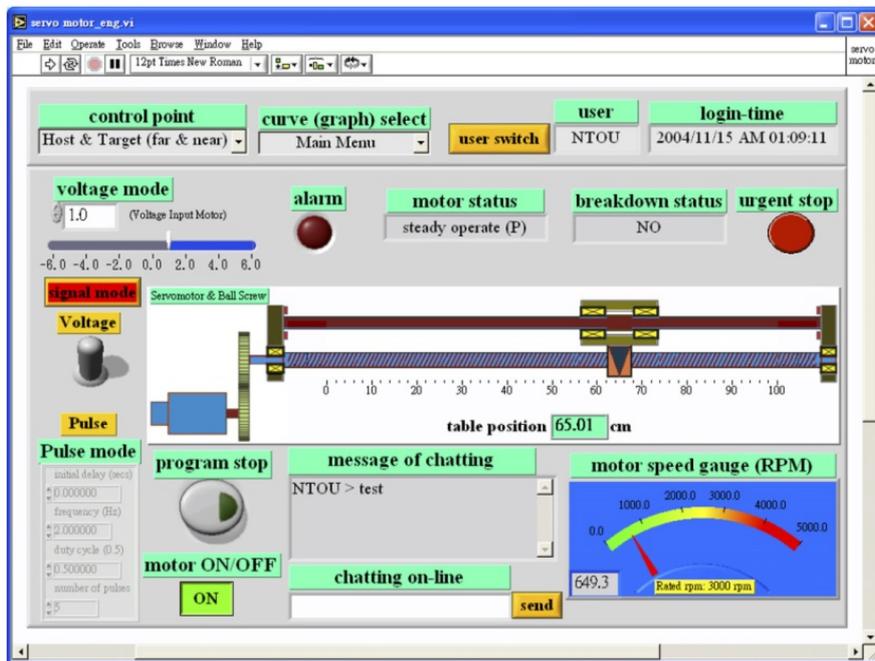


Figura 47. IHM desenvolvida para controle de um motor remotamente. Adaptado de Jui-Hong Horng (2007).

Já Lin *et al.* (2010) divulgaram seu aparato para medição em tempo real de vários parâmetros provenientes de turbinas eólicas, principalmente o ruído próximas a residências. Os autores utilizaram os *hardware* e *software* da *National Instruments* para

viabilizar o sistema de medição. Na Figura 48 é demonstrada a turbina eólica que foi monitorada pelos autores e ao chão é possível perceber o sistema de áudio montado. Na Figura 49 é demonstrado o esquema do sistema completo.



Figura 48. Sistema a ser monitorado: ruídos da turbina eólica próxima a residências. Adaptado de Lin *et al.* (2010).

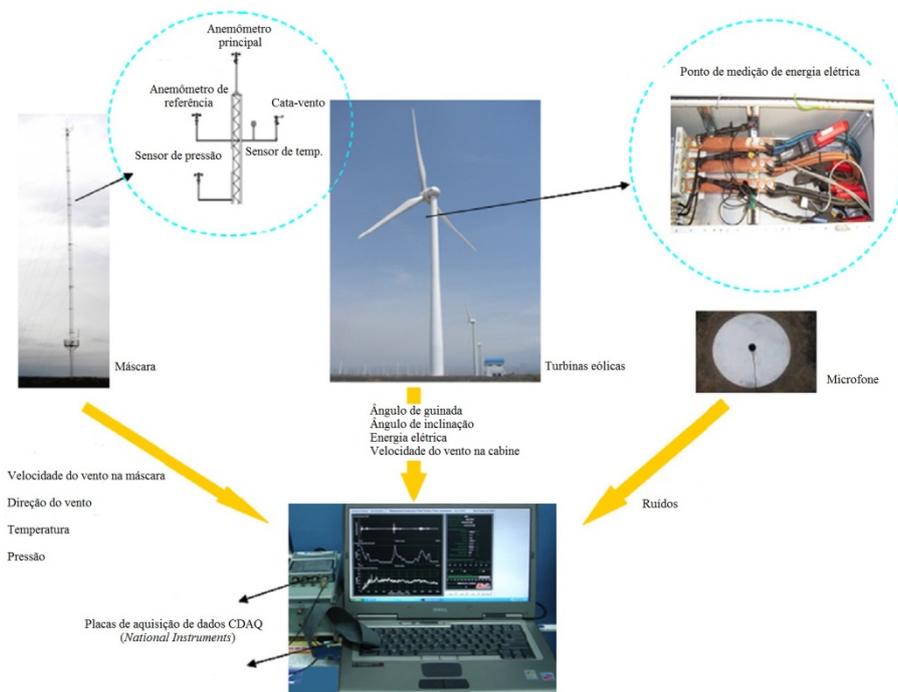


Figura 49. Esquema montado por de Lin *et al.* (2010) utilizando a solução comercial da *National Instruments* para monitoramento remoto de ruídos de turbinas eólicas próximas a residências. Adaptado de Lin *et al.* (2010).

Pode ser observado, no esquema de monitoramento demonstrado na Figura 49, que sensores foram instalados nos circuitos de controle das turbinas. Estes sensores se comunicavam com as placas de aquisição de dados da *National Instruments*, que por sua vez se comunicam com o *LabView®*. Lá residiam a criação do banco de dados, tratamento e modelagem dos dados (Figura 49) e a IHM (Figura 50) para interação com o operador.

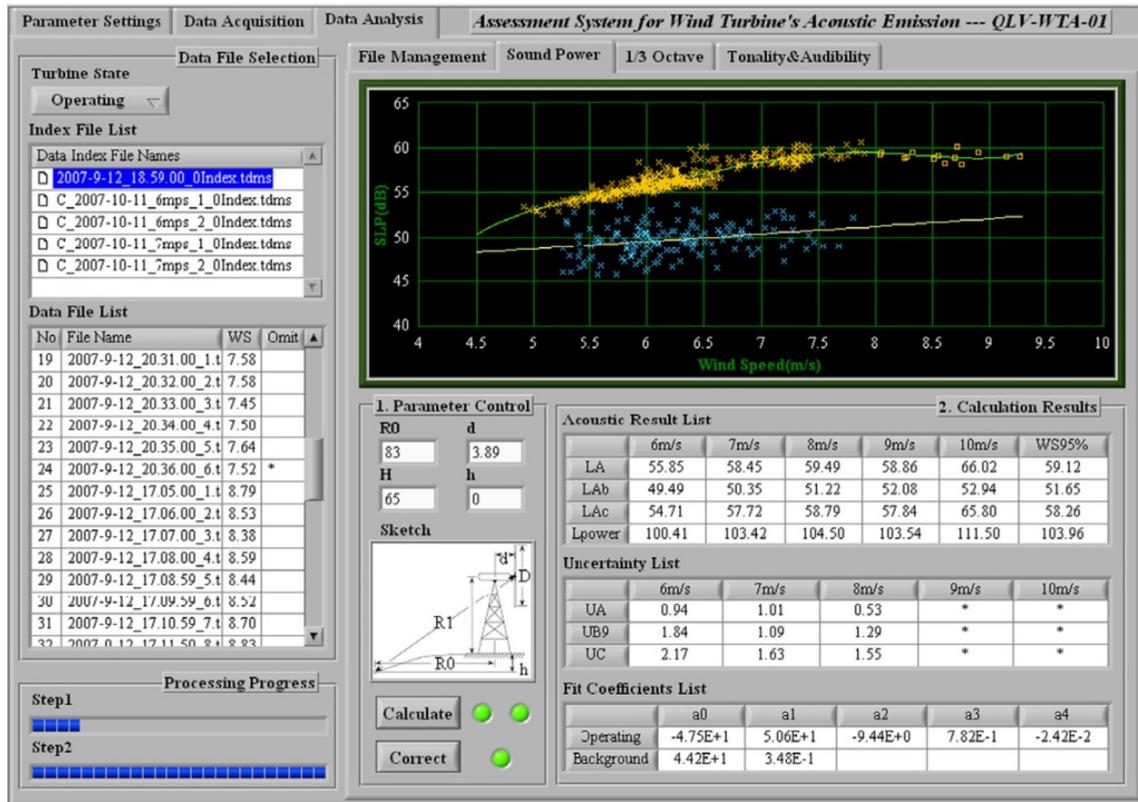


Figura 50. IHM montada por Lin *et al.* (2010) utilizando o *LabView®* para monitoramento remoto de ruídos de turbinas eólicas próximas a residências. Adaptado de Lin *et al.* (2010).

Outros autores utilizaram o pacote comercial da *National Instruments*, como Kis *et al.* (2004). Os mesmos criaram um sistema para medir histerese de campos magnéticos em tempo real (Figura 51).

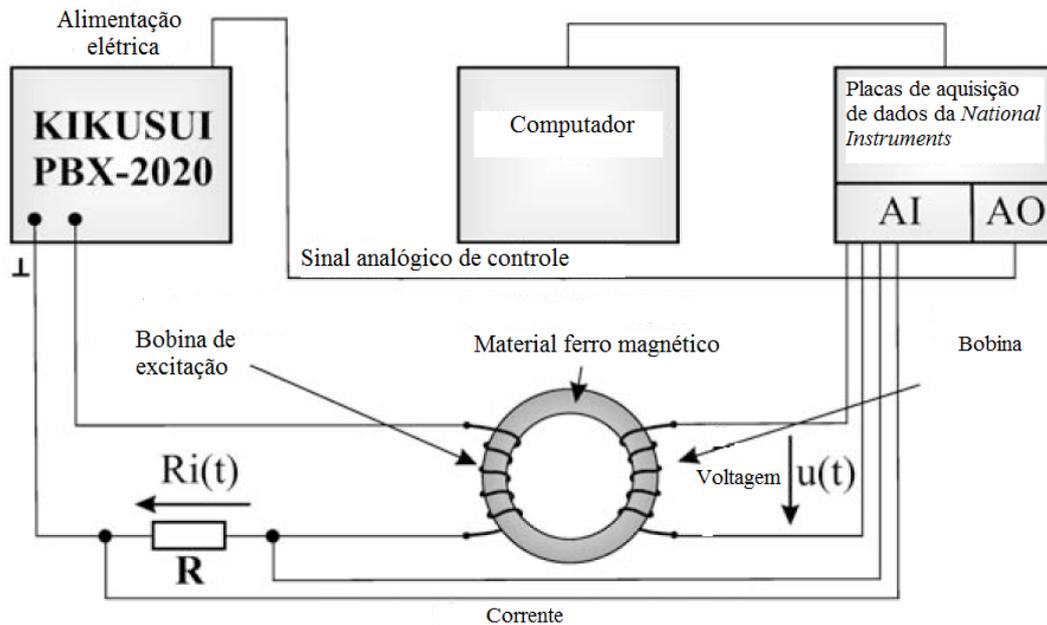


Figura 51. Esquema montado por Péter *et al.* (2004) para aferições de histerese de campos eletromagnéticos. Adaptado de Péter *et al.* (2004).

Respectivamente, o sistema supervisor e IHM que modelam o fenômeno e controlam mecanicamente tal aparato pode ser observado na Figura 52.

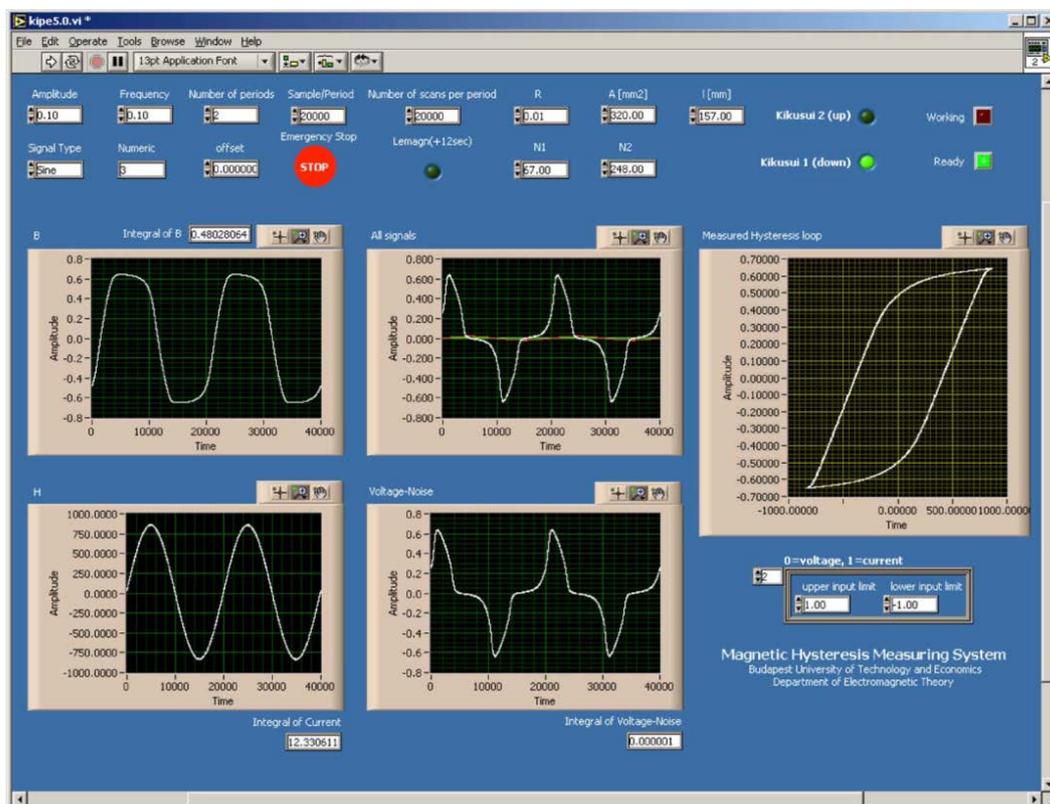


Figura 52. IHM montada por Péter *et al.* (2004) utilizando o LabView® para monitoramento em tempo real da histerese de campos eletromagnéticos. Adaptado de Péter *et al.* (2004).

Já Wang *et al.* (2012) utilizou tal solução comercial para monitorar em tempo real imagens espectrais entre 900 e 1700 nm. O esquema do aparato montado pode ser visto na Figura 53 com sua respectiva IHM.

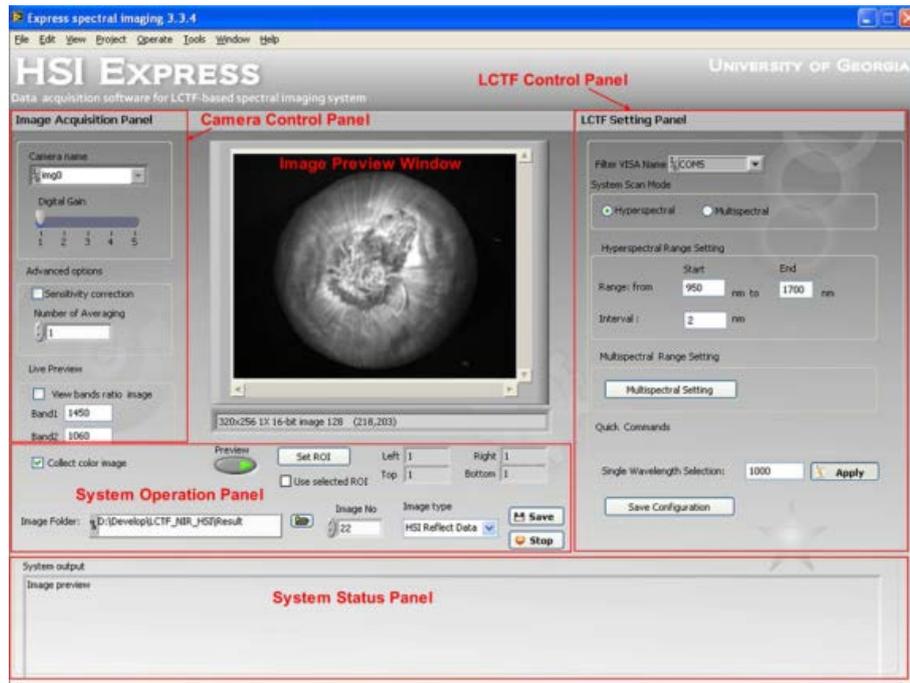
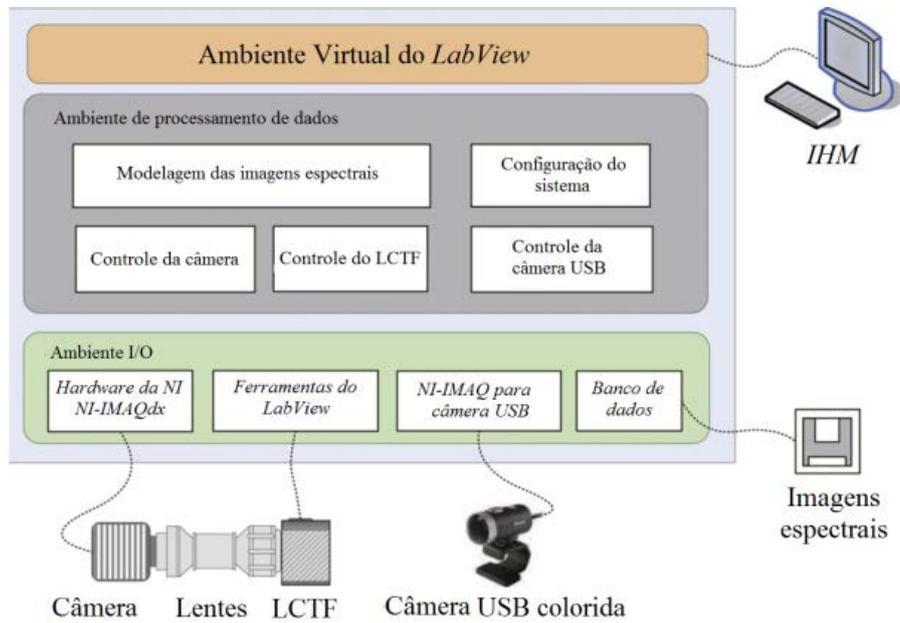
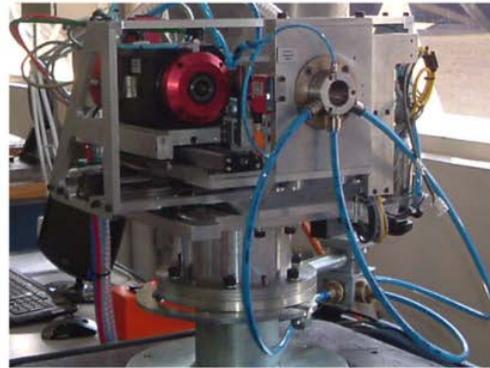
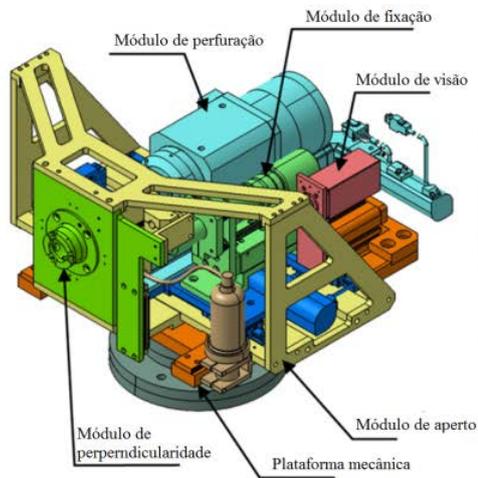


Figura 53. Esquema montado por Wang *et al.* (2012) para monitoramento em tempo real de imagens espectrais, acima. Abaixo é demonstrada a IHM montada utilizando o LabView® para visualização dos dados, modelagem e controle das câmeras e criação do banco de dados. Adaptado de Wang *et al.* (2012).

Anjos *et al.* (2013) utilizaram o *LabView®* para fins de verificação de desempenho desta plataforma no controle de um protótipo robótico multifuncional (vide Figura 54).



(a) Esquema do protótipo FARE

(b) Foto do protótipo FARE

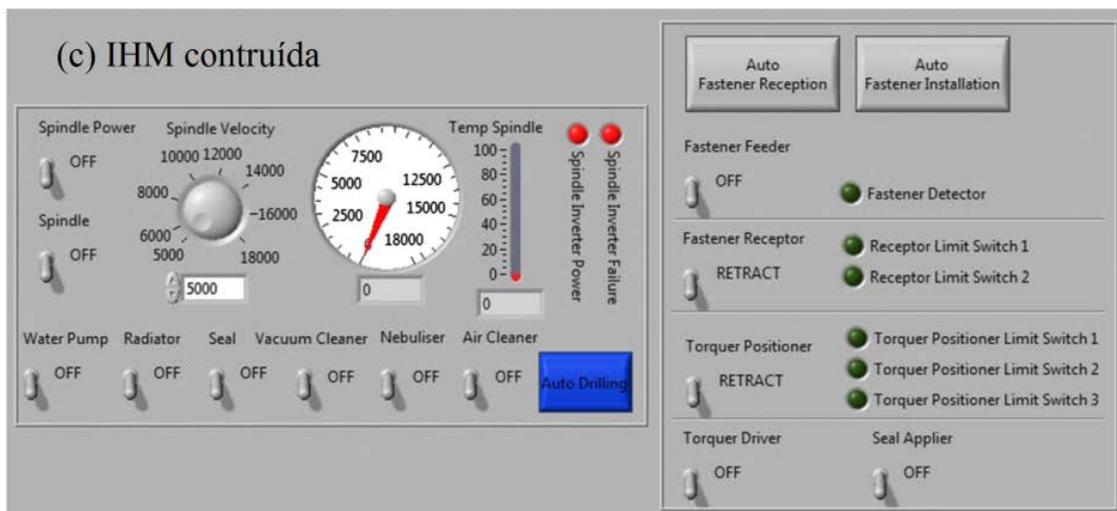


Figura 54. Esquema montado por Anjos *et al.* (2013) para controle de um protótipo robótico multifuncional. Adaptado de Anjos *et al.* (2013).

Alegria *et al.* (2009) utilizaram também a solução comercial de automação da *National Instruments* para monitorar em tempo real, via polarização induzida, o nível de contaminação em solos com diesel. O esquema de seu aparato experimental e a interface criada no *LabView®* podem ser vistos na Figura 55.

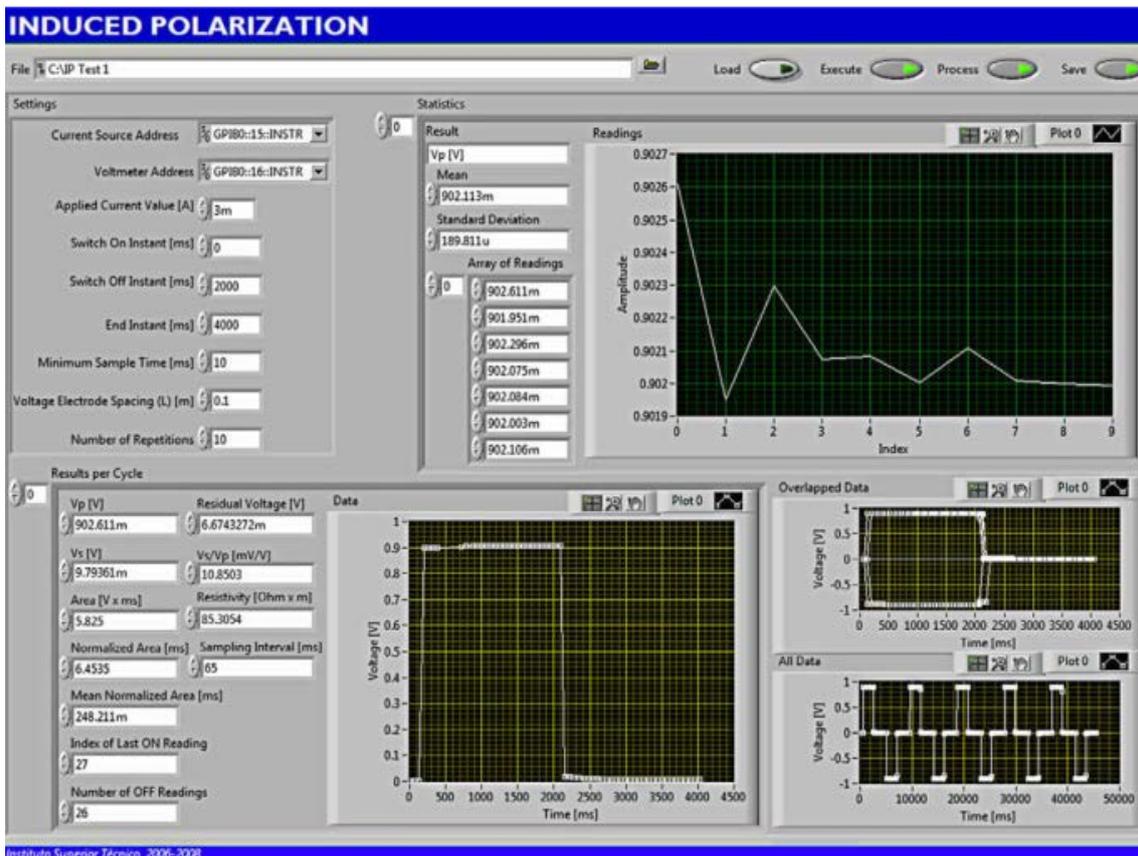
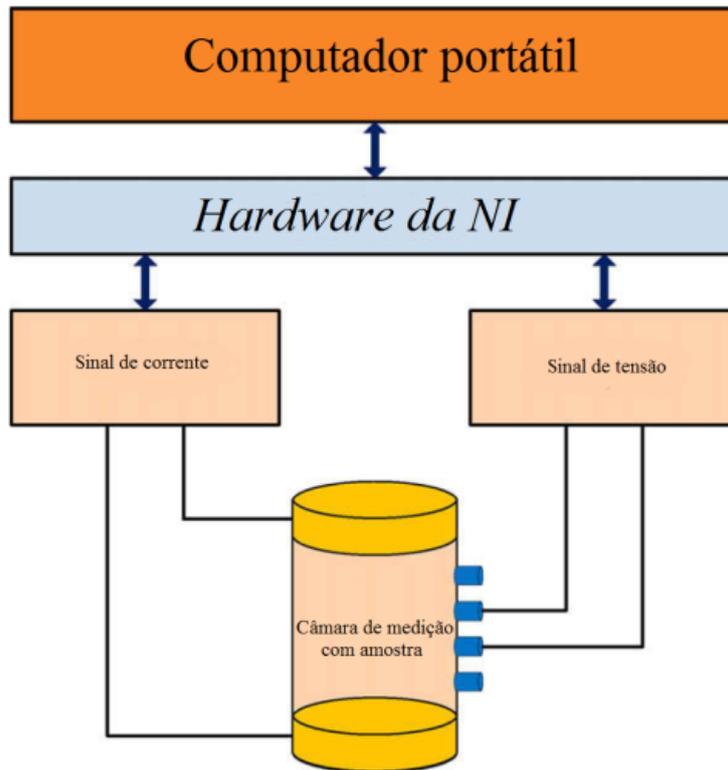


Figura 55. Esquema montado por Alegria *et al.* (2009) para monitoramento em tempo real de contaminação de diesel em solos, acima. Abaixo é demonstrada a IHM montada utilizando o LabView®. Adaptado de Alegria *et al.* (2009).

Tomic *et al.* (2014) também fizeram uso do sistema comercial para aferir e monitorar, em tempo real, os níveis de concentração de gases poluentes em uma determinada área urbana. Estes autores além da IHM no computador, também fizeram uma interface em Android para acesso remoto aos dados via celular. Na figura é possível observar o esquema simplificado montado para monitoramento.

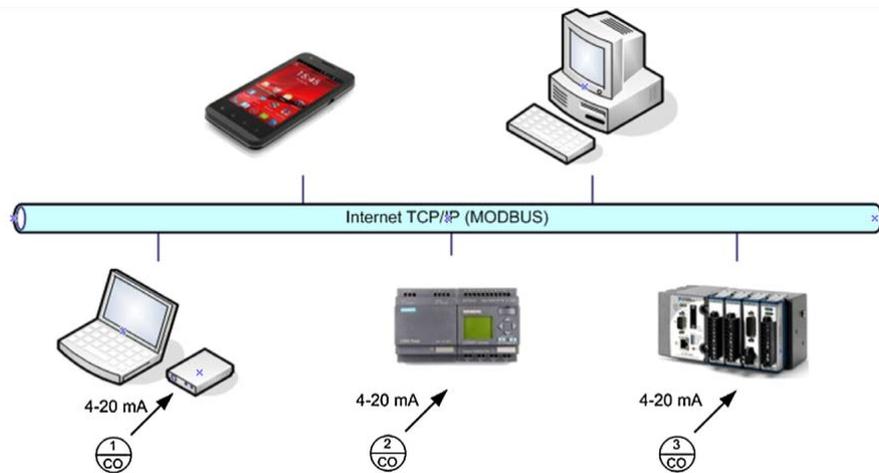
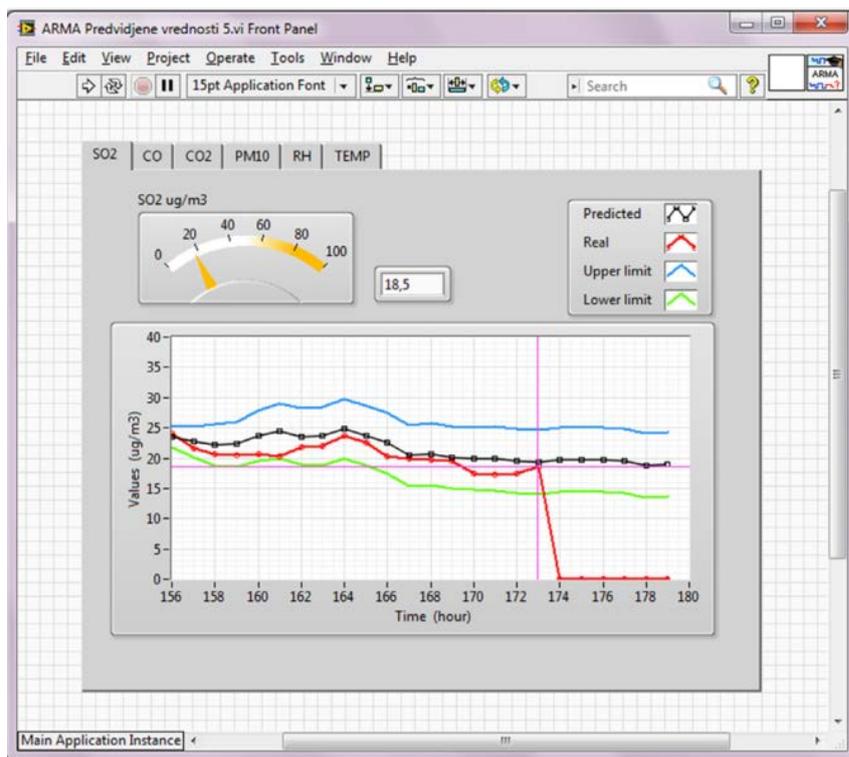


Figura 56. Esquema montado por Tomic *et al.* (2014) para monitoramento em tempo real da contaminação por gases poluentes em área urbana. Adaptado de Tomic *et al.* (2014).

O sistema descrito na Figura 56 ilustra as entradas dos sinais, na parte inferior, e a recepção dos mesmos via internet nos clientes remotos, na parte superior. O último *hardware* da direita da parte inferior do esquema é pretendido de se usar neste trabalho.

A IHM para PC e para *Android* podem ser observadas na Figura 57.



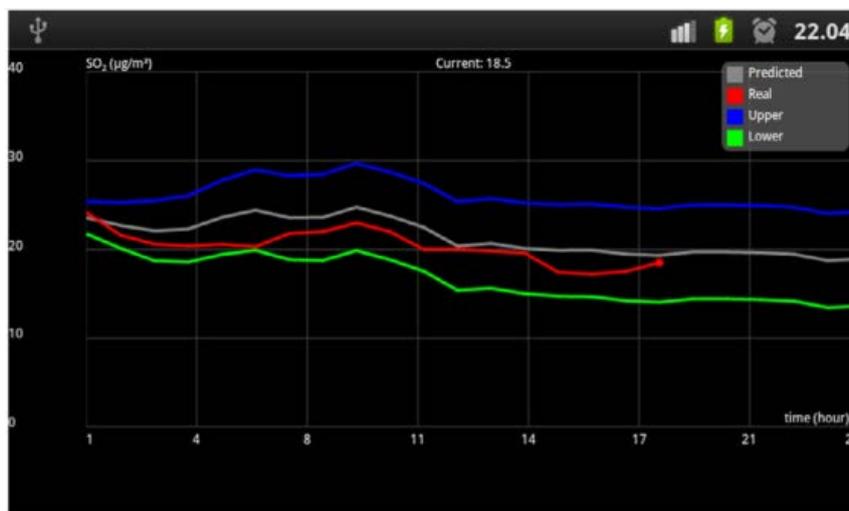


Figura 57. IHM montada para PC (acima) e para *Android* (abaixo), por Tomic *et al.* (2014). Foi utilizado o *LabView*® para monitoramento em tempo real de poluentes atmosféricos. Adaptado de Tomic *et al.* (2014).

Todas as informações contidas neste capítulo deixam claro que este trabalho é parte de um estudo maior, que é chegar à construção de um sistema que seja capaz de não somente aferir as propriedades, mas também de corrigi-las em tempo real automaticamente. Este trabalho é a transformação de um sistema acadêmico em um produto preliminar de mercado com viabilidade de testes em campo de perfuração. Assim, delineia-se com mais clareza seu respectivo escopo: usar o *know-how* dos trabalhos divulgados adequando os *hardwares* já testados pelo grupo de pesquisa em uma estrutura móvel e compatível com as legislações de sonda. Isto conseqüentemente exigirá a construção de uma infraestrutura de informática, como apontou Broussard *et al.* (2010). O acervo literário demonstrou que a utilização do pacote comercial da *National Instruments* poderá vir a ser um catalisador para a construção de tal infraestrutura.

CAPÍTULO III

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para transformar a estrutura de Magalhães *et al.* (2014) em um produto viável para testes em sonda, o primeiro passo foi redesenhar toda a estrutura hidráulica e elétrica para finalidade de compactação, solução de problemas operacionais e aumento da segurança operacional. Além de construir a infraestrutura de tecnologia da informação e IHM.

Abaixo segue uma lista dos materiais e trabalhos já executados por Magalhães *et al.* (2014):

- Construção de um *loop* de fluidos para produção de fluidos de perfuração e instalação dos sensores adquiridos;
- Modelagem e modificação do sensor de viscosidade para permitir total controle do equipamento remotamente;
- Desenvolvimento de um protótipo para testes de estabilidade elétrica em linha;
- Verificação do desempenho e recalibração dos sensores de densidade, condutividade elétrica e teor de sólidos em suspensão;
- Construção de uma rede de tráfego de informações provisória utilizando placas de aquisição de dados modulares acopladas ao conversor USB cDAQ, fabricados pela *National Instruments*;
- Construção de uma IHM provisória utilizando a plataforma *LabView®*, da *National Instruments*, para viabilizar a comunicação entre homem e a unidade de escoamento com os sensores instalados;

No escopo deste trabalho:

- Modelagem e adequação dos sensores de tamanho de sólidos em tempo real e teor de água em óleo;
- Redefinição da unidade de Magalhães *et al.* (2014) em um módulo móvel;
- Construção de uma IHM, infraestrutura de tráfegos de dados, armazenamento e sistema supervisor a nível profissional, já com potencialidade para ser um produto comercial;

3.1. Sensores adquiridos

3.1.1. Sensor de tamanho e contagem de partículas

Foram adquiridos para somar aos sensores já existentes o sensor de tamanho de partículas e o sensor de teor de água em óleo. Ambos foram instalados na unidade de Magalhães *et al.* (2014) para testes de desempenho. Somente após o término dos testes nestes dois sensores é que a unidade foi redesenhada. Assim, garantiu-se que todos os sensores que seriam usados na montagem final possuiriam funcionamento adequado com fluidos de perfuração.

Para o sensor de tamanho de partículas (PSD) foi adquirido o equipamento da Mettler Toledo, o FBRM, que utiliza técnica baseada em raio laser para efetuar suas medições. Basicamente ele emite um laser em alta frequência, de forma giratória, e à medida que os sólidos passam frontalmente ao laser ocorre a divergência do mesmo. Estas divergências geram cordas, que são contabilizadas e transformadas em número de partículas e tamanho. Este trabalho não modificou o equipamento nem realizou nenhum tipo de calibração especial. Na Figura 58 é demonstrado o equipamento instalado no *loop* de Magalhães *et al.* (2014) e na Figura 59 um diagrama didático do processo de medição usado pelo FBRM.



Figura 58. Sonda do FBRM instalada na tubulação do *loop* de Magalhães *et al.*, 2014.

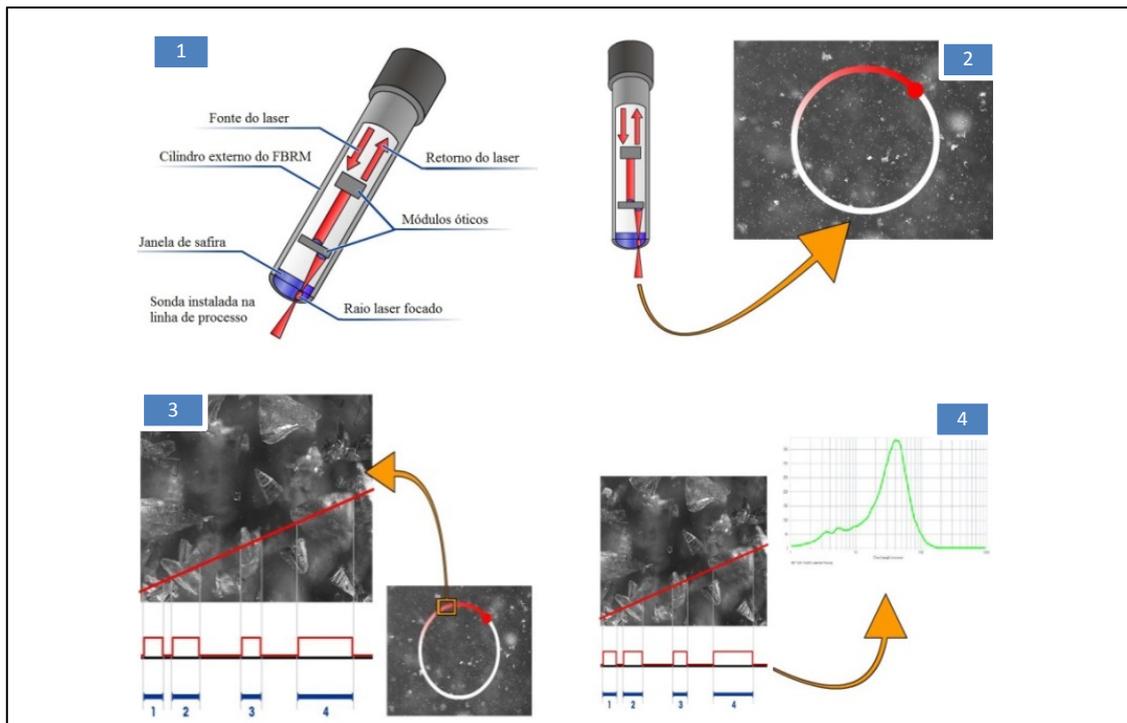


Figura 59. Esquema didático do processo óptico usado no FBRM. Fonte: Arquivo cedido pela Mettler Toledo.

Uma aplicabilidade adicional do FBRM é na caracterização de emulsões isentas de sólidos, já que as gotas de água presentes na fase dispersa da emulsão descentralizam o foco do laser da mesma forma que os sólidos o fazem. Assim, o equipamento abre a possibilidade de se estudar a estabilidade cinética de tais emulsões, uma vez que seria capaz de determinar a distribuição de tamanhos em tempo real das gotículas de água presentes na fase dispersa de uma emulsão isenta de sólidos.

3.1.2. Sensor de fração de água em óleo

Para determinação em tempo real do teor de água em óleo, foi adquirido o equipamento da *Agar Corporation*, modelo OW-201 (vide Figura 60).

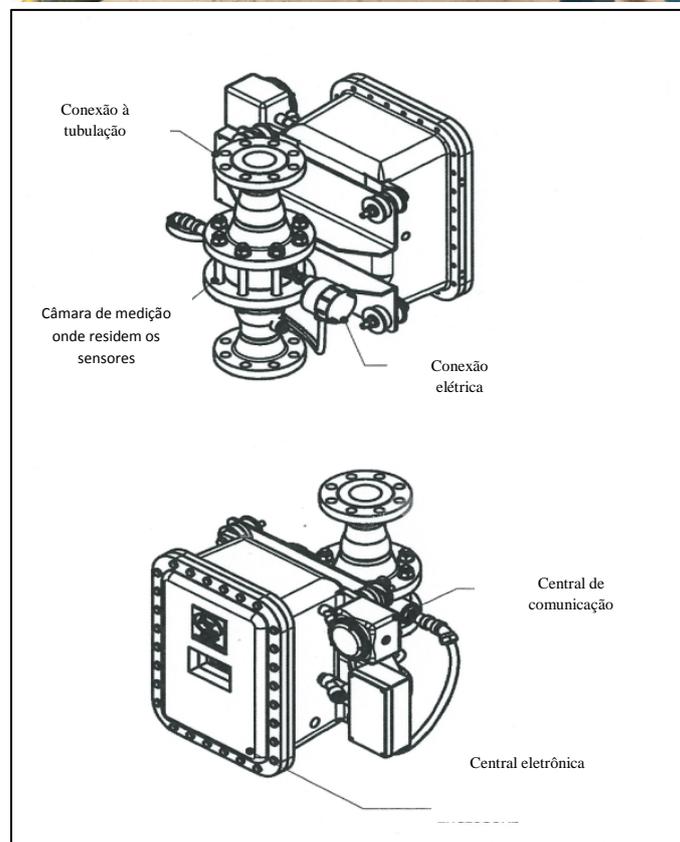


Figura 60. Foto do equipamento, acima, e esquema do OW-201, abaixo. Fonte: arquivo cedido pela Agar Corporation.

O princípio de funcionamento consiste em calibrar o equipamento com um fluido 1 puro, depois com um fluido 2 puro. O equipamento emite uma onda eletromagnética de um lado da câmara e a recebe do outro, medindo sua perda energética ao atravessar o fluido que está no meio do caminho. De posse destas constantes eletromagnéticas, quando a mistura dos fluidos atravessar o sensor ele será capaz de medir a proporção de um no outro. O fato interessante sobre esta tecnologia é que a viscosidade, densidade, sólidos inertes em suspensão, temperatura, vazão ou o fato dos fluidos 1 e 2 estarem ou não emulsificados não interferem na precisão do equipamento. No entanto, a salinidade interfere bruscamente. Desta forma, foi necessária uma calibração personalizada do equipamento, já que o fluido sintético em sua fase aquosa possui alta concentração de cloreto de sódio dissolvido. Atualmente este equipamento tem sido usado nos EUA para medição fiscal do teor de água em óleo para descarte de efluentes.

3.2. Readequação do *loop* de Magalhães *et al.* (2014)

A nova proposta consistiu em remodelar toda a estrutura hidráulica e elétrica do *loop*, visando compactá-lo e aperfeiçoá-lo para ser instalado dentro de uma estrutura robusta e móvel. A compactação é exigida, pois em sondas de perfuração espaço é algo não trivial de se conseguir. O aperfeiçoamento levou à seleção de tubulações de material mais nobre e mais robusto para trabalhar em temperaturas de até 300°C e pressões até 2000 psi. Acerca da estrutura para abrigar o sistema e torná-lo móvel, foi adquirido um container de carga reforçado, sendo este totalmente reformado para se tornar um ambiente adequado à unidade e habitável. Na Figura 61 pode ser observado um esquema da proposta para readequação do *loop* de Magalhães *et al.* (2014).

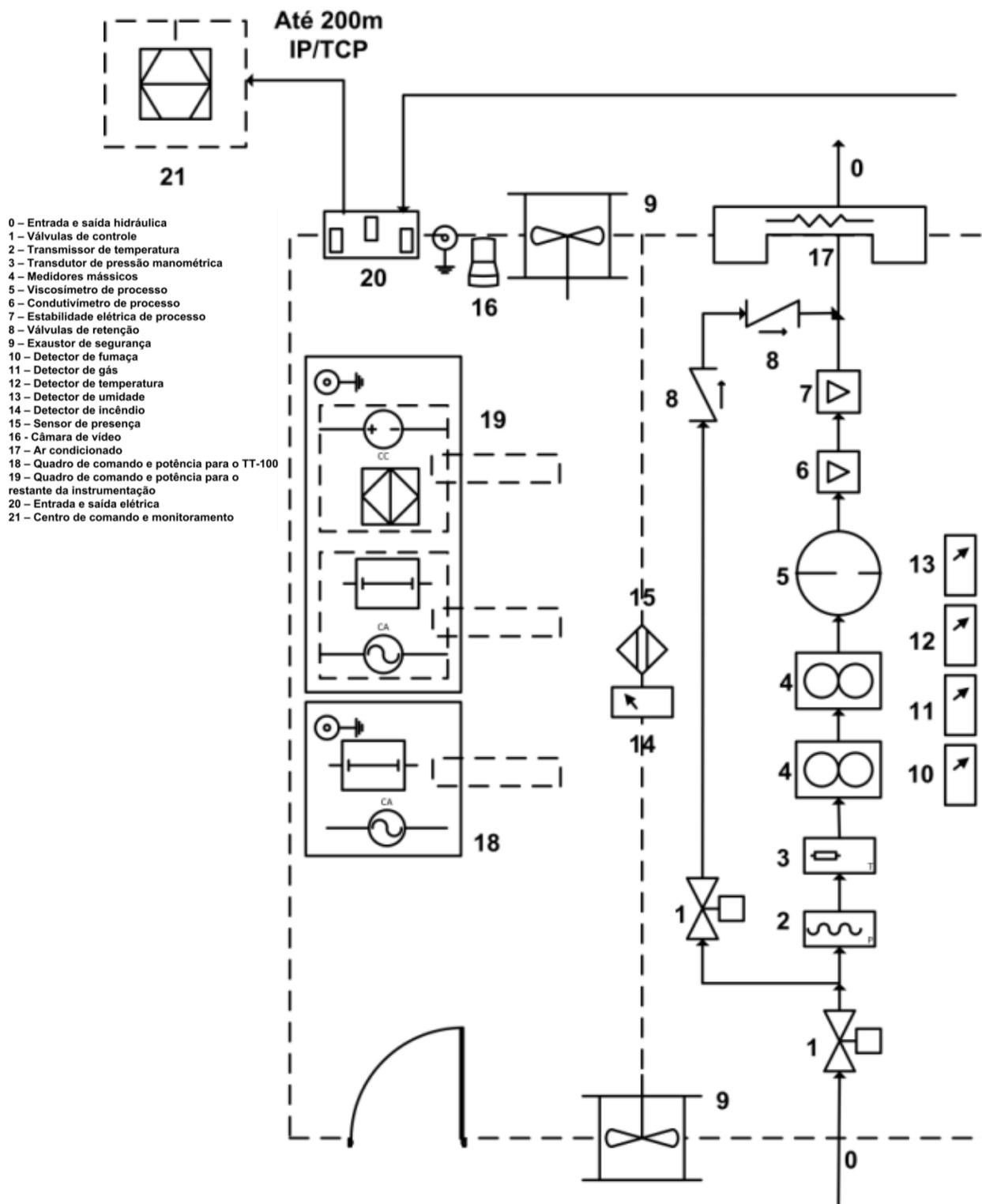


Figura 61. Esquema da unidade móvel proposta para readequar o loop construído por Magalhães *et al.* (2014).

Os materiais e serviços estimados para a readequação do loop foram:

- Container de carga reforçado;

- Materiais de acabamento em geral (tintas, lixas etc.);
- Revestimentos térmico e acústico;
- Sensores de segurança como presença, fumaça, gás inflamável, chama e calor;
- Ar condicionado;
- Exaustor;
- Sistema de iluminação, e iluminação de emergência;
- Sistemas de câmeras para monitoramento remoto;
- Rede de tomadas de uso geral;
- Serviços de solda;
- Substituição completa das tubulações e seus componentes;
- Substituição completa dos circuitos elétricos e seus componentes;

3.3. Construção da infraestrutura de comunicação de dados e IHM

Todo o sistema precisa ser administrado e gerenciado por um *software* que seja capaz de conter os algoritmos necessários para o correto funcionamento dos equipamentos, e que seja capaz de fazer interface entre o homem e as máquinas. Administrar tamanho tráfego de dados manualmente é impossível e indesejável. O acesso às informações deve ser disponibilizado localmente e remotamente, isto é tão importante quanto uma correta calibração dos sensores. Sem acesso remoto e automatizado, as repercussões na logística e gerenciamento de recursos humanos seriam praticamente nulas, não melhorando em nada a situação atual de aferição das propriedades do fluido de perfuração. Trocar instrumentação de bancada por instrumentação com informações apenas em *displays* locais continuariam a exigir um profissional para reportar as medições. Para se atingir o avanço tecnológico completo, uma infraestrutura de informática foi proposta, representada pela Figura 62.

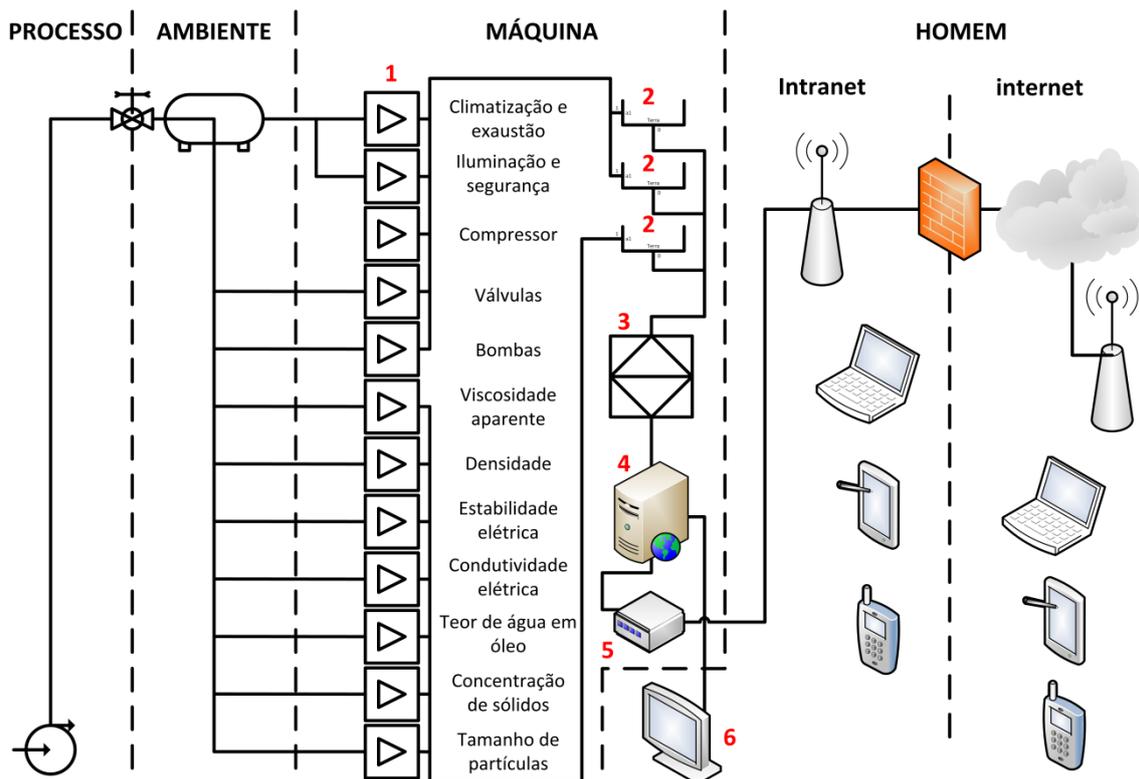


Figura 62. Esquema da infraestrutura de informática proposta por este trabalho.

A partir das aferições efetuadas pelos sensores inseridos no processo (1), o tráfego de informações dos mesmos é encaminhado para placas de aquisição de dados (2). O protocolo escolhido foi o de sinais analógicos³³. As placas de aquisição (2) por sua vez são conectadas a um chassi (3) que converte e administra todos os sinais num protocolo de comunicação digital. Este chassi se conecta a placa mãe de qualquer computador (4) via USB. O próximo passo é a utilização de um *software* para programação dos algoritmos de administração deste *hardware* e conseqüente criação da IHM (6) e da interface de exportação de dados (5). Este trabalho utilizou a solução comercial da *National Instruments*. A lista de componentes que compõem esta solução pode ser encontrada na Tabela 1.

³³ Sensores enviam e recebem sinais de corrente ou tensão. Corrente $\pm 20\text{mA}$ e tensão $\pm 10\text{V}$.

Tabela 1. Componentes adquiridos para construção da infraestrutura de informática

Descrição	Função
Chassi com 8 <i>slots</i>	Comunicação geral
Saída analógica $\pm 20\text{mA}$	Gerar comandos
Entrada analógica $\pm 20\text{mA}$	Receber comandos
Relê eletrônico	Comandar alimentação
Entrada analógica $\pm 10\text{V}$	Receber comandos
<i>LabView</i> ®	Plataforma para programação
Cabos elétricos diversos	Tráfego de informações
Filtros e conversores de sinal	Eliminar <i>loops</i> de terra ³⁴
Transformador para 24 VDC	Prover alimentação
Disjuntores	Proteção e seccionamento local
Contatoras	Seccionamento remoto
Relés de sobrecarga	Proteção avançada
Fusíveis ultrarrápidos	Proteção avançada
UPS ³⁵ senoidal	Alimentação estabilizada
Computador	Executar o <i>software</i>
Roteador	Lançar dados para <i>intra/internet</i>
Antena	Acesso dos clientes

Com a infraestrutura encaminhada, o último passo foi determinar a plataforma *LabView*® para a criação de um *software* que deve conter os algoritmos para os cálculos das grandezas em aferição em função dos sinais elétricos recebidos, ser capaz de gerenciar o ambiente do módulo, criar um banco de dados e permitir que clientes remotos se conectem e acessem seus dados. Tudo isto sob uma IHM amigável e intuitiva. Um esquema do *software* proposto pode ser visualizado na Figura 63.

³⁴ Corrente contínua adicional que gera ruído na aquisição de dados devido a um indesejável potencial entre o aterramento dos sensores e o negativo da fonte que os alimenta.

³⁵ UPS – *Uninterrupted Power Supply*, popularmente conhecido como *NO-BREAK*.

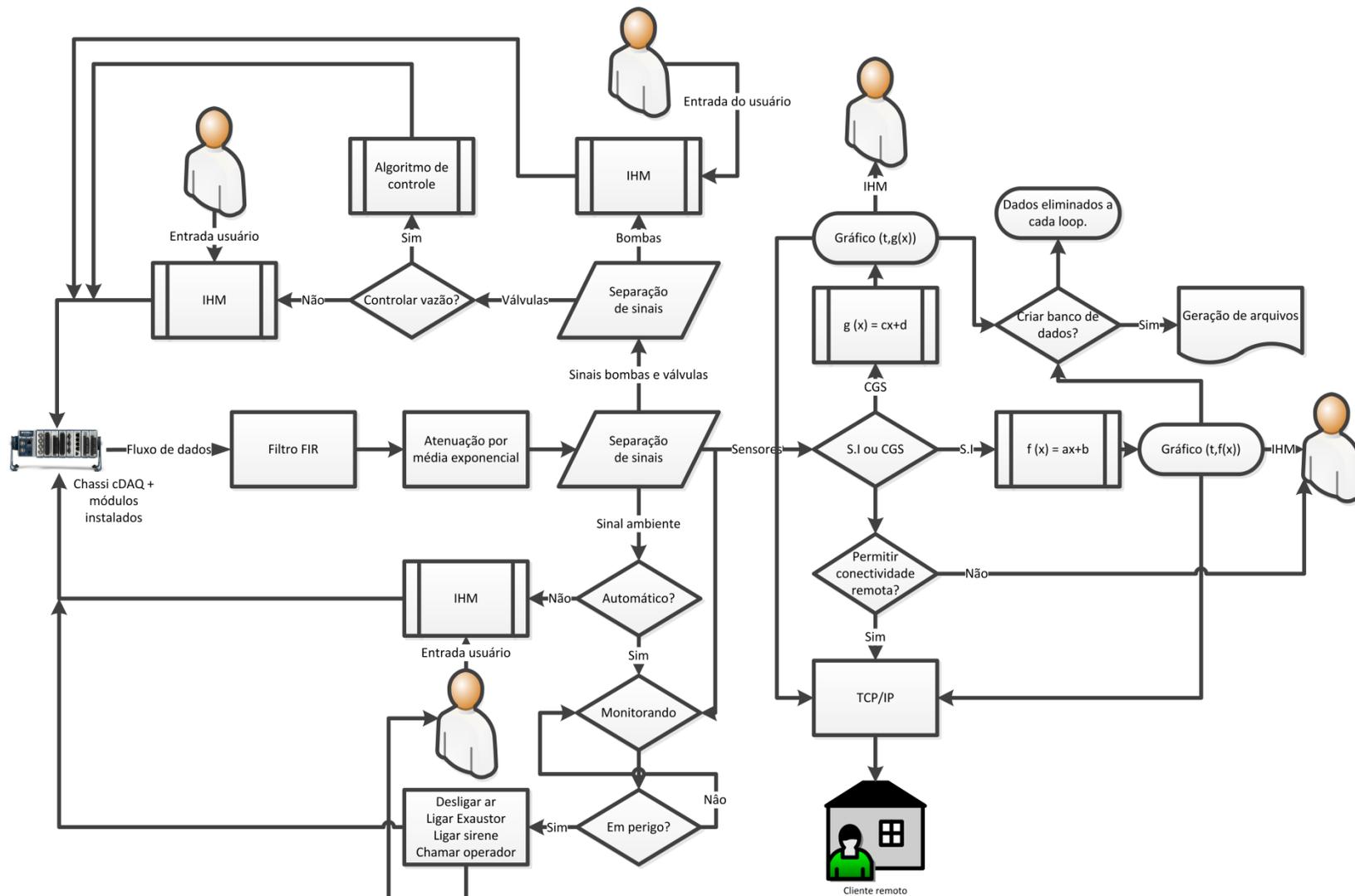


Figura 63. Esquema proposto para o sistema supervisório.

A Figura 63 ilustra o esquema simplificado do *software* proposto. A partir das entradas dos sinais provenientes dos sensores no chassi, o mesmo os encaminha para o *LabView*®. Nestes sinais, é aplicado um filtro FIR³⁶ para atenuar ruídos provenientes das operações com inversores de frequência. Em seguida, picos ruidosos restantes são atenuados com uma média exponencial aplicada a três dados de entrada, ou seja, a cada três dados um dado real é gerado, fruto da média exponencial destes três. Em seguida, os sinais aglomerados devem ser separados e encaminhados para suas respectivas lógicas e algoritmos. Os sinais dos sensores devem ser plotados em gráficos em função do tempo absoluto para se ter o acúmulo dos dados ao longo das horas, dias ou semanas. Os sinais das bombas e válvulas são tratados separadamente, pois são responsáveis pelo controle operacional do sistema, como pressão e vazão. Os sinais do ambiente da mesma forma seguem para seus próprios algoritmos.

Resta o detalhamento da proposta para a IHM. Os algoritmos e lógicas demonstradas na Figura 63 são executados em *background*, sem uma interface entre o nível de programação e o nível do usuário não há operacionalização do sistema.

A proposta consistiu em dividir a tela do operador em sete grupamentos distintos:

1. Controle de *software*;
2. Controle do ambiente;
3. Controle operacional;
4. Controle de limpeza;
5. Estado atual das propriedades de fluidos de perfuração;
6. Controle do viscosímetro;
7. Controle da estabilidade elétrica;

Cada grupamento representa um algoritmo diferente de programação. São sub-rotinas dentro de uma rotina maior de gerenciamento destas sub-rotinas. Esta proposta é uma ideia preliminar. Na medida em que os processos forem sendo desenvolvidos, mudanças poderão ocorrer devido a dificuldades inesperadas e /ou limitações de algum equipamento ou processo. Um esquema simplificado do que o operador irá observar na tela do computador pode ser observado na Figura 64.

³⁶ FIR – *Finite Impulse Response*

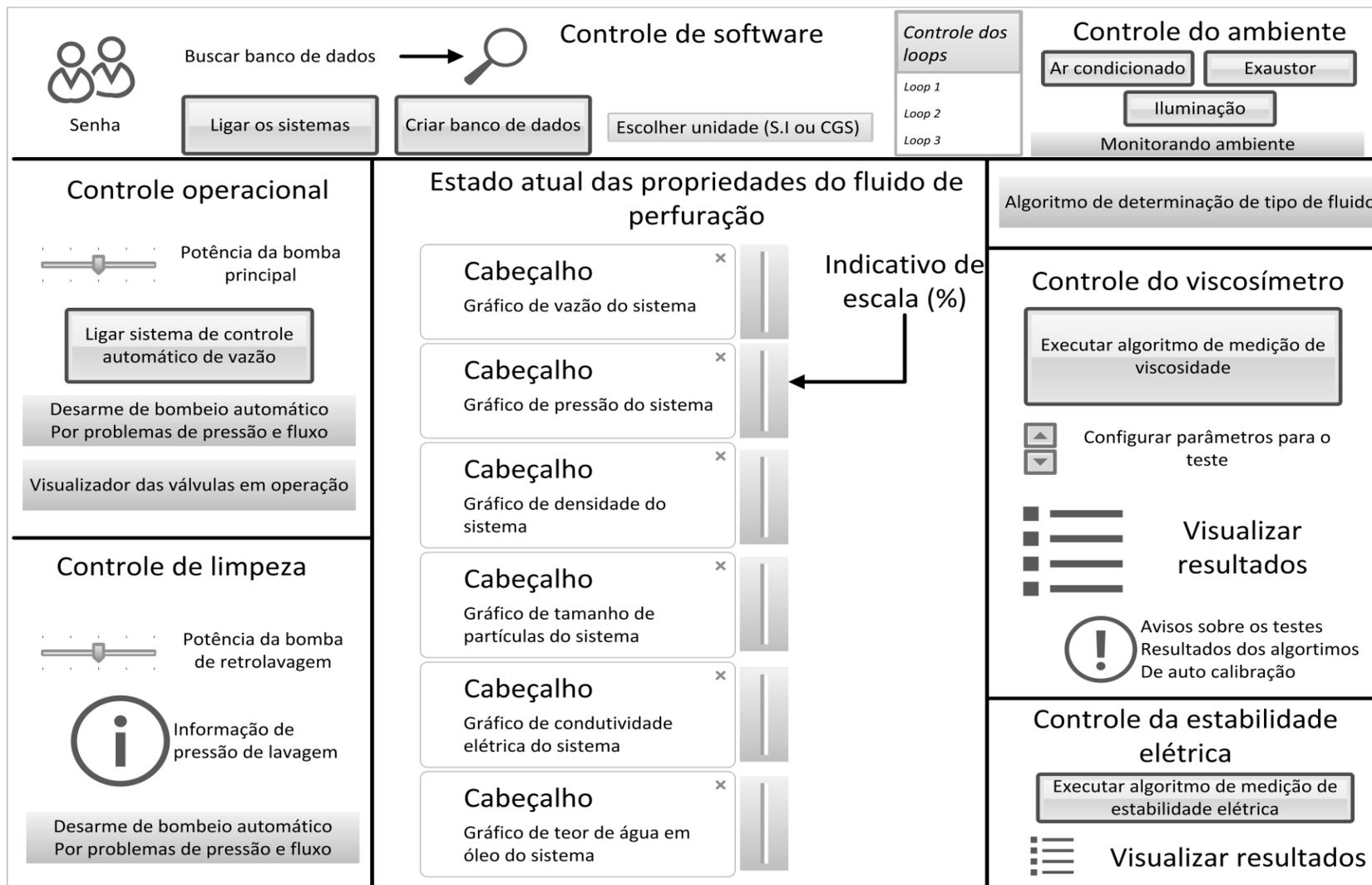


Figura 64. Esquema proposto para a IHM do sistema supervisorio.

Esta tela será exibida no monitor do computador local (*host*) e será reproduzida em qualquer dispositivo móvel (*tablets* ou *smartphones*) ou computador que se conectar via intranet ou internet ao computador servidor (*host*). A conexão será via *Browser* (Internet Explorer, Chrome, Firefox, Net Scape) com endereço de IP local (se intranet) ou nome DNS (se pela internet). Haverá ainda a possibilidade do uso de um aplicativo (compatível somente com *tablets*) para visualização remota das propriedades. Neste aplicativo existirão duas versões, a do usuário e a do administrador. A versão do usuário somente mostrará resultados, a versão do administrador possuirá alguns privilégios de controle, como ligar e desligar a bomba, ligar e desligar luzes, controlar ou não a vazão etc.

A IHM criada pelo aplicativo é diferente da IHM do sistema supervisorio. A vantagem de acessar os dados via aplicativo é a possibilidade de se comandar remotamente, ao invés de apenas observar. A desvantagem é uma IHM mais simples e só funciona em intranet. A seguir serão dados mais detalhes das funções de cada grupamento que se pretende criar:

- Controle de *Software*: Nesta seção o usuário deverá entrar com a senha para ligar os equipamentos, sem a senha o sistema não funcionará. Também será nesta seção que o usuário encontrará os botões de comando para gerar relatórios, criar banco de dados e escolher quais unidades serão usadas para expor os gráficos, S.I ou sistema inglês. Botões para acessar o histórico das operações e o banco de dados também estarão ali. Haverá indicadores mostrando a hora e o dia atuais, assim como o *status*³⁷ de funcionamento do *software*;
- Controle do ambiente: Nesta seção o usuário poderá ativar ou desativar os algoritmos de monitoramento de segurança do ambiente. Poderá ligar e desligar o ar condicionado, exaustor e luzes;
- Controle operacional: Nesta seção serão colocados os comandos para controle da bomba, assim como das válvulas. Também é nesta seção que estarão os algoritmos de controle de vazão e de supervisão da pressão de bombeio;
- Controle de limpeza: Aqui o usuário poderá comandar a bomba de retro lavagem e as válvulas de redirecionamento de fluxo;
- Estado atual das propriedades de fluidos de perfuração: Estarão nesta seção os gráficos ao longo do tempo das propriedades aferidas em tempo real, com exceção da viscosidade aparente e da estabilidade elétrica, que

³⁷ O usuário poderá checar o andamento dos *loops*. Cada *loop* processado significa que todo o algoritmo foi processado com sucesso. Caso haja problemas com o *software* ou sistema operacional, os contadores dos *loops* pararão de contabilizar o processamento de dados.

exigem algoritmos próprios. As grandezas serão acumuladas na ordenada em função do tempo absoluto, ou seja, em função da data do Windows. Isto implicada que o gráfico será reorganizado automaticamente de modo a manter todo o histórico na tela desde o início do funcionamento do *software*. Se o mesmo se mantiver ligado por 30 dias, estarão acumulados no gráfico os 30 dias de medição, a uma taxa de um dado por segundo. Ao lado de cada gráfico será posto uma escala para o usuário verificar em que faixa da escala do sensor ele está operando. Ao chegar em 95% da escala do sensor, um aviso visual será disparado;

- Controle do viscosímetro: Para se aferir viscosidade em tempo real é necessário tráfego de informações nas duas direções, ou seja, é necessário o usuário programar o teste e repassar os comandos ao sensor, que ao executá-los, repassará as respostas obtidas. Isto é programaticamente mais complexo do que sensores que exigem apenas energização. Assim, nesta seção o usuário primeiramente parametrizará o teste e depois comandará seu início (o início do teste pode ser programado para ser feito automaticamente em intervalos de tempo definidos). Existirá um indicador para informar cada estágio da aferição. Ao final, a resposta será organizada na tela;
- Controle da estabilidade elétrica: Da mesma forma com o viscosímetro, o teste de estabilidade elétrica exige parametrização e comando para iniciar (pode ser temporizado como dito anteriormente).

No próximo capítulo serão demonstrados os resultados alcançados na instalação dos dois novos sensores, o resultado da readequação do *loop* de fluidos de Magalhães *et al.* (2014), e a infraestrutura completa informatizada construída.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão elucidados os resultados típicos que os dois novos instrumentos foram capazes de fornecer quando inseridos no sistema supervisor construído. Também serão demonstrados por meio de fotos a Unidade Móvel de Pesquisa Científica, a UMPC, nome que recebeu o sistema final após readequação do *loop* de fluidos de Magalhães *et al.* (2014). Faz parte da UMPC o sistema de informática proposto, sendo neste capítulo demonstrados por meio de fotos e fluxogramas seus algoritmos e IHMs finais. A interface de acesso remoto de dados está em vigor e o aplicativo para *tablet* foi terminado. Os detalhes técnicos serão discorridos a seguir.

4.1. Resultados típicos dos sensores adquiridos

4.1.1. Resultados típicos do sensor de tamanho e contagem de partículas FBRM, modelo E25.

Para garantir a máxima homogeneidade de sólidos, o sensor foi inserido em 45° na tubulação, com fluxo de fluido ascendente e longe de qualquer acidente hidráulico (conforme Figura 58). Para testar seu desempenho e validação de suas medidas, foi bombeado um fluido de base aquosa contendo somente GX, isento de sólidos. A concentração de goma foi a mínima possível que para criar uma viscosidade no fluido que mantivesse os sólidos em suspensão. Este cenário foi criado para possibilitar a comparação entre os resultados provenientes do FBRM em tempo real com resultados obtidos no instrumento de bancada do fabricante Malvern, modelo MasterSizer 2000. Este instrumento é amplamente utilizado pelas indústrias que trabalham com material particulado para caracterização de distribuição de tamanhos. No entanto, só executa medições em particulados suspensos em ar ou água, ou em fluidos completamente transparentes, como álcool, por exemplo. Desta forma, em se tratando de medições em fluidos de perfuração, não há a possibilidade de comparação.

O teste consistiu em adicionar somente barita ao sistema, assim o FBRM aferiu o tamanho das partículas de barita em suspensão durante bombeio. Concomitantemente, alíquotas eram recolhidas e levadas ao Malvern para aferição do seu tamanho.

Na Figura 65 pode ser visto o equipamento de bancada abrigado nas dependências do Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF).



Figura 65. Foto do equipamento para medição de tamanho de partículas em bancada, Malvern, modelo MasterSizer 2000.

Os resultados obtidos para o teste de validação das medidas de tamanho de partículas podem ser observados na Figura 66, onde as curvas de distribuição de tamanhos fornecidas por ambos os instrumentos podem ser vistas.

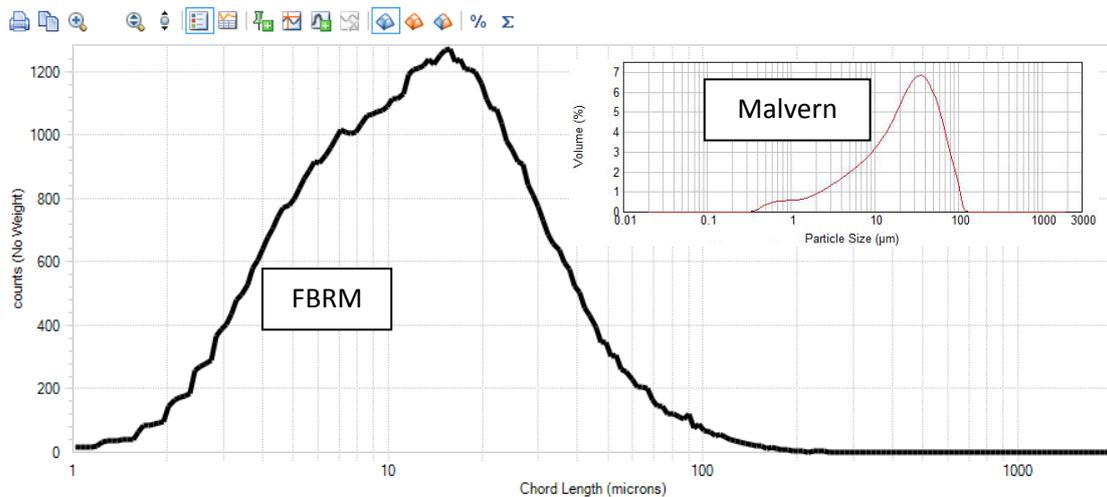


Figura 66. Curvas de distribuição de tamanhos providas em tempo real pelo FBRM e em bancada pelo Malvern.

Na Figura 66 é possível observar que o eixo da abscissa trata da mesma grandeza: tamanho da partícula em μm . Porém, o eixo da ordenada no caso do FBRM está organizado em termos de contagem de partículas e o do Malvern em termos de fração volumétrica da amostra. Apesar das ordenadas distintas, é possível ver semelhança nas medidas, para este caso específico de barita pura em suspensão. Apesar das curvas possuírem formas distintas, ambos os instrumentos determinaram que a distribuição de tamanhos daquele sólido variou entre 1 e 100 μm . Levando em consideração que os instrumentos utilizam princípios de medição diferentes, foram consideradas similares as

medições de tamanhos de partículas, dado a concordância encontrada nos valores do eixo da abscissa.

Num próximo passo testou-se o desempenho do FBRM em fluidos de perfuração de base oleosa, onde além dos sólidos em suspensão, há emulsão. De acordo com o princípio de medição do FBRM, como elucidado outrora, qualquer não continuidade de fase é interpretada como partícula, desta forma, a contagem total de partículas engloba não somente os sólidos em suspensão como também as gotículas de água dispersa. Nesta situação, não há comparação com o instrumento de bancada. Enfatiza-se que, na realidade, ainda não se conhece outro equipamento capaz de medir tais propriedades em tais condições.

Vide Figura 67 para os resultados plotando-se o número de partículas calculadas pelo FBRM em suspensão (sólidos + gotículas) em função da densidade aferida no medidor Coriolis.

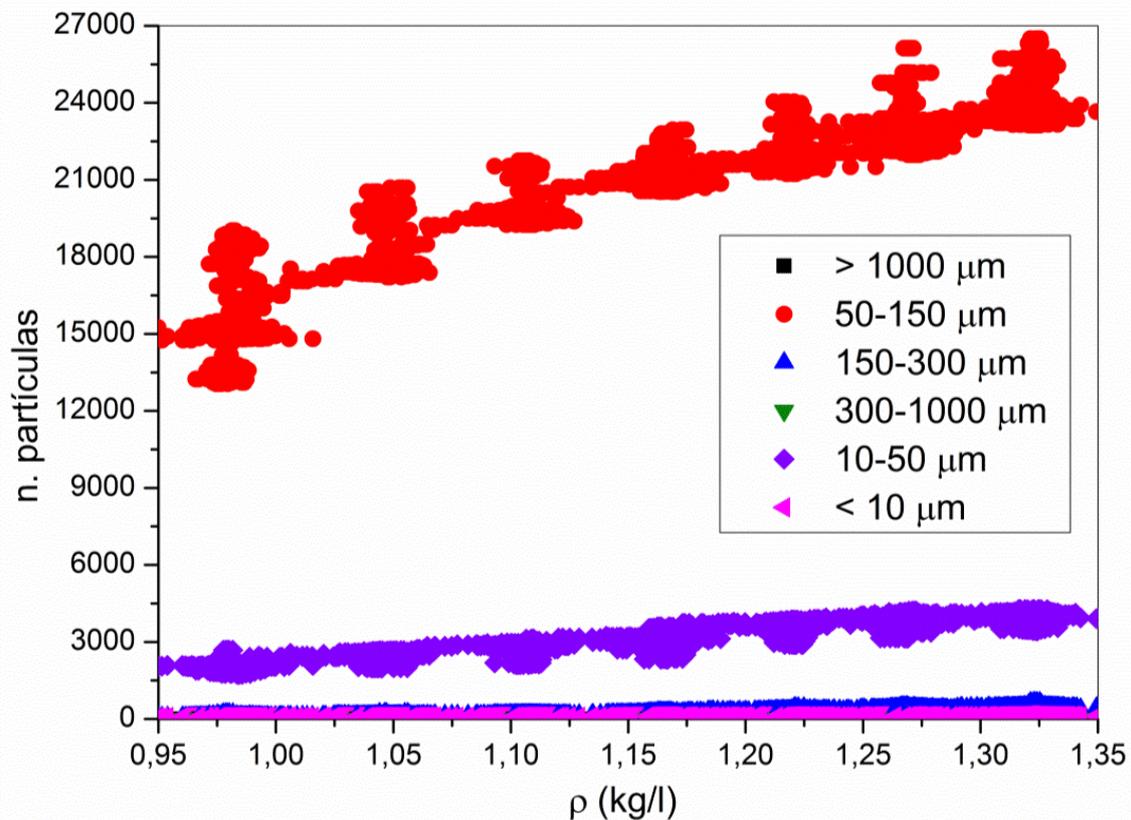


Figura 67. Número de partículas e classificação de tamanhos em função da densidade do fluido de perfuração.

Observando-se a legenda da Figura 67, é possível inferir que à medida que barita foi adicionada ao sistema, a densidade aumentou assim como o número de contagens de partículas. Estas tendências foram esperadas e coerentes. É possível notar certas dispersões nos dados em momentos específicos. Isto foi devido a grande quantidade de massa que se era vertida ao tanque. Após alguns minutos, o sistema atingia a homogeneidade e a leitura do equipamento se tornava estável.

É notório que quanto mais massa em suspensão, maior a densidade e maior o número de partículas. Quanto ao tamanho, é possível concluir que a distribuição granulométrica³⁸ do complexo formado (água + bentonita + barita) está expressivamente entre a faixa de 50 e 150 micrômetros³⁹, já que a população de partículas aumentou significativamente de 15000 partículas para 24000, aproximadamente. Também se vê que uma parte da massa está entre 10-50 micrômetros, já que esta população também aumentou, não na mesma proporção da outra, mas consideravelmente de 2000 a 4000 partículas, aproximadamente. Tamanhos entre 300 – 1000 micrômetros, menores que 10 e maiores que 1000 praticamente não estão presentes no sistema.

4.1.2. Resultados típicos do sensor de fração de água em óleo

O medidor de água em óleo foi instalado também com o fluxo do fluido no sentido ascendente, para garantir homogeneidade dos sólidos em suspensão. Para testar seu desempenho foi produzido um fluido sintético onde se variou, ao longo do tempo, a fração de água na emulsão (vide Figura 68). Neste momento do teste não havia nenhum sólido em suspensão. O procedimento consistiu em adicionar água ao tanque de mistura, em volumes definidos e em tempos pré-determinados.

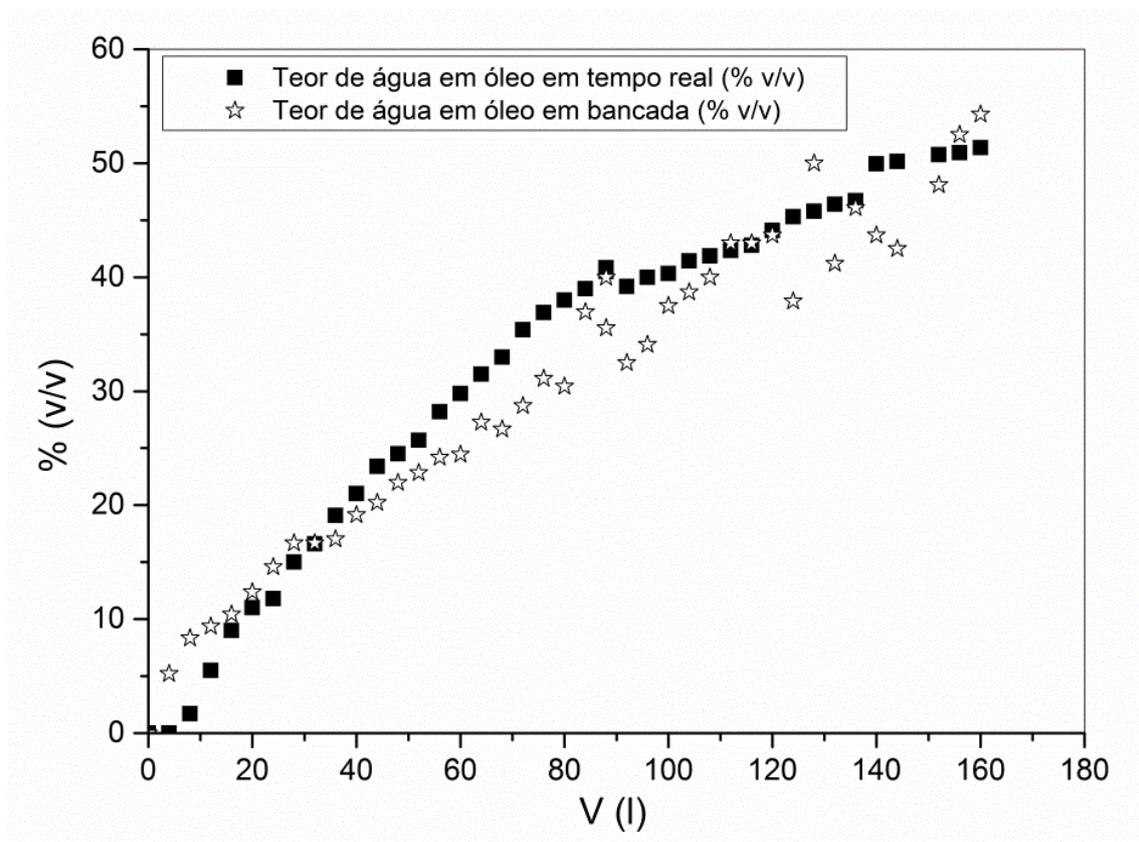


Figura 68. Fração de água em óleo em função do volume de água adicionado ao tanque.

³⁸ Perfil do tamanho das partículas de sólidos encontrados em uma determinada massa.

³⁹ Popularmente chamado. Micrômetro = micra metro = 10^{-6} metros

Em seguida, para verificar se a presença de sólidos se tornaria uma fonte de erros às medições, o fluido sintético recebeu bentonita e depois foi adensado com barita. O procedimento experimental foi semelhante ao teste anterior, verter os sólidos no tanque de mistura. A primeira medição presente na Figura 69 foi após a adição de bentonita, o restante provém da adição de barita. Os valores de teor de água em óleo foram plotados em função do incremento na densidade.

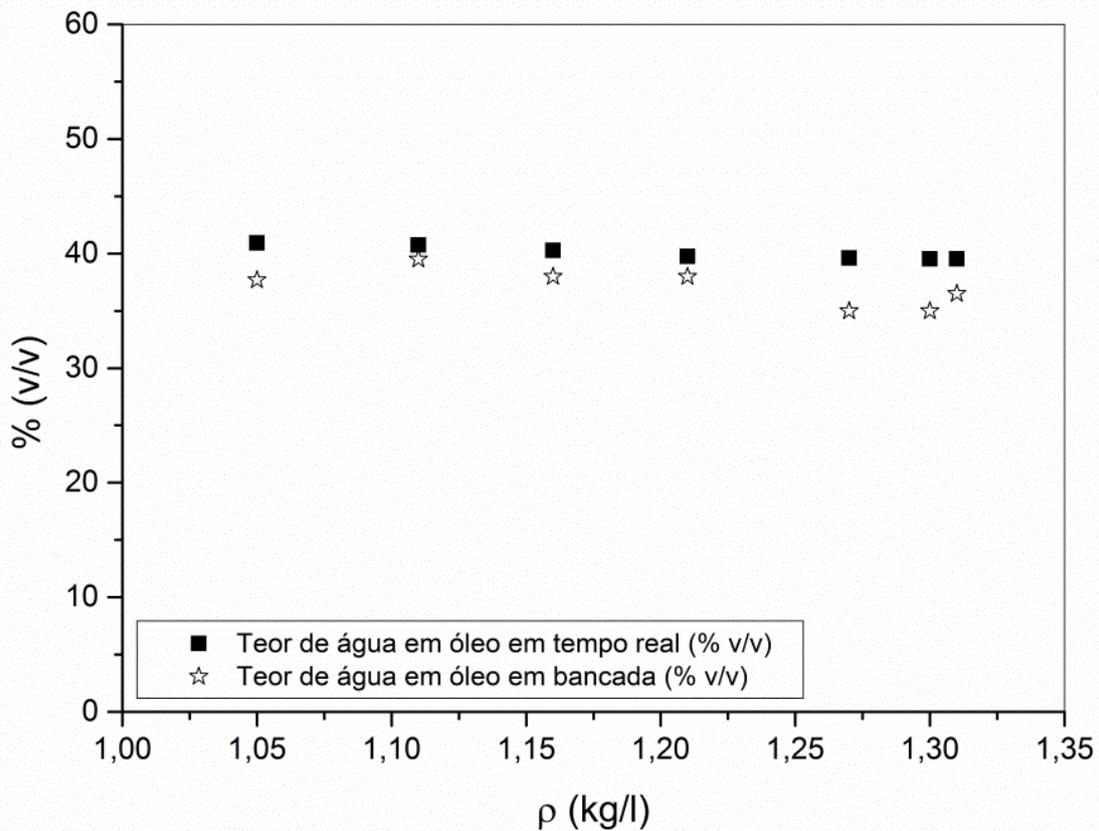


Figura 69. Fração de água em óleo em função da densidade do fluido de perfuração.

Observa-se que na Figura 69 que a adição de sólidos não influenciou o teor de água em óleo, o que é desejável. As medidas em tempo real e as medidas em bancada continuam similares.

Assim, ambos os instrumentos foram considerados validados para testes em campo, integrando a malha sensorial previamente testada por Magalhães *et al.* (2014).

4.2. Resultados obtidos para a readequação do *loop* de fluidos de Magalhães *et al.* (2014)

O *loop* de Magalhães *et al.* (2014) foi montado com a finalidade de produção de fluidos de perfuração e escoamento do mesmo pelos sensores. A unidade tinha o principal objetivo de fornecer fluidos com diferentes características para se verificar o desempenho dos sensores, para então poder, a partir dos resultados, propor melhorias, recalibrações ou até o desenvolvimento de novos sensores. Desta forma, não foi

desenvolvido a infraestrutura necessária para haver mobilidade do sistema, conectividade remota e o sistema supervisorio era simplificado. Na Figura 70 pode ser observada uma foto da unidade experimental destes autores.



Figura 70. Foto do *loop* de fluidos montado por Magalhães *et al.* (2014), abrigado no LEF, UFRRJ.

A unidade era capaz de produzir tanto fluidos sintéticos quanto fluidos aquosos, em até 1000 litros por batelada. Esta unidade foi utilizada para se testar, recalibrar e desenvolver instrumentos de medição em tempo real de viscosidade aparente, densidade, estabilidade e condutividade elétrica e concentração de sólidos suspensos.

A partir do esquema proposto na Figura 61, os primeiros passos para a readequação desta unidade foram a compra do container e sua reforma para adequá-lo a um módulo habitável (Figura 71). O próximo passo foi a remontagem do sistema sensor/linhas hidráulicas e sua inserção e compatibilização no ambiente do container (Figura 72). Toda a infraestrutura elétrica foi refeita visando possibilitar a infraestrutura de informática que não existia (Figura 73 e Figura 74). Por fim, foi instalado o sistema de segurança da UMPC para registro de eventos indesejáveis como danos, acidentes, roubo/furto ou até mesmo vazamentos (Figura 75).

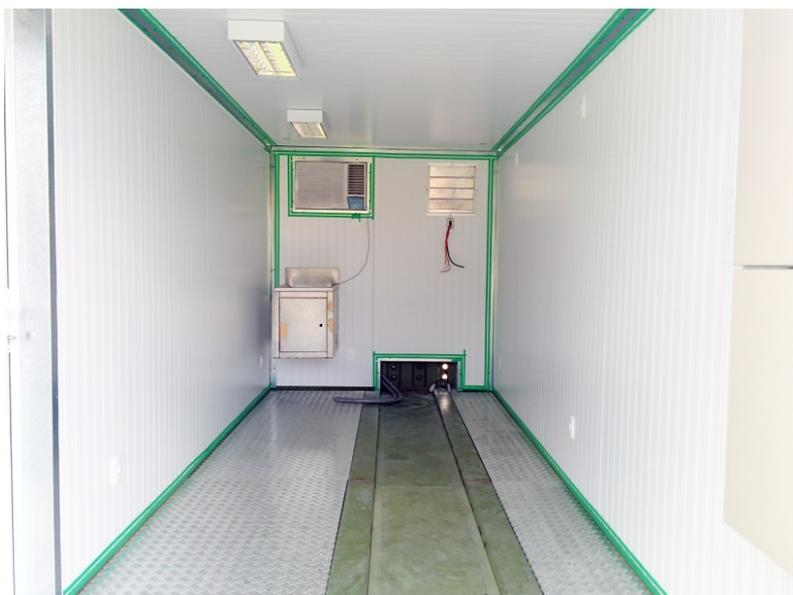


Figura 71. Foto do interior do container reformado, à esquerda, e seu perfil externo, à direita.



Figura 72. Fotos do interior do container com as linhas hidráulicas e sensores instalados

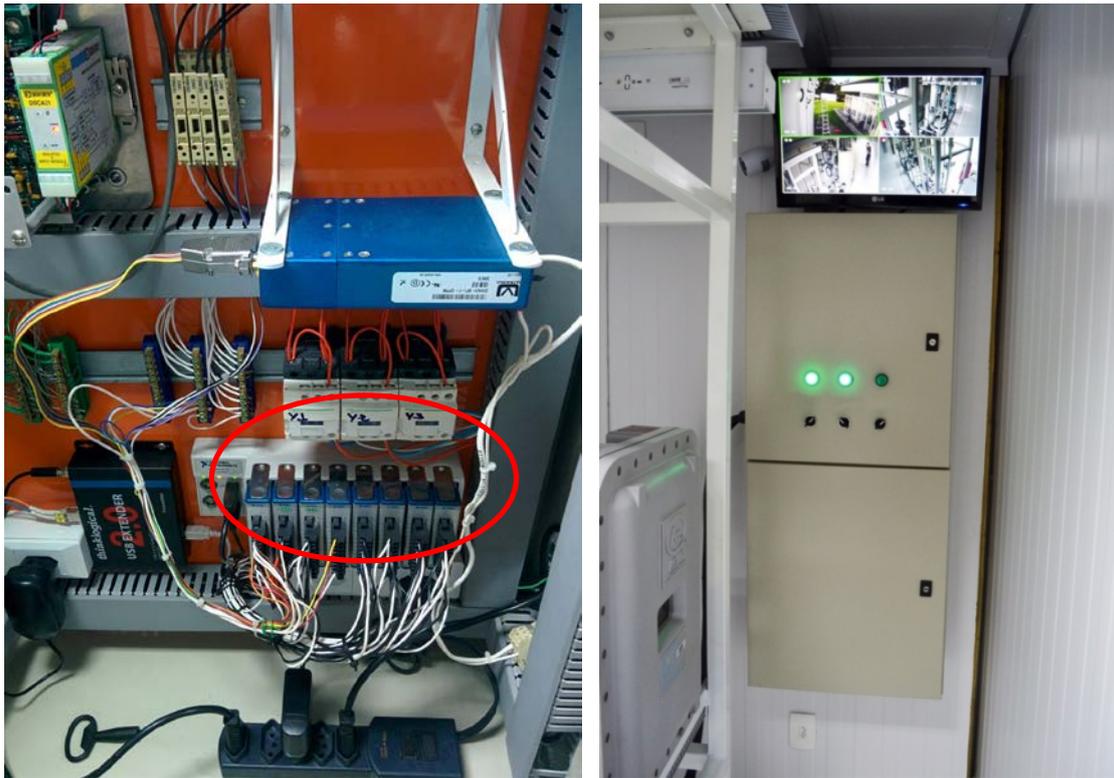


Figura 73. Foto parcial dos novos circuitos de automação produzidos por este trabalho (detalhe no chassi cDAQ e placas modulares), à esquerda. Quadros de proteção e distribuição, à direita.



Figura 74. Foto do quadro de automação, à frente, e quadro de inversores de frequência e comandos de luz, ar e exaustor, ao fundo.



Figura 75. Foto da câmera interna, acima, e externa, abaixo.

4.3. Resultados obtidos para a implementação do sistema supervisório, conexão de clientes remotos e IHM

Ao se programar um sistema supervisório na plataforma *LabView®*, o desenvolvedor se vê obrigado a desenvolver a IHM e a criar o sistema de exportação das variáveis para a interface de conexão remota. Isto ocorre naturalmente devido a própria filosofia da plataforma, que utiliza linguagem gráfica para programação. Maiores detalhes acerca das características desta linguagem podem ser encontrados no Anexo B.

A estratégia para explicar os resultados obtidos durante o uso da plataforma *LabView*® será abordar a IHM desenvolvida. Ao elucidá-la, consequentemente se estará explicando o próprio sistema supervisor e como as conexões remotas foram desenvolvidas. Por conseguinte, seus respectivos algoritmos serão abordados. É mais razoável obter entendimento de seu funcionamento a partir de sua IHM do que a partir dos diagramas de programação gerados, como os típicos apresentados na Figura 76 e Figura 77.

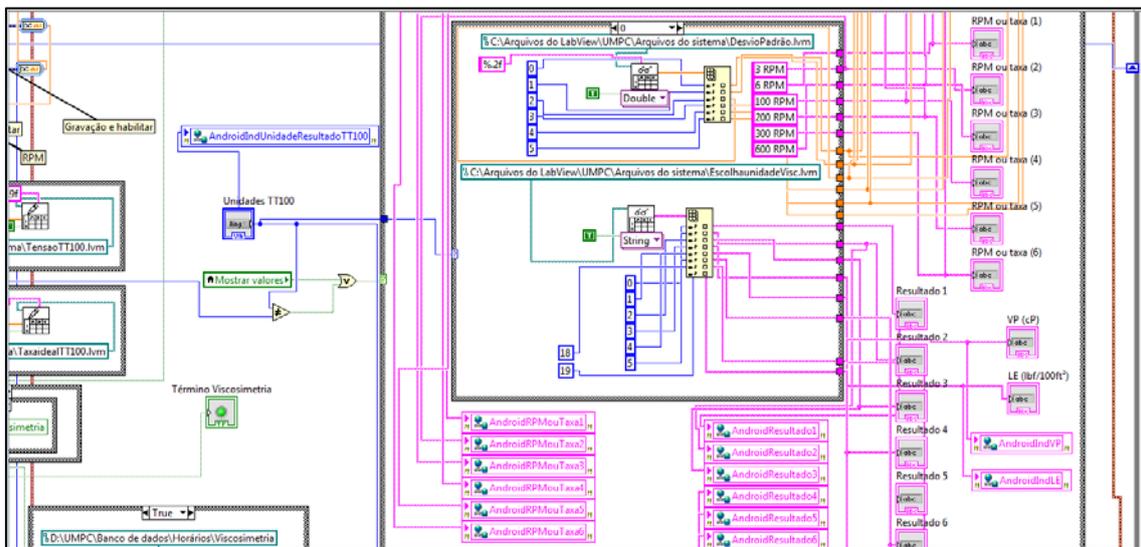


Figura 76. Parte do código responsável pela modelagem dos dados de viscosidade.

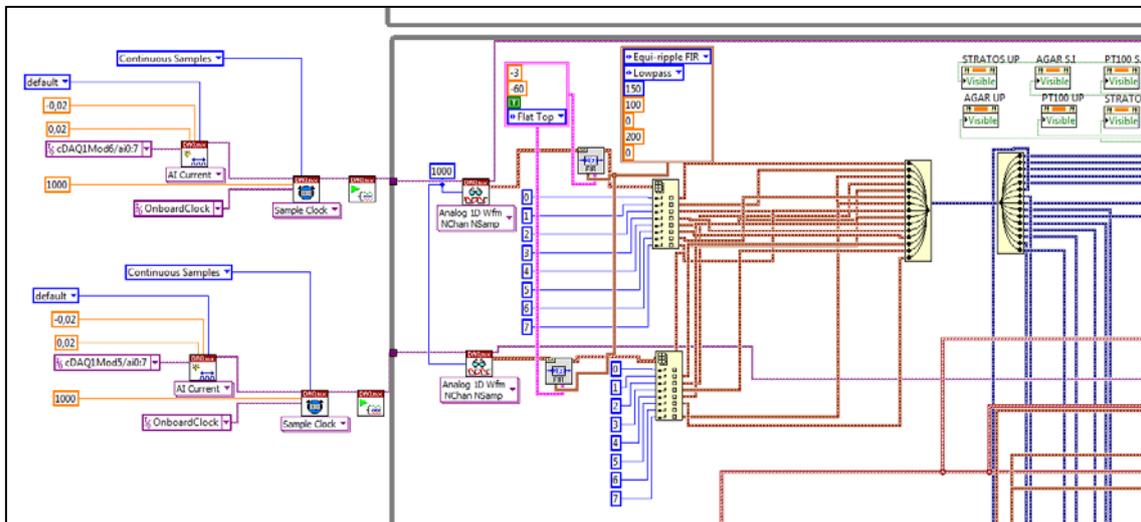


Figura 77. Parte do código responsável pela aquisição de dados dos sensores.

Na Figura 78 pode ser observada uma foto da IHM mencionada. Trata-se da interface criada para que se possa acessar e obter os dados do ambiente virtual. Fazendo alusão à estrutura do corpo humano, as linhas de programação citadas nas figuras anteriores seriam como os neurônios de um cérebro, e a IHM como os cinco sentidos do ser humano que o possibilita sentir, entender, controlar e visualizar o mundo externo.

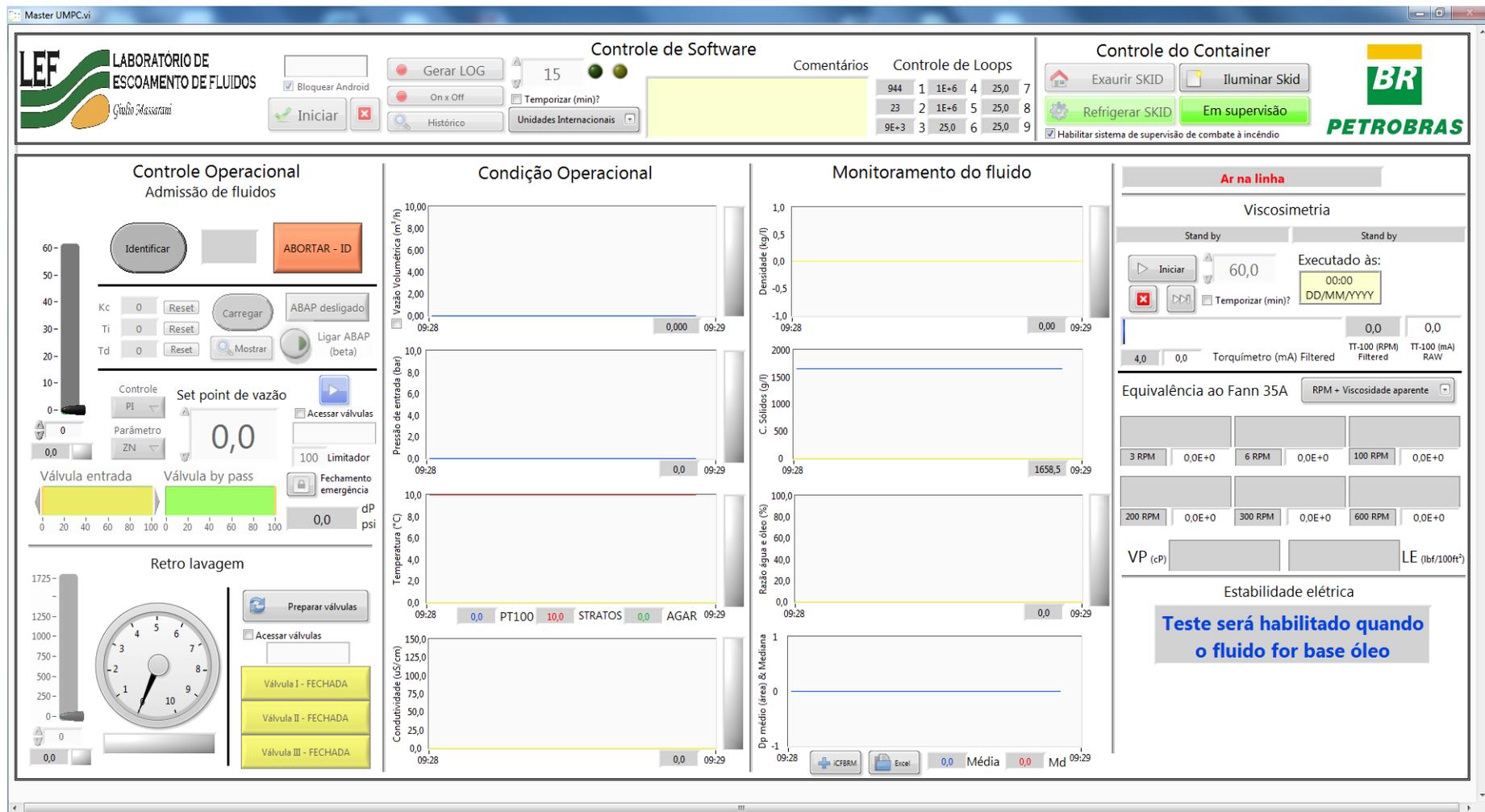


Figura 78. Foto da IHM construída para a UMPC

É possível perceber que as diretrizes apontadas na Figura 64 (considerar a IHM como a junção de sete grandes algoritmos) foram mantidas, como demonstrado na Figura 78. Porém, num processo natural de construção, pequenas mudanças foram necessárias assim como alguns melhoramentos foram feitos.

4.3.1. Algoritmos do “Controle de *Software*”.

Nesta seção (vide zoom na Figura 79) têm-se botões controladores, entradas do usuário e o status dos *loops* de todo o *software*, eles funcionam da seguinte forma:

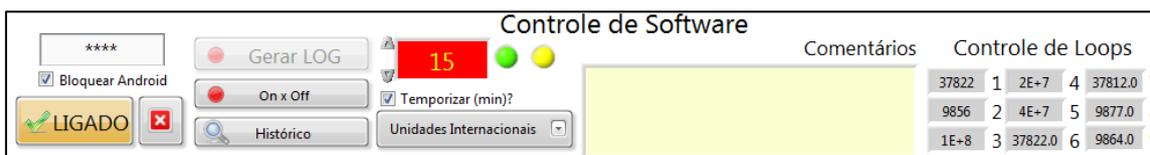


Figura 79. Zoom em “Controle de *Software*”.

- Entrada numérica (acima do botão “Bloquear Android”): Trata-se da senha para que os botões sejam acessíveis. Enquanto a senha não for digitada os botões permanecem esmaecidos e desabilitados. Esta entrada está localizada acima do botão “Bloquear *Android*”.
- Botão “Bloquear *Android*”: Este botão bloqueia a saída ou entrada de qualquer sinal remoto, sendo o controle do *software* somente local. Se algum cliente estiver conectado no momento e *imputando* comandos, os mesmos serão cancelados e o estado local fará *override* em todos os comandos remotos no momento.
- Botão “Iniciar”: O *software* a ser executado já está pronto para uso, ou seja, todos os *loops* se iniciam automaticamente. Iniciar os *loops* significa que o *software* está sendo executado e já está trocando informações com todo o sistema. “Iniciar” liberará energia para os motores. Se o usuário não “Iniciar” os motores, as bombas e o viscosímetro não ligarão, por consequência não será feito o bombeio do fluido para aferição.
- Botão “Encerrar”: Este botão está ao lado do botão “Iniciar”. Se pressionado, ele terminará todas as operações e encerrará todos os programas em execução.
- Botão “Gerar LOG”: Se pressionado, o programa gravará continuamente na mesma taxa de aquisição de dados, um dado por segundo. Os dados gravados são os mais importantes para conferência futura, a saber: todas as propriedades do fluido, registro de bombeio, histórico de vazão e pressão, avisos e alarmes disparados, usuários que acessaram o sistema etc. O *software* abrirá um arquivo na unidade D: do disco rígido do computador

local com o nome sendo a data e a hora do início da gravação, para facilitar posteriormente a conexão entre o dia, hora e evento ocorrido. Por exemplo, é requerido que se veja os dados gravados durante um incidente X que ocorreu há uma semana. Basta procurar o arquivo com o dia e a hora do incidente. Se a gravação ainda estiver ocorrendo às 23:59, às 00:00 ele encerrará o arquivo e começará outro, com o novo dia e hora. Ainda existe a opção de o usuário gerar o LOG em taxas diferentes de gravação. Utilizando o botão “temporizar (min)”, ao invés de apertar o botão “Gerar LOG”, a gravação será feita somente no intervalo pré definido pelo usuário, cujo valor *default* está programado para 15 min. Ou seja, se temporizado, o programa gravará os dados a cada quinze minutos, os mesmos dados citados anteriormente. Ao marcar a temporização, um LED amarelo se acende permanentemente enquanto a temporização estiver selecionada para nortear o usuário que o sistema está ciente da temporização. O LED verde se acenderá somente durante a gravação, para indicar o exato momento da gravação.

- Botão “On x Off”: Com intuito de facilitar o período de testes do sistema, período este em que haverá comparação entre os dados medidos em tempo real e os dados medidos pelos profissionais da sonda, criou-se um algoritmo para facilitar a comparação direta destes dados por meio de relatórios instantâneos. Ao clicar no botão, o programa abrirá várias janelas, uma após a outra, indagando o nome do usuário, em primeiro lugar, e depois os valores das variáveis medidas em bancada. A cada janela preenchida, o programa armazena estes dados até que todos sejam preenchidos (de todas as propriedades). Ao final, o programa perguntará se o usuário deseja gerar o relatório naquele momento. Se apertado o botão “Capturar dados”, o programa busca a hora e data das medições e procura no banco de dados todas as informações de bancada preenchidas. Concomitantemente captura no sistema todos os respectivos dados em tempo real e gera, no Microsoft Word, um relatório colocando lado a lado a variável obtida em bancada e a variável obtida em tempo real. Uma vez gerado o relatório, o usuário poderá salvá-lo, mandá-lo por e-mail ou distribuir via *cloud storage*⁴⁰ para um centro de operações. Este processo pode ser repetido quantas vezes o operador desejar. Na Figura 80 é demonstrado o *layout* do relatório.

⁴⁰ Serviço de armazenamento em nuvem: *Dropbox, Google Drive, One Drive* são as maiores empresas no ramo.

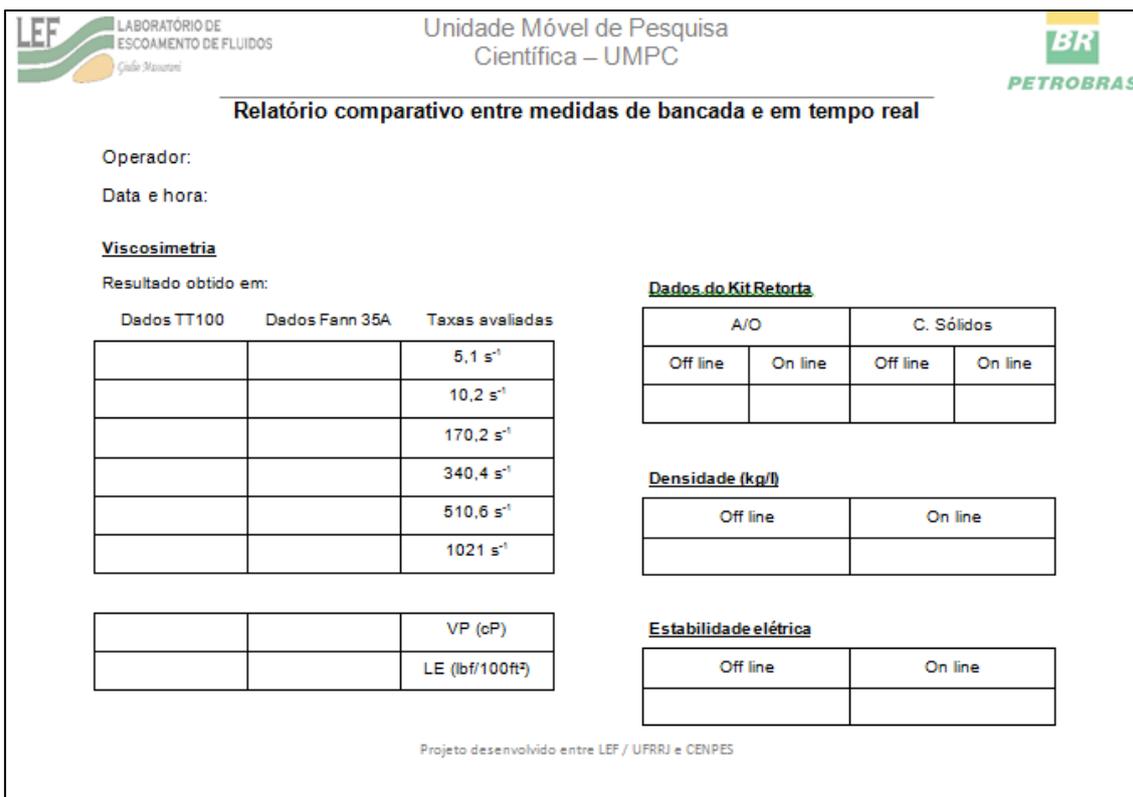


Figura 80. Foto do relatório gerado automaticamente pelo sistema supervisor construído.

- Botão “Histórico”: Ao apertar este botão um *pop up*⁴¹ (vide Figura 81) aparece para o operador oferecendo executar dois programas distintos. Eles poderão ser executados separadamente ou simultaneamente. O primeiro programa é capaz de organizar todos os dados de viscosidade aparente e o outro os dados de estabilidade elétrica. Estes programas adjacentes ao programa principal foram confeccionados porque tanto a viscosidade quanto a estabilidade mostram somente os resultados do último teste, diferente das outras propriedades que se acumulam ao longo do tempo nos gráficos. Assim, estes programas oferecem a possibilidade do operador ou centro de operações verificarem o histórico das medições destas duas grandezas. Maiores detalhes serão dados quando os algoritmos de cálculo da viscosidade aparente e estabilidade elétrica forem explicados.

⁴¹ Janela flutuante que indaga ou informa algo específico ao usuário.

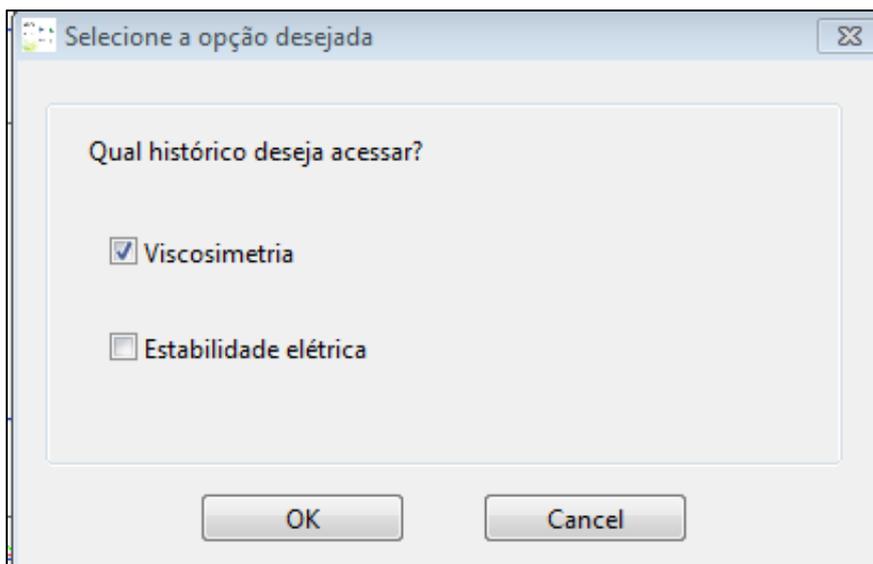


Figura 81. *Pop up* criado para acessar o histórico de viscosimetria e estabilidade elétrica.

- Menu “*pull down*” ao lado do botão “Histórico”: seleciona qual unidade será praticada para temperatura e densidade: S.I ou unidades do sistema inglês.
- “Comentários”: Espaço em que o usuário pode fazer anotações em tempo real de observações que julgue pertinente. Este texto será compilado no banco de dados no tempo em que foram digitados. Assim, ao ler uma propriedade, o centro de comandos poderá ver o comentário do usuário que certamente auxiliará o entendimento numa tendência arbitrária. Por exemplo, ao parar o bombeio para uma retro lavagem, as propriedades serão todas afetadas, o usuário poderá comentar: “Em retro lavagem” durante a operação. Todos os dados naquele momento levarão este comentário ao lado. Ao terminar a operação, o usuário poderá apagar a mensagem, por exemplo, ou colocar “Em operação normal”.
- “Controle de *Loops*”: Cada parte do código possui um *loop while* próprio. Toda vez que se criar entradas de usuário ou avisos via *pop up* é necessário que o código que contém a chamada do mesmo seja feito em um *loop while* distinto. O motivo reside que no momento em que o *pop up* é criado, o *loop* sofre uma pausa aguardando a entrada do usuário. Se esta pausa ocorrer em um *loop* que contém aquisição de dados, problemas de fila de entrada de dados podem levar o sistema à instabilidade. Por isso o monitoramento de cada *loop* foi criado não somente para verificar a estabilidade do sistema, mas também para verificar se os *loops* estão sofrendo ou não assincronia. Todos os *loops* possuem frequência definida, a maioria deles executa um ciclo por segundo, já os *loops* de estabilidade elétrica executam um ciclo a cada 0,07 segundos. Se algum *loop* estiver

sofrendo atraso por algum motivo diverso, como problemas no ambiente Windows, por exemplo, a contagem sofrerá alterações, que poderão ser vistas imediatamente nos contadores. Atrasos nos *loops* significam atrasos na aquisição de dados ou na obediência de comandos dados as máquinas. Por exemplo, se o operador exigir um comando e ele não for obedecido, a primeira ação do operador é verificar se o *loop* está rodando, 99% das causas de comandos não obedecidos são em detrimento de um *loop* congelado. Como o *software* é composto por sete *loops* é possível que parte do código funcione e outra não. Com o contador de *loops*, o *debugging*⁴² fica facilitado, pois se verifica exatamente qual parte do código está apresentando problemas.

4.3.2. Algoritmos do “Controle Operacional – Admissão de Fluidos”.

É nesta seção que o usuário poderá colocar a UMPC de fato em operação. Vide detalhes na Figura 82.

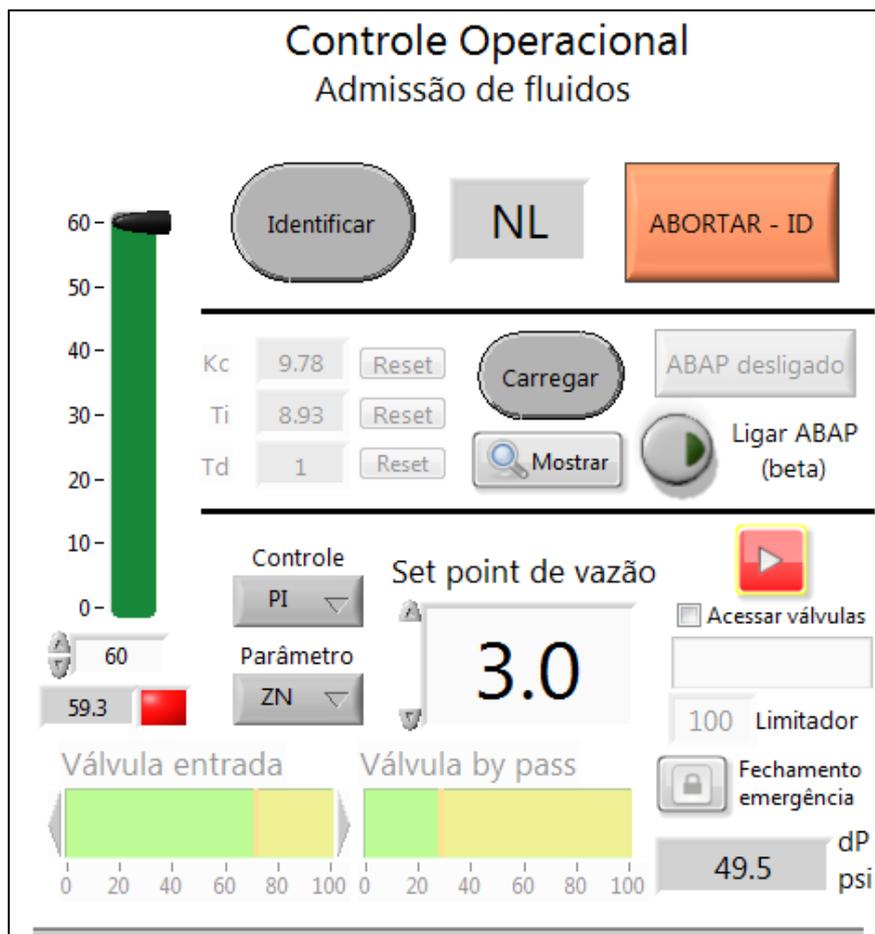


Figura 82. Zoom em “Controle Operacional – Admissão de Fluidos”.

⁴² Palavra americana que traduz a ideia de consertar, ou processo de busca de erros e posterior resolução.

Uma vez apertado o botão “Iniciar” na seção de Controle do *Software* (Figura 78), todos os inversores de frequência estarão prontos para operação (Figura 79). Desta forma, o usuário poderá controlar a frequência de giro da bomba por meio do *slider*⁴³ vertical, que vai de zero a sessenta hertz. Em zero hertz, a bomba, apesar de energizada, não gerará vazão, em sessenta, significa que sessenta giros por segundo são executados gerando a vazão máxima possível. Existe uma relação não linear entre o número de ciclos e a vazão gerada na bomba. A relação é não linear porque para estas bombas (helicoidais), o aumento da rotação leva ao aumento da vazão, que por consequência aumenta a pressão de descarga, o que ocasiona uma série de consequências eletromecânicas, como por exemplo, aumento no tempo de residência do fluido no eixo devido à deformação do estator, controle de torque dificultado no inversor de frequência etc. Este *slider* não está ligado a nenhum sistema de controle de vazão, assim, o usuário deverá escolher a frequência que melhor atender as suas necessidades. A vazão será controlada pela abertura das válvulas na linha principal e na linha de *by pass* (vide Figura 61). Para este sistema foi implementado um sistema automático de controle de vazão, pois uma vazão constante proporciona leituras nas propriedades do fluido menos ruidosas. Este sistema automático torna-se mais importante ainda quando se entende que o sistema será operado remotamente, assim qualquer perturbação não vista pelos operadores na vazão será automaticamente corrigido.

O controle foi escolhido pela manipulação das válvulas devido ao fluido de perfuração possuir uma alta carga de sólidos, por meio das válvulas, é possível manter baixa vazão nas linhas de medição e alta vazão nas linhas de adução externas da UMPC. Se o controle fosse feito por meio da manipulação da rotação da bomba, um *set point*⁴⁴ de baixa vazão poderia ocasionar um depósito de sólidos ao longo da linha adutora da UMPC devido às baixas velocidades do fluido. Neste arranjo, uma vez ligado o sistema de controle, a mudança da velocidade da bomba será interpretada como uma perturbação, e o controlador irá executar um teste regulador⁴⁵, visando compensar a vazão até que se chegue novamente ao *set point*.

Por exemplo, o operador acelera a bomba para 60 Hz, e determina que a vazão deva ser 3m³/h. O controlador irá manipular as válvulas até que este valor de vazão seja atingido, valores estes reportados pelo medidor de vazão. Se após o equilíbrio, o operador desacelerar a bomba para 50 Hz, as válvulas se reorganizarão para manter os mesmos 3m³/h. A válvula da linha principal se abrirá mais, e a do *by pass* se fechará mais. Assim, a mudança de *set point* de vazão não deve ser feita manipulando-se a bomba, e sim as válvulas.

Desta forma, em cenários normais de operação, é desejável que não se mude a frequência de rotação durante as operações. É recomendável procurar a maior rotação possível para gerar os maiores gradientes de velocidade, onde as chances de depósito de sólidos são as menores possíveis. O limitante será a pressão gerada.

⁴³ Barra escorregadia em tradução livre.

⁴⁴ Valor escolhido em que o sistema de operar e se manter automaticamente.

⁴⁵ Nome dado quando o controlador deve regular a vazão devido à uma perturbação externa, e não por mudança de *set point*.

Em termos técnicos, programou-se um algoritmo de controle clássico, em estratégia *feedback*, com opção de escolha do tipo de controlador (P, PI, ou PID⁴⁶) com algoritmo automático de sintonia e auto ajuste dos mesmos.

Este sistema de controle é ativado quando se aperta o botão “Controlar” nesta seção. Importante ressaltar que se o operador não gerar vazão no sistema primeiramente, por meio do ajuste da rotação da bomba, o controlador não o fará, já que a variável manipulada é somente a abertura das válvulas. O controlador em hipótese nenhuma irá manipular a rotação da bomba, esta entrada é por conta única e exclusivamente do usuário.

Este sistema de controle pode ser configurado nos seguintes botões:

- Botão “Identificar”: Esse botão dá início ao algoritmo automático de sintonia dos parâmetros do controlador. Por técnicas clássicas da literatura, o sistema assume o controle e executa uma série de testes, sequencialmente. Ao final, o controle do *software* é devolvido ao usuário juntamente com os parâmetros dos controladores calculados. Maiores detalhes serão dados posteriormente;
- Indicador entre os botões “Identificar” e “Abortar – ID”: Informa “NL” ou “L”. “NL” significa dizer que a planta possui uma dinâmica não linear para controle, “L” significa linear. Maiores detalhes serão dados posteriormente;
- Botão “Abortar – ID”: Cancela o processo de cálculo dos parâmetros dos controladores;
- Indicadores “Kc”, “ti”, “td”: Indicam os valores destes parâmetros. O controlador “P” exige cálculo de “Kc” para operar, “PI” necessita de “Kc” e “ti” e o controlador “PID” exige todos os parâmetros;
- Botão “Reset” ao lado de cada parâmetro: Retorna ao valor original calculado pelo algoritmo de sintonia automática. Maiores detalhes serão dados posteriormente;
- Botão “Carregar”: Traz a memória os parâmetros recém – calculados. Maiores detalhes serão dados posteriormente;
- Botão “Mostrar”: Traz ao primeiro plano o *software* criado que contém todos os algoritmos de controle. Este *software* funciona adjacente ao sistema supervisão;

⁴⁶ P – proporcional, PI – proporcional integral, PID – proporcional integral derivativo

- Indicador “ABAP⁴⁷”: Informa por meio de mudança de cor se o algoritmo de auto ajuste dos parâmetros está ligado;
- Botão “Ligar ABAP”: Autoriza o sistema de controle a usar regras heurísticas criadas pelo autor para fazer ajustes em tempo real nos parâmetros dos controladores. Maiores detalhes serão dados posteriormente;
- Menu tipo “*pull down*”, “Controle”: Permite ao usuário escolher qual tipo de controlador irá usar, P, PI, PID;
- Menu tipo “*pull down*”, “Parâmetro”: Permite ao usuário escolher qual algoritmo de sintonia irá usar nos controladores; sintonia segundo o método empírico de “ZN⁴⁸” ou método empírico de “CC⁴⁹”. Maiores detalhes serão dados posteriormente.
- Entrada “Set point de vazão”: Local onde o usuário deverá informar a vazão de operação dentro das linhas dos sensores;
- Botão “Play” azul: Inicia o controle automático, ou seja, fecha a malha de controle;
- Indicadores “Válvula entrada” e “Válvula *by pass*”: Indica a porcentagem de abertura de cada válvula. Totalmente amarelo é 100% fechada, totalmente verde é 100% aberta. As válvulas operam segundo a seguinte equação: $V_{bp} = 100\% - V_e$. Ou seja, é usado um controle SISO⁵⁰ manipulando-se somente a válvula de entrada, a válvula *by pass* será uma função da abertura da válvula de entrada. Válvula de entrada 100% aberta significa válvula *by pass* fechada, todo o fluxo é direcionado para as linhas de sensores. Válvula de entrada 0% aberta significa 100% aberto na válvula *by pass*, todo o fluxo roda em ciclo fechado e não adentra nos sensores. Conseqüentemente, 10/90, 20/80 ... 50/50 ... 80/20, 10/90 etc.;
- Botão “Acessar válvulas”: O controle de abertura das válvulas é vedado ao usuário, mas em caso emergencial pode ser acessado se este botão for apertado. No entanto, exige senha, que deve ser digitada na entrada logo abaixo do botão;

⁴⁷ ABAP – Algoritmo de Busca Automatizada de Parâmetros. Conjunto de regras heurísticas criadas pelo autor para aperfeiçoar os parâmetros iniciais calculados pelo algoritmo de sintonia dos parâmetros. Visa melhorar o controle sendo auto adaptativo.

⁴⁸ ZN – Ziegler e Nichols

⁴⁹ CC – Cohen e Coon

⁵⁰ SISO – Single Input Single Output. Single Input: vazão. Single Output: abertura da válvula entrada.

- Botão “Fechamento de emergência”: Este botão, se apertado, irá desligar o controlador, irá bloquear sinais externos (remotos) e irá fechar a válvula de entrada, consequentemente abrindo 100% a válvula *by pass*. Este botão deve ser usado em caso de vazamentos no interior da UPMC;
- Indicador “dP em psi”: Indica o diferencial de pressão lido entre a entrada e a saída hidráulica da UMPC. Trata-se de um dispositivo de segurança. Após calibração prévia das ordens de pressão diferencial tanto com fluidos aquosos quanto com fluidos sintéticos, se a frequência da bomba está acima de 20 Hz, obrigatoriamente este diferencial deve estar maior que zero independentemente do tipo de fluido ou se o escoamento é na linha principal ou *by pass*. Assim, se bomba > 20 Hz e $\Delta P < 5$ psi, a bomba é automaticamente desligada e o operador é convocado, por meio de um aviso na tela, que em condições normais fica oculto.

Todos os botões listados acima fazem interface com outro *software* criado, que roda em *background* e é automaticamente executado após 5 segundos de execução do *software* primário (supervisório). Decidiu-se colocar em outro *software* os algoritmos de controle já que desta forma pode ser usado em outros projetos, além de melhorar o desempenho geral, uma vez que se todo o código de controle fosse inserido no sistema supervisório, o mesmo ficaria demasiadamente grande e o trabalho de *debugging* seria enfadonho. Importante ressaltar que se o *PIDDesign* (*software* de controle) não for executado em *background*, o controle existente no *software* UMPC (sistema supervisório) não funcionará. Isto porque os dois *softwares* ficam trocando dados constantemente. A UMPC recebe os dados de vazão, estes dados são repassados ao *PIDDesign*, que por sua vez informa à UMPC qual devem ser as posições das válvulas, ambos ficam neste ciclo enquanto a malha de controle estiver fechada (botão “Play” estiver apertado).

Na Figura 83 pode ser observado a IHM do *software PIDDesign*, criado para executar, de maneira genérica, qualquer controle SISO. Para este trabalho, controla-se vazão volumétrica em função da abertura das válvulas de entrada e *by pass*.

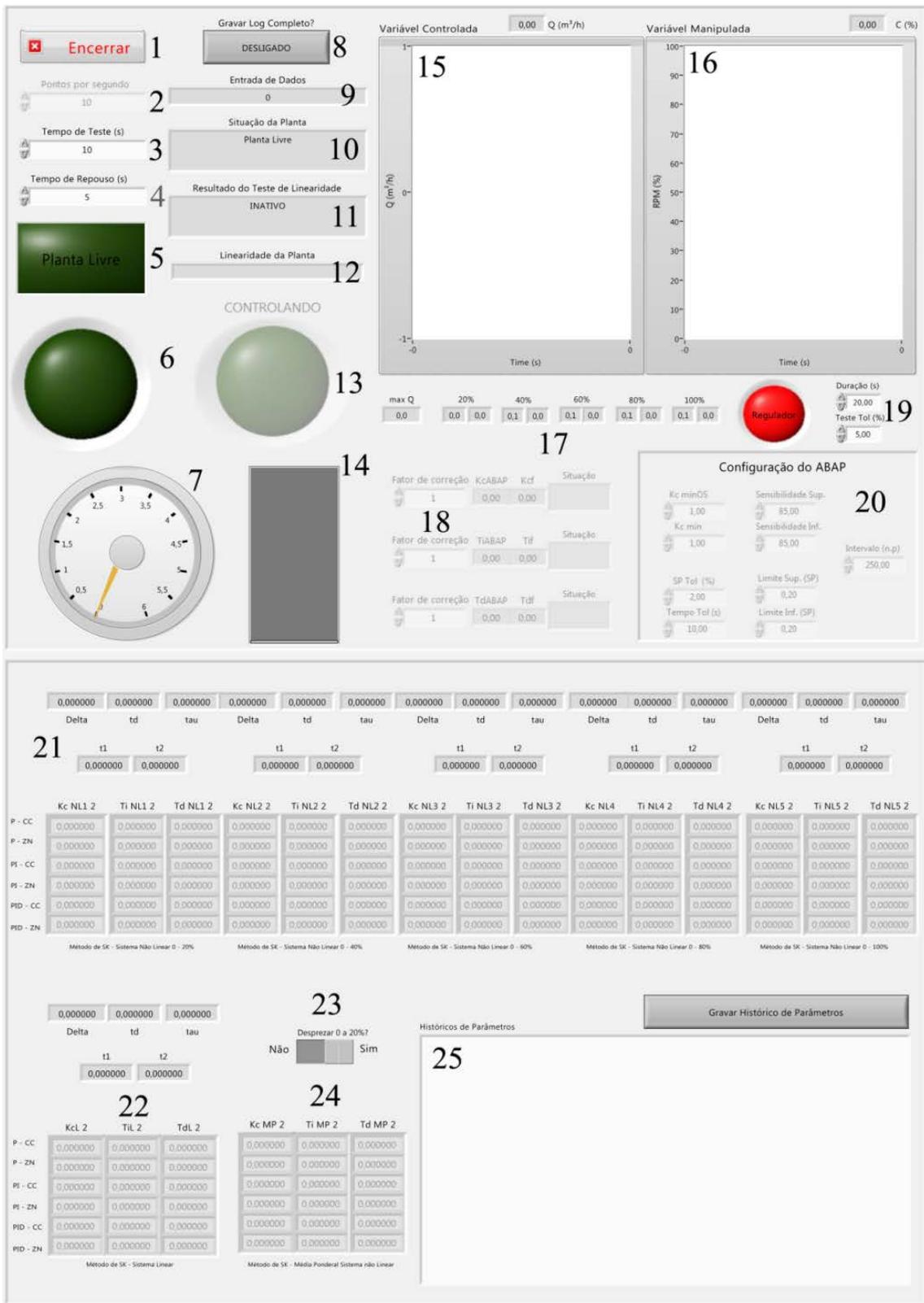


Figura 83. IHM produzida para o *PIDDesign*.

Na Tabela 2 pode ser observada a descrição dos números presentes na Figura 83.

Tabela 2. Legenda da Figura 83.

Número	Descrição
1	Finaliza o <i>PIDDesign</i> (isso levará a perda do controle automático)
2	Muda a taxa de transferência de dados entre <i>software</i> e <i>hardware</i>
3	Parâmetro para determinar quando o sistema deve gravar dados
4	Parâmetro para determinar quando o sistema não deve gravar dados
5	Indicador de uso da planta (<i>standby</i> ou executando identificação)
6	Indicador se o <i>software</i> está gravando dados
7	Indicador de uma segunda variável importante (ex. pressão do sistema)
8	Grava todos os dados e memórias de cálculo
9	Informa o número de ciclos executado pelo <i>loop</i> do <i>software</i>
10	Informa textualmente em qual etapa do algoritmo o programa está
11	Informa textualmente as etapa dos sub algoritmos
12	Informa textualmente se o sistema a se controlar é linear ou não linear
13	Informa visualmente se o sistema está em mala aberta ou fechada
14	Indica, em porcentagem, o total da escala utilizada da VM ⁵¹
15	Indica graficamente o histórico da VC (m ³ /h)
16	Indica graficamente o histórico da atuação da VM sobre a VC (%)
17	Indica o mín. e máx. da VC a em cada faixa de atuação da VM
18	Indica as ações do algoritmo de auto ajuste sobre K_c , τ_i , τ_d
19	Parâmetros de ajuste de autodeteção de testes servo ou regulador
20	Parâmetros de regulação da sensibilidade do algoritmo de auto ajuste
21	Memória de cálculo se o sistema foi não linear
22	Memória de cálculo para sistema linear e parâmetros que serão usados
23	Opção de descartar os parâmetros de 0 a 20% da média ponderal
24	Média ponderal dos parâmetros não lineares os quais serão usados
25	Colocar no arquivo LOG comentários gerais

As rotinas programadas no *PIDDesign* podem ser melhor entendidas observando o fluxograma contido na Figura 84.

⁵¹ VM – Variável Manipulada, VC – Variável Controlada

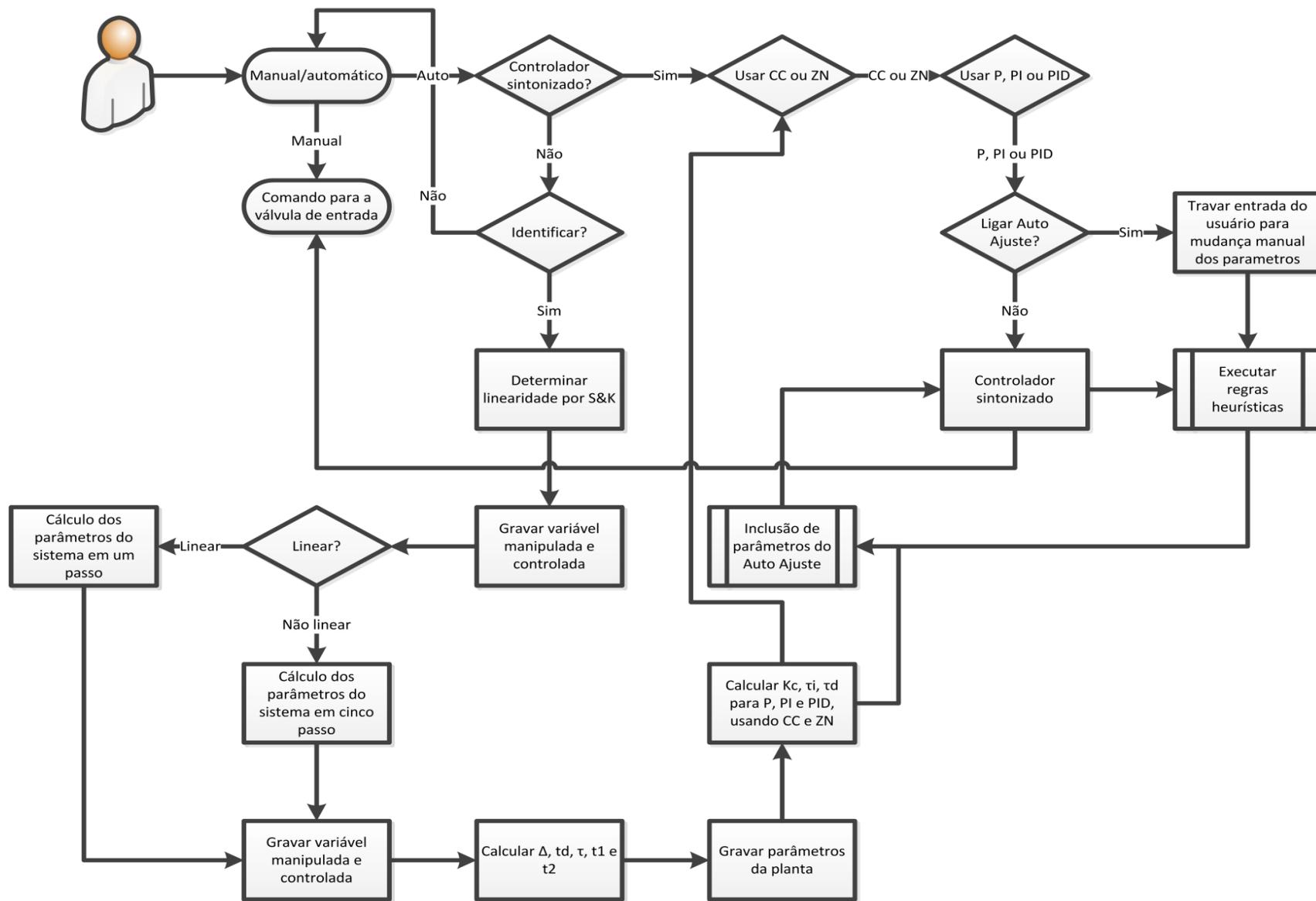


Figura 84. Fluxograma do funcionamento do *PIDDesign*.

O primeiro passo do algoritmo é selecionar se a operação de controle de vazão será manual ou automática. Se manual for selecionado, a VM deverá ser controlada pelo operador, por meio da entrada da senha para ter acesso ao controle de posicionamento das válvulas, configurando o sistema em malha aberta. Se o modo automático for selecionado, e isto se dá pressionando o botão azul em forma de “Play” (vide Figura 78), o sistema irá operar em malha fechada. Os posicionadores das válvulas não estarão mais disponíveis para o usuário manipular, nem mesmo com a entrada das senhas. Porém, a disponibilidade do botão “Play” dependerá se os controladores já foram sintonizados. Se a sintonia já foi previamente feita, o botão estará disponível, caso não, é necessário primeiramente identificar a planta, pressionando o botão “Identificar”.

Ao pressionar este botão, uma série de testes será feito em malha aberta, de forma automática, baseado no algoritmo de Sundaresan e Krishnaswamy (S&K), 1977. O algoritmo destes autores foi utilizado para se determinar a linearidade do sistema, uma planta linear pode ser controlada com apenas um trio de parâmetros nos controladores, geralmente plantas não lineares requerem diferentes parâmetros nos controladores para diferentes faixas da VC. Se a planta for linear, é usado novamente o algoritmo de S&K levantando-se apenas uma curva de reação, e sobre ela calcula-se os parâmetros intrínsecos da planta (Δ , τ e td)⁵², se a planta for não linear, o mesmo algoritmo é usado porém cinco curvas de reação são utilizadas, calculando cinco trios diferentes de parâmetros intrínsecos do sistema para cada faixa de vazão atingida. Os mínimos e máximos de vazão desta faixa podem ser vistas na Figura 83.

Para elucidar o funcionamento prático deste algoritmo, vide Figura 85 que contém os resultados gravados durante a identificação das linhas hidráulicas da UMPC. Nela é possível observar a manipulação automática da válvula de entrada, que foi posta a 50% da capacidade, executando posteriormente uma varredura positiva até 100% de abertura e depois uma varredura negativa até 0%. Ainda no gráfico da Figura 85 estão demonstradas as respostas observadas na vazão quando se manipula a válvula de entrada. Para este teste a frequência da bomba foi mantida fixa em 60 Hz, no máximo possível.

Os degraus positivos e negativos na VM possuem exatamente a mesma magnitude, $\pm 10\%$. Se a planta é linear, é esperada a mesma magnitude de variação na vazão.

⁵² Δ – Parâmetro referente a magnitude observada na variação da variável controlada frente a uma manipulação na variável manipulada. τ – parâmetro referente ao tempo que a variável controlada demora em atingir o novo estado estacionário (variável não é mais uma função do tempo) após variação definida da variável manipulada. td – tempo morto: Parâmetro que quantifica a demora que a variável controlada tem em responder frente a uma perturbação na variável manipulada.

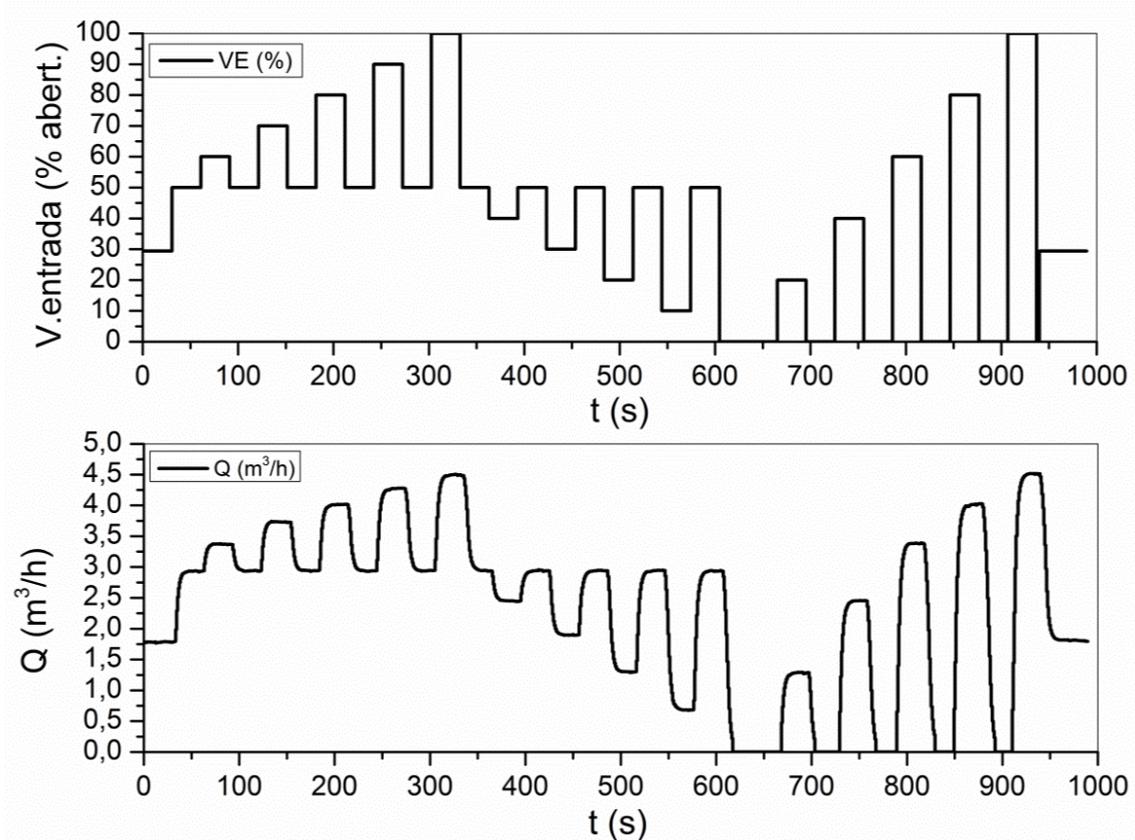


Figura 85. Resultados de vazão volumétrica observada durante manipulação da abertura da válvula de entrada em função do tempo.

É possível observar na Figura 85 que a planta é não linear. Percebe-se que a dinâmica do sistema (magnitude da variação da vazão) quando a válvula se abre é diferente de quando a válvula se fecha. Assim, em 600 segundos aproximadamente, o teste de linearidade se encerrou e o sistema foi diagnosticado como não linear. Em seguida, a planta foi dividida em cinco partes, sendo cinco curvas de reação procedidas, cada uma com seus respectivos parâmetros de sistema. Estes parâmetros (Δ , τ e td) são calculados a partir dos parâmetros empíricos primários, t_1 e t_2 . O primeiro é determinado em cima da curva de reação quando a VC está a 35,3% do seu valor final e o segundo quando está a 85,3%. De posse de t_1 e t_2 , usam-se as correlações presentes na Tabela 3 para calcular Δ , τ e td (Sundaresan e Krishnaswamy, 1977).

Tabela 3. Correlações para cálculo de Δ , τ e td

Parâmetro	Correlação empírica
td	$td = 1.3t_1 - 0.29t_2$
τ	$\tau = 0.67 (t_1 - t_2)$
Δ	$\Delta = Bu/M$

Uma vez calculados os parâmetros do sistema em cada curva de reação, procede-se para o cálculo dos parâmetros dos controladores. Este trabalho usou os métodos empíricos de Cohen e Coon (1953) e Ziegler e Nichols (1942). As correlações podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4. Correlações para cálculo de K_c , τ_i e τ_d

Método de sintonia	Controlador	Parâmetro	Correlação empírica
Cohen e Coon	P	K_c	$\frac{1}{\Delta} \cdot \frac{\tau}{td} \cdot \left(1 + \frac{td}{3 \cdot \tau}\right)$
Ziegler e Nichols			$\frac{\tau}{\Delta \cdot td}$
Cohen e Coon	PI	K_c	$\frac{\tau}{\Delta \cdot td} \cdot \left(0.9 + \frac{td}{2 \cdot \tau}\right)$
		τ_i	$\frac{td \cdot (30 + 3 \cdot td/\tau)}{9 + 20 \cdot td/\tau}$
Ziegler e Nichols	PI	K_c	$\frac{0.9 \cdot \tau}{\Delta \cdot td}$
		τ_i	$0.33 \cdot td$
Cohen e Coon	PID	K_c	$\frac{1}{\Delta} \cdot \frac{\tau}{td} \cdot \left(\frac{3}{4} + \frac{td}{4 \cdot \tau}\right)$
		τ_i	$td \cdot \frac{(32 + 6(td/\tau))}{(13 + 8 \cdot td/\tau)}$
		τ_d	$td \cdot \frac{4}{(11 + 2 \cdot td/\tau)}$
Ziegler e Nichols	PID	K_c	$\frac{1.2 \cdot \tau}{\Delta \cdot td}$
		τ_i	$2 * td$
		τ_d	$0.5 * td$

O *PIDDesign* calcula todos os parâmetros de todos os controladores, assim, uma vez identificado o sistema, basta o operador escolher o tipo de controlador e o método de sintonias dos mesmos. Após estas escolhas, o botão “Play” estará disponível e o controle automático poderá ser selecionado.

Durante a operação de controle automatizado, mesmo utilizando parâmetros intrínsecos do sistema, aliado a estratégia *feedback*, falhas ou ineficiências podem ocorrer por dois motivos principalmente; primeiro: é usada a média ponderal para controlar a planta não linear com um único trio de parâmetros de controlador. Segundo: Os modelos matemáticos dos controladores clássicos (P, PI, PID) consideram o comportamento de qualquer sistema como um sistema de primeira ordem com tempo morto, o que não necessariamente é verdadeiro. Desta forma, o algoritmo de auto ajuste poderá atuar fazendo um ajuste fino nos parâmetros dos controladores toda vez que as regras heurísticas determinarem alguma ineficiência. Vide o fluxograma da Figura 86 onde são demonstrados os passos e decisões tomadas pelo ABAP (**A**lgoritmo de **B**usca **A**utomática de **P**arâmetros).

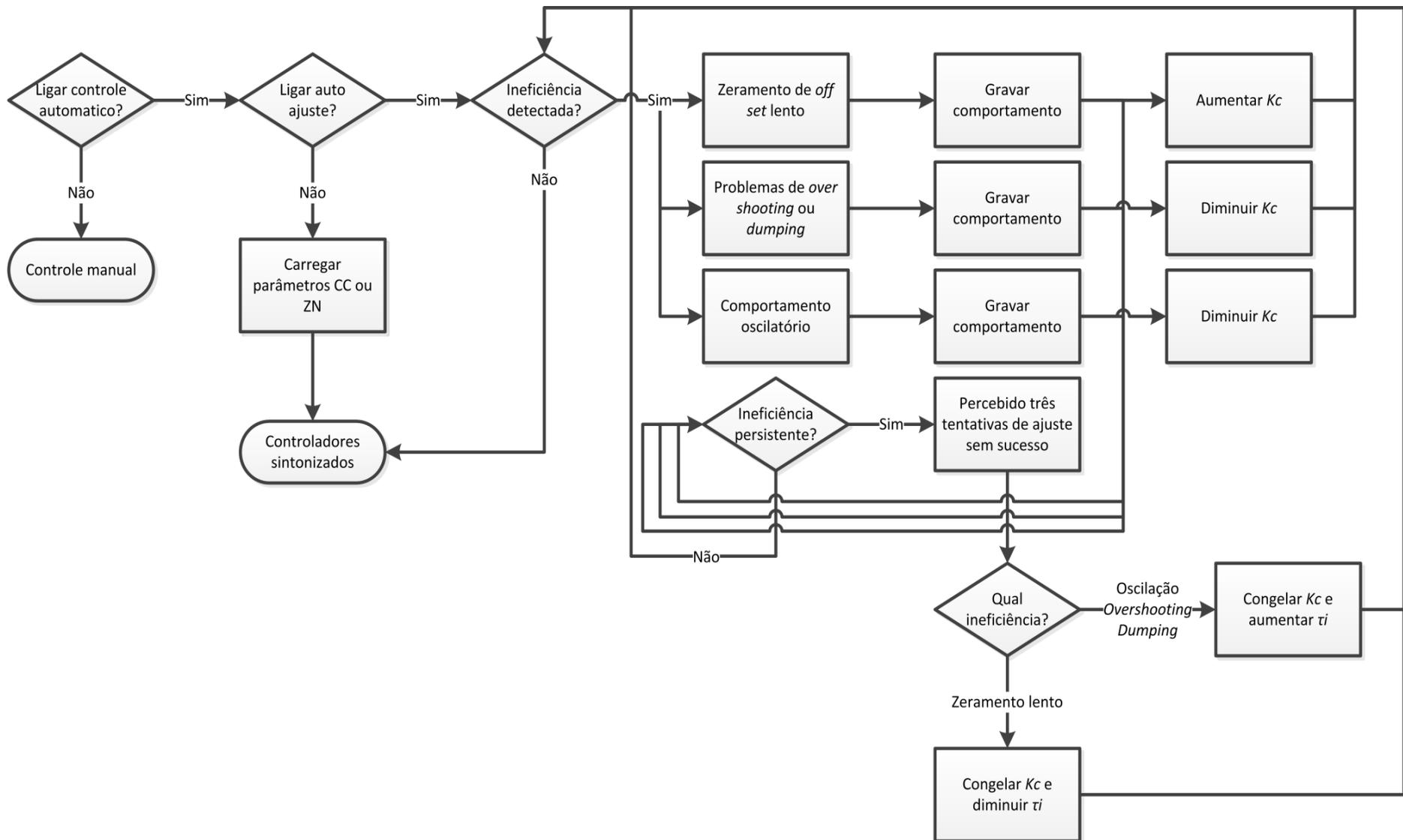


Figura 86. Fluxograma do funcionamento do algoritmo de auto ajuste contido no *software PIDDesign*.

O algoritmo ABAP quando ligado, monitora e armazena em um banco de dados próprio as ineficiências detectadas, são elas: zeramento lento do erro entre variável medida e *set point*, problemas de *overshooting*⁵³ ou *dumping*⁵⁴ e oscilação da variável controlada (instabilidade da malha). Ao detectar uma destas ineficiências uma sintonia automática é feita nos controladores, começando pelo parâmetro K_c somente. Se após três tentativas de ajuste a ineficiência não for sanada, uma segunda sintonia é feita por meio do parâmetro τ_i , sem alterar o valor de K_c . Se ainda assim a ineficiência persistir, o programa reinicia a contagem das tentativas e começa a sintonizar o K_c novamente. Este ciclo permanece até que não haja mais ineficiência ou se o ABAP for manualmente desligado.

Para demonstrar o funcionamento prático do algoritmo descrito na Figura 86, alguns testes foram executados. Primeiro foi demonstrado a diferença do desempenho dos controladores sintonizados pelo método de CC e ZN. Em seguida, a diferença do desempenho do controlador com o auto ajuste desligado e ligado. Na Figura 87 é demonstrado o resultado de um teste servo utilizando o controlador PI sintonizado por CC e por ZN.

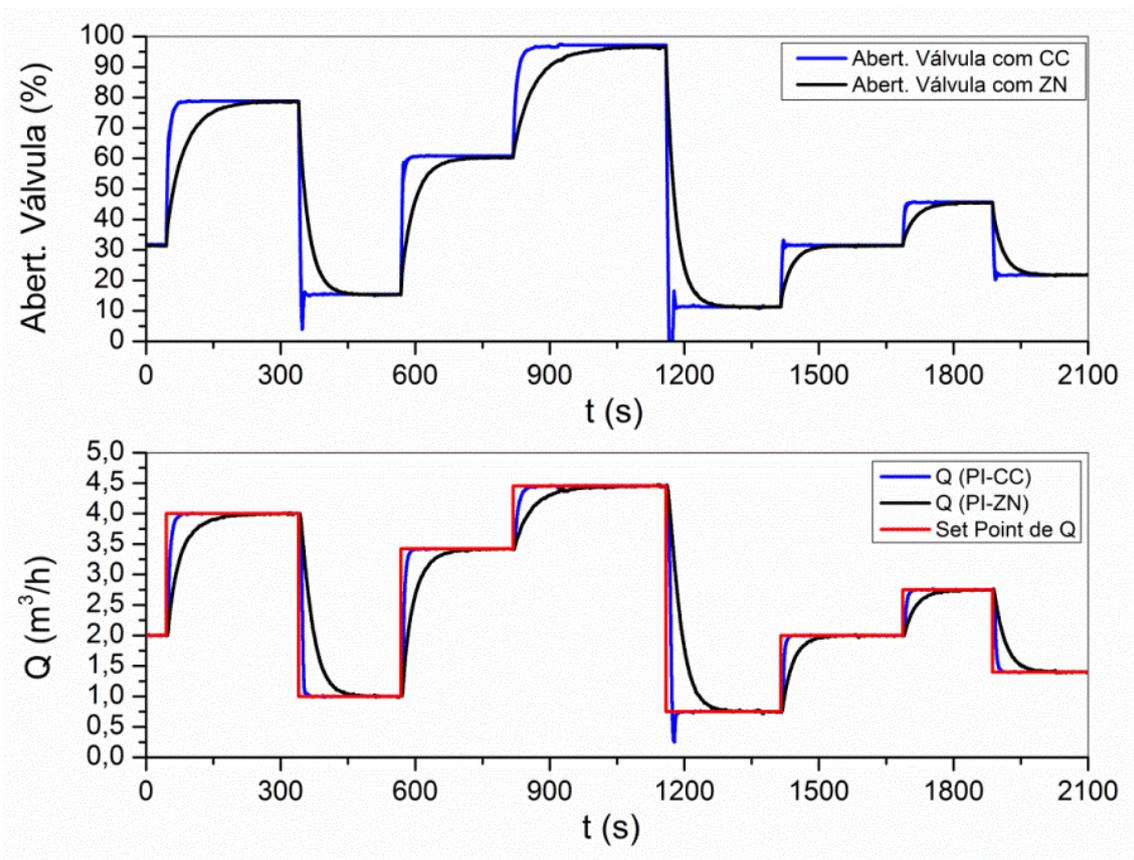


Figura 87. Resultados de vazão volumétrica observada durante manipulação da abertura da válvula de entrada em função do tempo durante teste servo (mudanças de *set point*).

⁵³ Nome dado quando a variável controlada passa do *set point* no sentido ascendente durante tentativa de zeramento do *off set* (erro/desvio entre variável medida e *set point*)

⁵⁴ Mesmo comportamento descrito para *overshooting*, porém quando se está no sentido descendente em tentativa de zeramento do erro.

Em concordância com a literatura (GirirajKumar *et al.* 2010), controladores com sintonia segundo CC costumam ser mais rápidos que aqueles sintonizados por ZN, como observado na Figura 87. No entanto, é possível observar alguns *dumpings* produzidos pelo controlador sintonizado por CC. Isso porque a ação integral deste controlador é maior que a ação integral com ZN. Quanto maior a ação integral, mais rápido é o zeramento do *off set*, porém, mais instável o controlador tende a ser. Houve *dumping* em 300 segundos e 1200 segundos, aproximadamente, quando se observou a ação do controlador sobre a variável manipulada.

Para testar o algoritmo de auto ajuste, um teste regulador foi feito comparando o desempenho do controlador PI sintonizado com CC com o mesmo controlador com o auto ajuste ligado. Assim, compara-se o controlador mais rápido com e sem auto ajuste. Testes reguladores são as situações mais complexas para os controladores, já que seu processo de sintonização não leva em conta tais tipos de situação. Vide Figura 88 para os resultados obtidos.

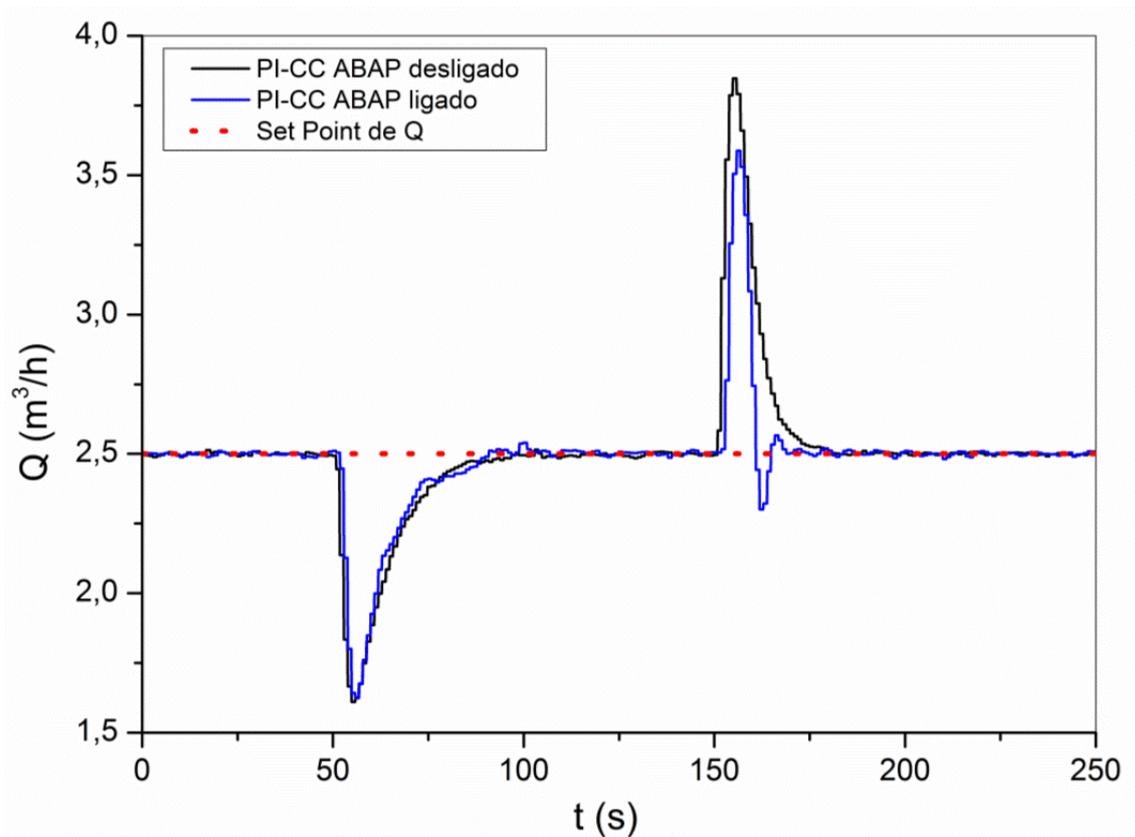


Figura 88. Resultados de vazão volumétrica observada durante teste regulador (mudanças no valor da vazão por interferências externas mantendo-se o mesmo *set point*).

O sistema estava em equilíbrio a 2,5 m^3/h quando uma válvula foi aberta, simulando um vazamento. O sistema rapidamente compensou por meio da manipulação das válvulas a vazão decrescida. Percebe-se que o desempenho do controlador com o ABAP ligado é similar durante a primeira perturbação, no entanto, o algoritmo estava

“aprendendo” com aquele distúrbio, e já estava fazendo ajustes no Kc . O ajuste em tempo real no Kc deu este aspecto ruidoso na vazão, diferente da tendência encontrada para os parâmetros de CC. Após algum tempo, esta válvula foi fechada, simulando o cessamento do vazamento. Isto implica num aumento inadvertido da vazão, já que as válvulas estavam na posição de compensação do vazamento. Imediatamente um pico de vazão é lido no sensor, que foi administrado mais rapidamente com o ABAP ligado. No entanto, houve o aparecimento de um *dumping*, que não ocorreu no PI-CC puro.

Em resumo, nesta seção discorrida o usuário pode acelerar e desacelerar a bomba, manipular as válvulas de controle de vazão e fazer interface com *software* de controle. Pode ainda requerer que o controle de vazão seja totalmente automatizado, e mais importante, não é exigido que o usuário possua qualquer tipo de treinamento em controle de processos, já que todos os passos necessários para sintonia dos controladores foi automatizado. A UMPC é capaz de admitir e controlar, de forma totalmente automática, a vazão dos fluidos de perfuração.

4.3.3. Algoritmos da “Condição Operacional e Monitoramento do Fluido”.

Nesta parte do código são criados na IHM os gráficos que acumulam as variáveis aferidas ao longo do tempo absoluto.

Para se transformar uma medida elétrica provida pelo sensor em um dado físico o processo é relativamente simples, basta se conhecer ou recalibrar a faixa de operação de cada equipamento. É importante não confundir a calibração do equipamento com um ajuste local de faixa de operação. A calibração do equipamento é feita pelo fabricante e envolve uma série de parâmetros. O ajuste de faixa de operação é configurar em que valor da variável estará seu fundo de escala e posteriormente onde estará o topo de escala. Por exemplo, adquire-se um medidor de pressão com calibração e capacidade de até 30 bares, ou seja, o fabricante garante que não haverá danos se operado até este valor e nesta faixa de pressão foi verificado que tais valores são precisos. Em geral, se não especificado, o fabricante ajusta a faixa de operação na escala inteira, ou seja, 4 mA serão gerados entre fonte, sensor e placa de aquisição quando o sensor for submetido a 0 bar, assim como 20 mA de intensidade de corrente trafegarão quando submetido a 30 bares. Isso dá uma relação de 30 bares em 16 mA, logo 1,875 bares/mA. Agora supondo que seu processo tenha um ruído de 5% de escala na corrente, e que o processo esteja a 12 mA, então na realidade ele flutua entre 11,4 e 12,6. Repassando para bares, seria uma flutuação entre 21,37 e 23,62. Como ruídos eletromagnéticos⁵⁵ não são ruídos de processo⁵⁶, isso significa dizer que o usuário não sabe exatamente em qual pressão seu processo está. Agora, supondo que o usuário percebeu que seu processo, em hipótese alguma, fica inferior a 0,5 bar e superior a 10 bares. Ele pode localmente ajustar a faixa de operação para que os 4 mA sejam em referência a 0,5 bar e os 20 mA a 10 bar. Isso

⁵⁵ Causados por cargas não lineares na linha, como inversores de frequência ou qualquer fonte de campo eletromagnético intenso.

⁵⁶ Flutuações nas medições em detrimento do processo, e não campo magnético. Exemplo: Medição de pressão muito próximo de uma bomba de pistão, a pressão apresentará variações não por conta de eletromagnetismos, mas pelo processo natural da ida e vinda do pistão.

não interfere na calibração do equipamento, apenas ajusta a referência dos *loops* de corrente. Esta nova relação fornece 9,5 bares em 16 mA, ou seja, 0,593 bares/mA. Voltando ao exemplo, se o sistema estivesse a 12 mA, isso fluiria entre 11,4 e 12,6, mas em termos de pressão entre 6,77 e 7,48. Percebe-se que a imprecisão foi diminuída. Com estas escalas conhecidas, basta aplicar uma regra de três simples para converter cada sinal analógico na sua respectiva grandeza física, já que impreterivelmente as relações entre a intensidade do *loop* de corrente e a intensidade da grandeza física são lineares.

Um resultado prático da explicação acima pode ser observado num dia típico de operação na UMPC. Na Figura 89 é apresentado o monitoramento com um fluido de perfuração de base aquosa.

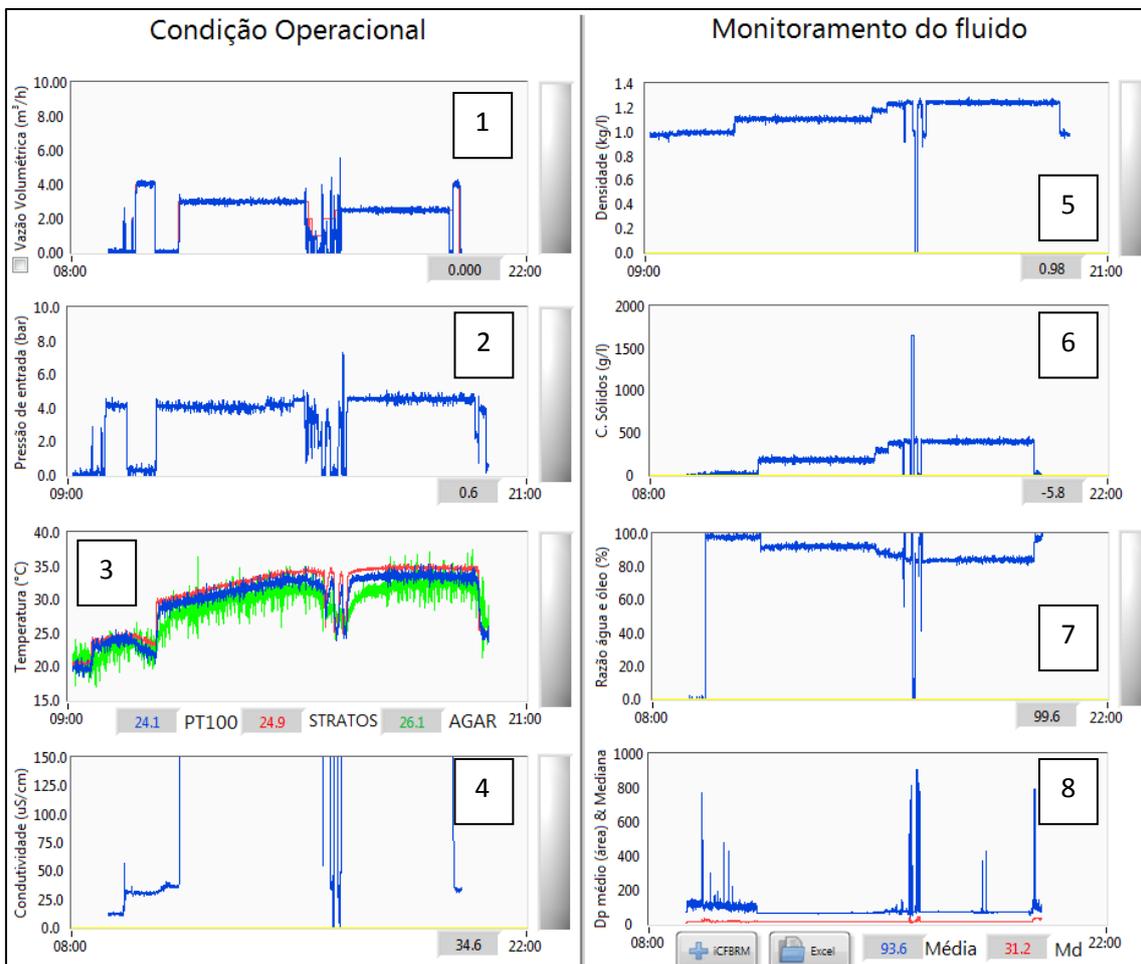


Figura 89. Zoom em “Condição Operacional e Monitoramento do Fluido”.

O tempo é contabilizado desde o início do *software* até seu desligamento. Assim, se o mesmo permanecer um mês ligado, será acumulado um mês de resultados.

É possível observar que o *software* foi iniciado às nove horas da manhã, levando cerca de uma hora para sua total operacionalização (ligamento dos sensores, conexão dos mangotes, tempo para aquecimento da eletrônica dos sensores etc.) Após este período, a unidade rodou com água para limpeza inicial por aproximadamente uma hora. Observa-se nas propriedades os valores típicos de 0,98 kg/l de densidade (5), 30

$\mu\text{S/cm}$ de condutividade elétrica (4), 98% de teor de água em óleo (7), temperatura aproximada de 25°C (3), teor de sólidos próximo a zero (6) e granulometria típica de água industrial com particulados em suspensão (sujeiras inerentes) (8). A unidade operou com vazão controlada a $4 \text{ m}^3/\text{h}$ (1) a uma pressão de 4,2 bares (2), aproximadamente. Em seguida, a vazão é zerada para manobras operacionais nos tanques para admissão do fluido de perfuração. Com a entrada deste fluido no sistema é possível perceber que todas as propriedades sofreram mudanças. Durante as horas de operação, o fluido sofreu aquecimento por atrito, a densidade aumentou assim como a concentração de sólidos, o teor de água em óleo se alterou por conta da contaminação de óleo no tanque pulmão devido à administração anterior de fluidos oleosos. A condutividade elétrica excedeu a escala máxima do condutivímetro.

Durante o teste, o fluido sofreu correções de viscosidade e densidade. As correções de viscosidade serão discutidas na seção posterior, já a correção de densidade pode ser observada na Figura 89 (5). Aproximadamente no meio do dia foi adicionado ao tanque pulmão aproximadamente 350 kg de barita, para correção da densidade que estava em $1,12 \text{ kg/l}$ para $1,26 \text{ kg/l}$. Durante a adição, problemas de acúmulo de sólidos ocorreram, levando o operador a efetuar operações de retro lavagem. Isto justifica o comportamento oscilatório das propriedades neste período. Em seguida, a operação foi retomada a uma vazão controlada de $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, para manter a pressão na faixa anterior, já que a densidade e viscosidade foram aumentadas. É possível perceber que todas as propriedades apresentaram comportamento esperado durante a adição de sólidos, com exceção do teor de água em óleo. À medida que sólidos foram adicionados ao sistema, o teor de água em óleo diminuiu, apresentando comportamento estável na sua leitura. Como provado na Figura 69, os sólidos não alteram o teor de água em óleo, porém no caso apresentado na Figura 89 o fizeram devido à presença de óleo no fluido. A barita favorece a formação de emulsão estável em presença de parafina, água e energia de mistura. Acredita-se que houve o emulsionamento do óleo que estava aderido às paredes do tanque, e à medida que ele entrou no sistema, foi detectado pelo sensor.

Ao final, aproximadamente 08h40min da noite, a unidade recebeu um colchão lavador de água para limpeza. É possível observar que as propriedades retornaram para os valores esperados para água.

A Figura 89 é o resultado final, exposto na IHM, do algoritmo criado segundo o fluxograma contido na Figura 90. Programaticamente, os sinais são recebidos nas placas de aquisição de dados e importados para o ambiente virtual do *LabView*®. Neste ambiente, o sinal é tratado contra ruídos e dividido para cada grandeza aferida, já que cada uma recebe uma faixa de operação característica como explicado anteriormente. Cada sinal, subseqüentemente, recebe sua equação de conversão, linear, e é plotado contra o tempo absoluto. Em paralelo alguns sinais recebem tratamentos específicos, ou são usados paralelamente para mais de um fim. Por exemplo, a pressão além de plotada, serve como condicional de parada das bombas caso seu valor exceda 10 bar, como mostrado no fluxograma. A densidade e a temperatura, concomitante, são convertidas tanto para o S.I como para unidades de perfuração, para facilitar a interface entre usuários acostumados com grandezas de campo e grandezas acadêmicas. Todas as

grandezas possuem condicionais de alarme visual, como mostra o fluxograma. A partir de determinado valor, um barra vermelha se ascende do lado do gráfico de uma grandeza, indicando que a mesma está chegando ao topo de escala do equipamento ou a um valor perigoso operacionalmente. Também é possível perceber que o sensor de tamanho de partícula recebe um tratamento específico para que os dados sejam plotados na tela da UMPC. Como o equipamento não possui protocolo aberto de comunicação, uma série de exportações/importações/conversões deve ser feita para que o dado que está sendo mostrado no *software* do fabricante seja recebido no *LabView*®. Isto foi feito em específico para este sensor para que o usuário tenha a comodidade de observar todos os dados na mesma tela, dispensando a necessidade de constantes alternações entre telas.

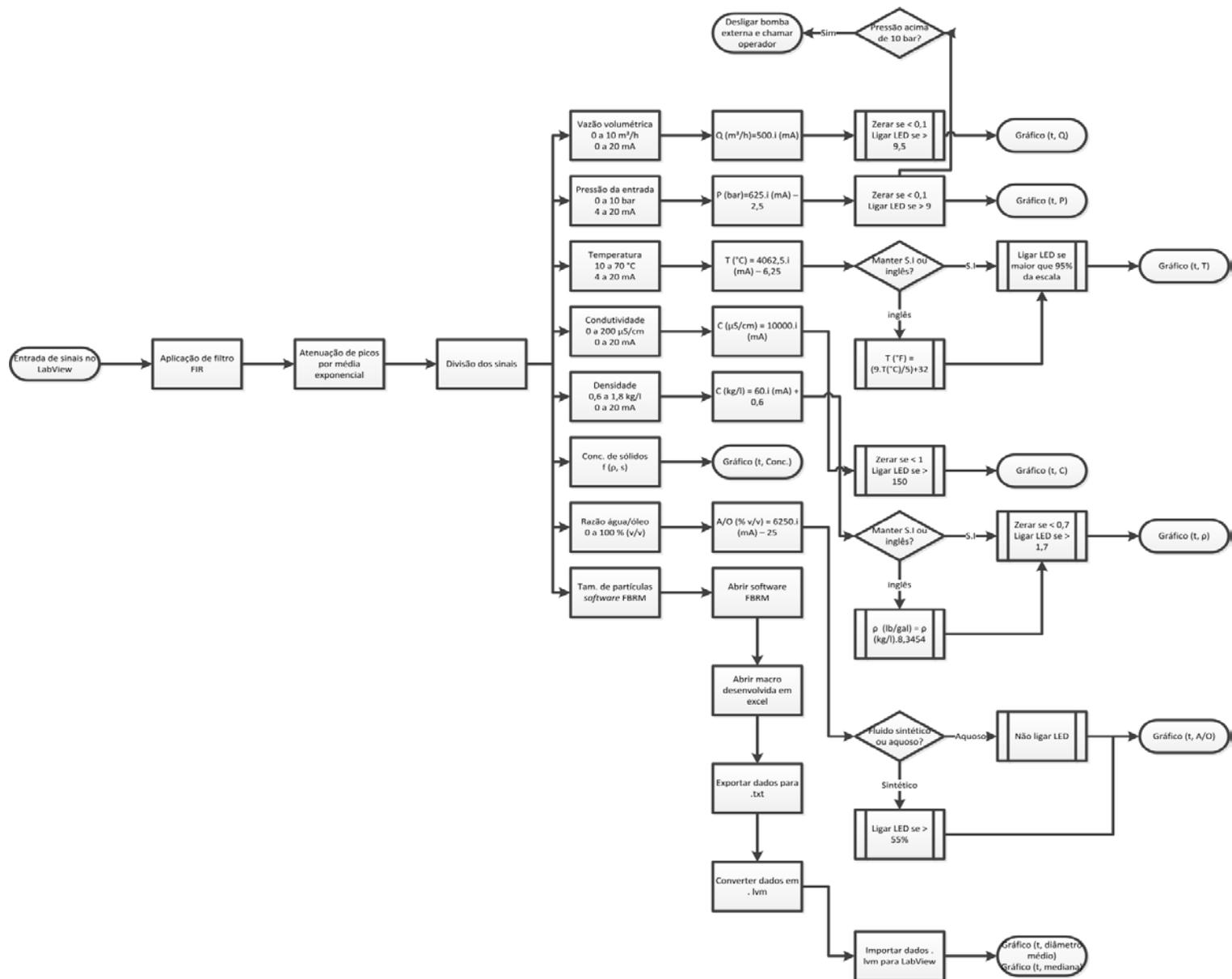


Figura 90. Fluxograma dos algoritmos presentes na seção "Condição Operacional" e "Monitoramento de Fluido".

4.3.4. Algoritmos da “Viscosimetria”.

Como dito anteriormente, as medições de viscosidade aparente e estabilidade requerem um algoritmo a parte, e mais complexo que as outras medições. Isso reside no fato de que para estas medições é necessário controlar primeiro o equipamento que efetuará as medições para se obter uma resposta. Para os outros equipamentos, basta energiza-los que a aferição já se inicia, para estes, não.

No caso específico do viscosímetro, a proposta deste trabalho é de avaliar a viscosidade aparente nas mesmas taxas utilizadas pelo FANN 35A. Desta forma, o primeiro passo é determinar a equivalência em RPM de um instrumento com outro, já que as medidas geométricas dos cilindros coaxiais de ambos são distintas. Quanto maior as dimensões dos cilindros, maiores taxas são alcançadas com menores rotações. Utilizando as equações de viscosimetria de Machado (2000), tendo como incógnita a velocidade angular, encontraram-se as seguintes rotações equivalentes, organizadas na Tabela 5.

Tabela 5. Tabela de frequência praticas pelo FANN e sua respectiva equivalência encontrada para o TT-100

Frequência aplicada pelo FANN 35A (RPM)	Taxa de deformação produzida (s^{-1})	Equivalência para o TT-100 (RPM)
3	5,11	2,19
6	10,22	4,38
100	170,23	73
200	340,46	176
300	510,69	219
600	1021,38	438

É possível perceber na Tabela 5 que o TT-100 (modelo do viscosímetro presente na UMPC) necessita de menores frequências para se atingir a mesma taxa de deformação. As características técnicas de ambos os instrumentos foram organizados na Tabela 6.

Tabela 6. Dados técnicos do viscosímetro FANN 35A e BROOKFIELD TT-100

Dimensão	FANN 35A	BROOKFIELD TT-100
Raio interno do cilindro externo r_2	0,018415 m	0,0309880
Raio externo cilindro interno r_1	0,017245 m	0,0295656
Constante elástica do sensor de torque	$3,87 \cdot 10^{-5}$ N.m/°	0,036 N.m/°
Altura do cilindro interno	0,040500 m	0,0592582
Razão entre raios β	1,0678	1,0481

Para fins elucidativos demonstram-se os cilindros coaxiais do viscosímetro do viscosímetro TT-100 na Figura 91 e sua posterior instalação na UMPC. Na Figura 92 são observados os cilindros coaxiais do viscosímetro FANN 35A.



Figura 91. Cilindros coaxiais do viscosímetro da BROOKFIELD, modelo TT-100, à esquerda. Instrumento montado na UMPC, à direita.



Figura 92. Cilindros coaxiais do viscosímetro da FANN, modelo 35A, à esquerda desmontado. Instrumento montado, à direita.

O próximo passo consistiu em programar o instrumento para executar a mesma metodologia aplicada no FANN 35A. Graças à modificação feita por Magalhães *et al.* (2014), o equipamento possui 100% de operacionalidade remota. Assim, o algoritmo basicamente consiste em gerenciar as velocidades do motor do viscosímetro, recebendo como resposta os sinais de corrente que são proporcionais à deflexão do elemento sensor de torque. A relação entre corrente e deflexão é sabida, a partir de uma regra de três simples fornecida pelo fabricante, onde 4 mA é 0° e 20 mA são 0,663° (fundo de escala, deflexão total).

O fluxograma contido na Figura 93 descreve em detalhes a programação executada para se controlar a taxa de deformação impressa no fluido durante os testes. O algoritmo consiste em controlar o motor do viscosímetro nas velocidades demonstradas na Tabela 5, permanecendo em cada velocidade até que certos condicionais sejam contemplados. Antes de iniciar tais velocidades, o viscosímetro sempre efetua processos de auto limpeza, para garantir que o fluido que está na escoando na tubulação possui as mesmas propriedades que o fluido presente no *gap* de

medição. Todo procedimento é feito por trinta segundos, impreterivelmente, após este período vigoram os condicionais descritos no fluxograma. Ambos precisam ocorrer simultaneamente para que o viscosímetro passe para o próximo passo. Os condicionais são: a tensão no momento “t” diminuída da tensão anterior (momento “t-1”) deve ser, em módulo, menor que 0,5. A mesma condição é requerida para a velocidade angular do motor do viscosímetro. Toda etapa pode ser manualmente adiantada, de acordo com o desejo do operador. Assim, o motor do viscosímetro imprime no fluido sob medição pelo menos 30 segundos em cada taxa de deformação. O procedimento termina após percorrer as seis taxas de interesse dando início aos procedimentos de tratamento dos dados de deflexão angular gravados. O fluxograma do algoritmo de tratamento dos dados “pós teste” são apresentados na Figura 94.

O tratamento pós teste consiste primeiramente em acessar o arquivo onde os dados de velocidade angular e deflexão foram gravados durante a etapa anterior elucidada na Figura 93. Após importar estes dados, o programa os filtra excluindo os dados do estado transiente gerados durante as mudanças de velocidade do motor. Os limites de tolerância estão demonstrados no fluxograma. Por exemplo, para a taxa de 511 s^{-1} serão considerados dados em regime permanente aqueles provenientes de taxas de deformação entre 509 e 513 s^{-1} . Subsequentemente, esse arquivo único é repartido em arquivos contendo os pares tensão de cisalhamento e taxa de deformação (já transformados a partir da velocidade angular e deflexão). Logo, seis arquivos são gerados. O primeiro contém os valores de tensão gerados em taxas de deformação variando entre 4 e 5 s^{-1} , o segundo as tensões entre 9 e 12 s^{-1} assim por diante. Como o viscosímetro permanece pelo menos trinta segundos em cada taxa, estes arquivos contêm no mínimo trinta pares válidos. O próximo passo é aplicar a média tanto na tensão quanto na taxa, levando para o ambiente virtual um único par de tensão e taxa médios. É partir daí que a viscosidade aparente é calculada dentre outros parâmetros. Para expor os dados na tela do computador, um condicional é imposto para que o resultado seja ponderado sobre sua precisão. Todo resultado médio, se possuir um desvio padrão maior que 20% em referência ao seu valor médio é classificado como “Imprecisão”. Apesar de não expor na IHM, esses dados estão disponíveis nos banco de dados e no histórico da viscosimetria, assunto que será abordado mais a frente.

Ambos os algoritmos dão origem à IHM demonstrada na Figura 78, na parte de “Viscosimetria”. Durante o teste típico com fluido de perfuração de base aquosa descrito anteriormente, medidas reológicas foram conduzidas, assim é demonstrado na Figura 95 um zoom na parte de “Viscosimetria” efetivamente em operação. É possível perceber que somente os últimos dados de reologia são demonstrados, caso o usuário deseje visualizar resultados passados ele deve acessar o histórico da viscosimetria. Na Figura 95 são demonstrados três momentos diferentes de teste reológico, um feito às 12h27min faltando 2,5 minutos para o próximo, outro em andamento há 4,8 minutos aplicando 1021 s^{-1} no fluido e obtendo a resposta do sensor de 11 mA e outro feito às 18h31min faltando 15,8 minutos para o próximo teste.

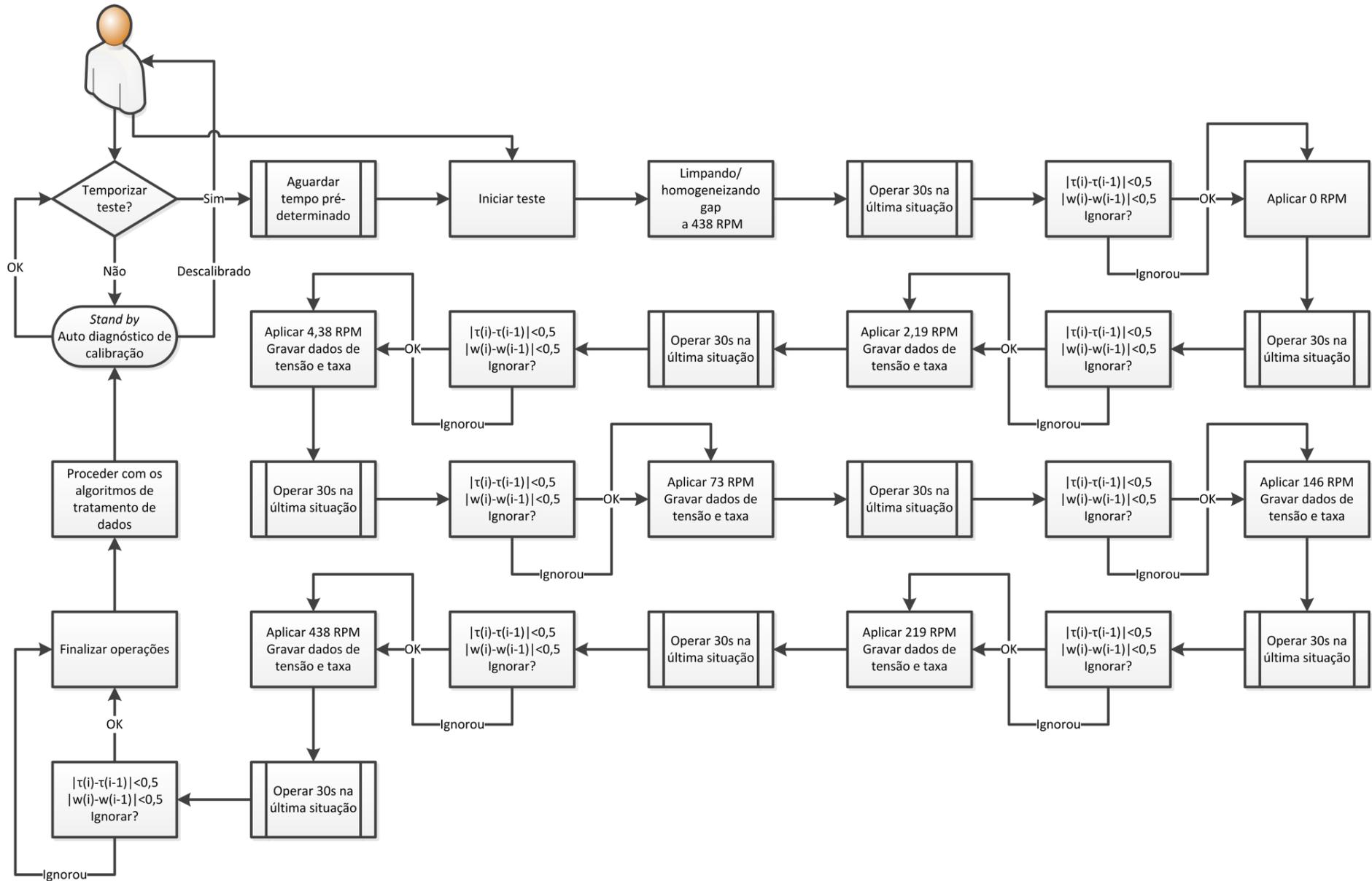


Figura 93. Fluxograma do algoritmo de administração do viscosímetro TT-100.

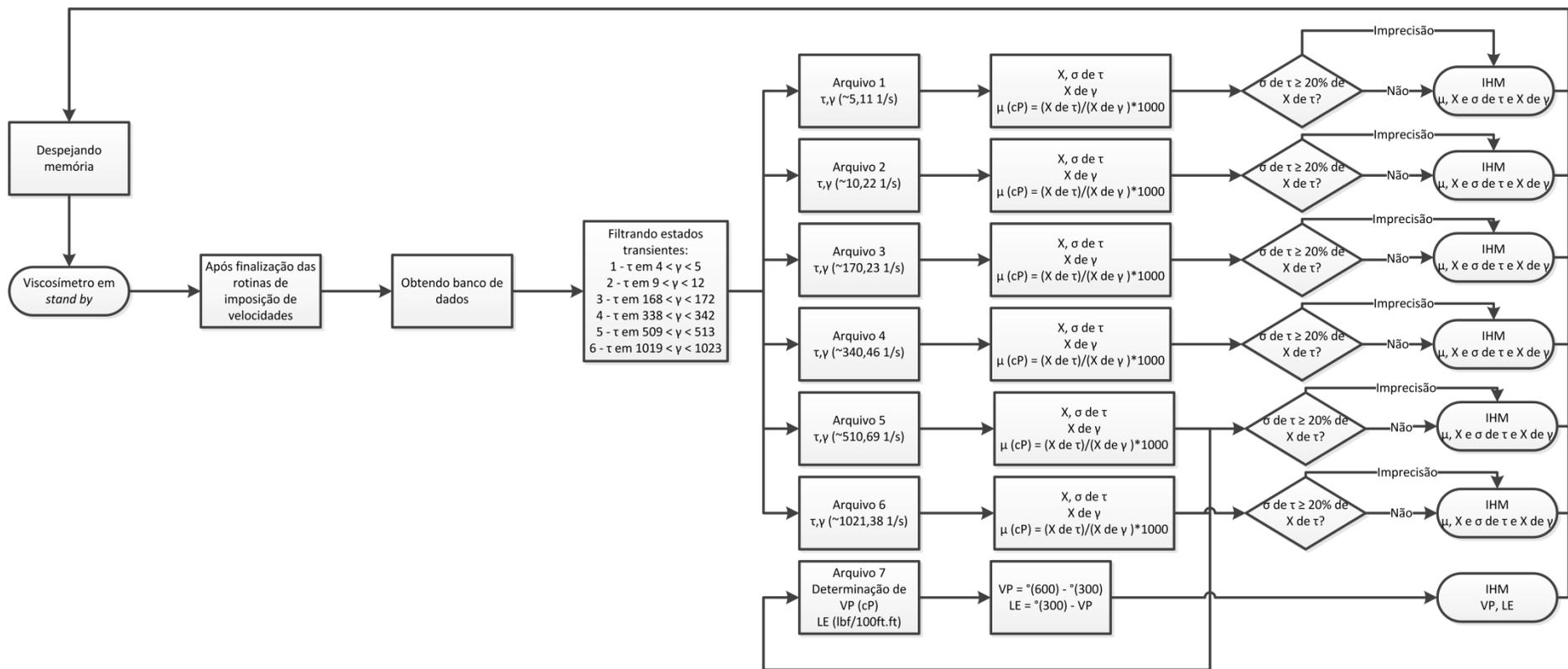


Figura 94. Fluxograma do algoritmo de tratamento de dados pós-teste de viscosidade

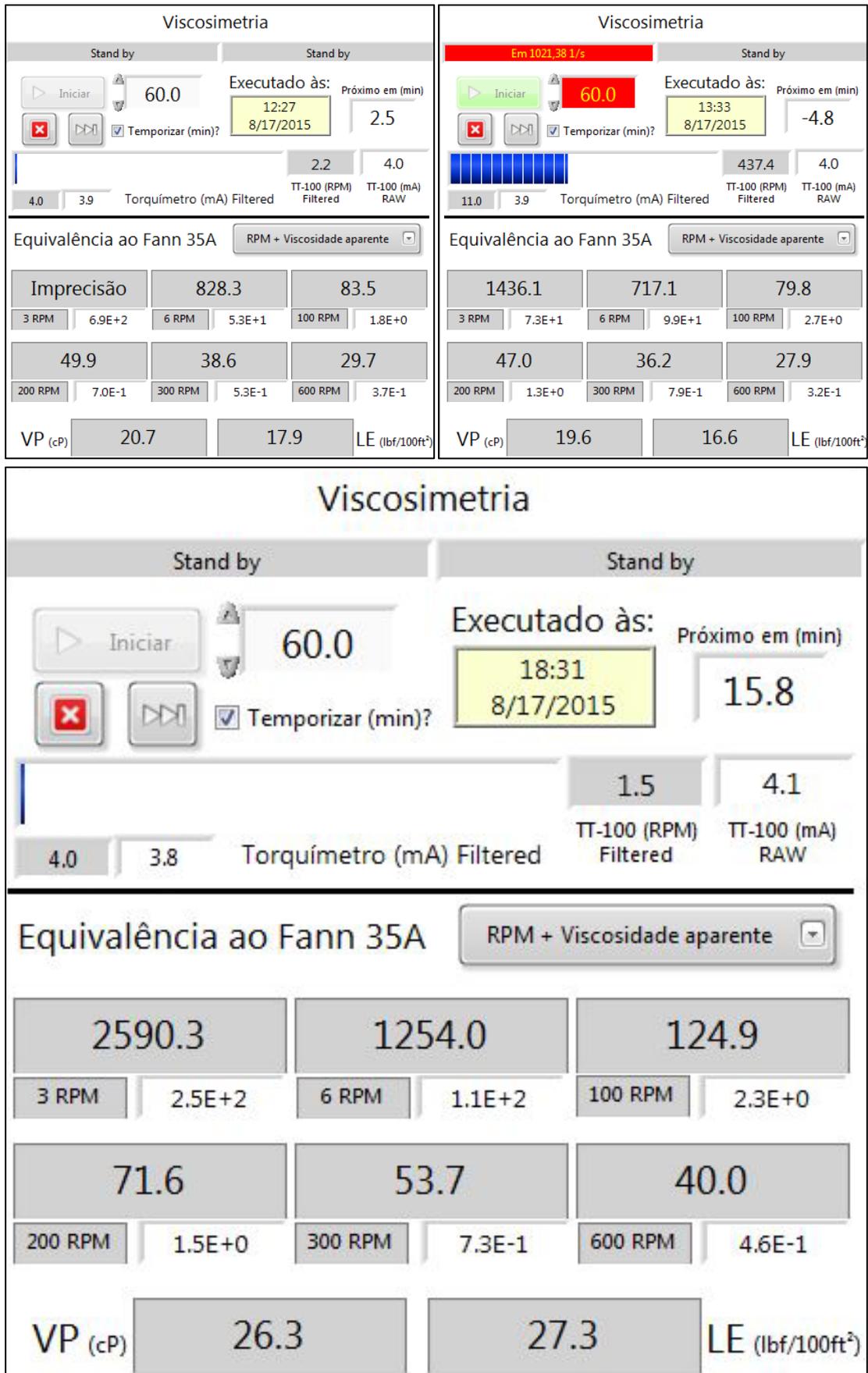


Figura 95. IHM da Viscosimetria em três momentos diferentes durante rotina de operação.

Na Figura 95 é possível observar que a medição foi imprecisa a três RPM, pois o desvio padrão (690 cP) estava acima de 20% do valor da média. Maiores detalhes sobre a classificação de “Imprecisão” será discutida a seguir. Já para medição feita às 13h33min não houve imprecisão, nem na medição feita às 18h31min. Foi dito anteriormente que o fluido recebeu, dado um momento do dia, uma correção da viscosidade. Este fato é corroborado nos resultados demonstrados na Figura 95. Além das viscosidades aparentes estarem maiores depois da 15h (momento em que foi vertido o agente viscosificantes ao tanque), a VP (viscosidade plástica) e o LE (limite de escoamento) tiveram significativos aumentos.

Maiores detalhes operacionais serão dados durante o esclarecimento das funções dos botões e controladores presentes na IHM da Figura 95.

- Botão “Iniciar”: Ao clicá-lo, o usuário dá início a um único ciclo de aferição da viscosidade aparente do fluido nas seis velocidades pré-definidas e imutáveis. O processo só pode ser interrompido se o botão “X” vermelho abaixo for pressionado. O botão “Skip”, ao lado do botão “X” é responsável por pular a etapa atual. As etapas são separadas por um temporizador de 30s mais um critério de convergência, como demonstrado no fluxograma da Figura 93. O botão “Skip” permite que o usuário ignore tanto o tempo quanto o critério de convergência das taxas e tensões, forçando o viscosímetro a prosseguir com o teste;
- Botão “Temporizar (min)” e entrada numérica (60): Semelhantemente como explicado na seção controle de *software*, este botão temporiza os testes de viscosimetria, fazendo com que automaticamente, a cada sessenta minutos, um teste seja executado. O intervalo de tempo pode ser mudado pelo usuário, porém o programa não aceitará intervalos menores que sessenta minutos, a fim de preservar o selo mecânico do viscosímetro. Ao lado desta entrada do usuário, quando “Temporizar” estiver selecionado, um contador regressivo aparece para informar em quanto tempo o próximo teste será executado. A fim informativo, um conjunto de selos mecânicos para reposição custa em torno de R\$ 5000,00, sendo que sua vida útil é uma função da quantidade de sólidos em suspensão. Quanto mais sólidos, maior o desgaste e menor a vida útil. Testes preliminares apontam experimentalmente um valor de aproximadamente 100 horas de vida útil utilizando fluidos de perfuração com carga média de 500 a 600 g de sólidos por litro de suspensão. Dessa forma, se cada teste dura em média 15 minutos, o custo médio por teste é de R\$ 12,50, contabilizando apenas o desgaste da peça mais sensível;
- Indicador “Executado às”: Indica a data completa do último teste executado;

- Barra horizontal “Torquímetro (mA) Filtered”: Indica visualmente o quanto da escala de deflexão angular já se alcançou. Auxilia ao operador checar se o viscosímetro está operando em fundo de escala (fluidos estão pouco viscosos) ou se está operando próximo ao topo de escala (fluido está muito viscoso). Existe uma lógica de segurança atrelada a esta barra. Se durante alguma etapa do teste se alcançar valores maiores que a deflexão máxima (fluido muito viscoso para a constante elástica do viscosímetro ou problemas de sólidos presos no *gap*), o algoritmo passa automaticamente para o próximo teste. Isso pode se repetir indefinidamente até que se chegue ao final do teste;
- Indicador “TT-100 (RPM) Filtered”: Indica o valor real do RPM do motor do viscosímetro. Trata-se do *feedback* do servoconversor;
- Indicador “TT-100 (mA) RAW”: Leitura do *loop* de corrente produzido pelo sensor de torque do mesmo sem nenhum tratamento antirruído. É neste número que se aplica o algoritmo de auto detecção de calibração. Ao longo do uso, o torquímetro pode se deslocar do zero, devido a impurezas ou sólidos que estão se acumulando no interior da câmara de medição. Desta forma, ele não mais apresentará o valor de 4 mA quando a velocidade do motor é nula. Um *pop up* será apresentado na tela avisando ao operador que há tal deslocamento (avisará se menor que 3,8 ou maior que 4,2 mA). É apenas um aviso que fica registrado no log da viscosimetria, o usuário poderá proceder com testes mesmo em situações como estas;
- Indicadores de etapa localizados acima do botão “Iniciar”: Informam textualmente em qual etapa do algoritmo o viscosímetro está operando. O indicador da direita é referente às etapas de medição (Figura 93), o da esquerda referente às etapas de tratamento de dados (Figura 94);
- Menu *pull down* referente às unidades dos resultados: Para facilitar a comunicação entre engenheiros e técnicos que podem estar acostumados a trabalhar com unidades diferentes, é possível, após todo o processo de aferição da viscosidade e tratamento dos dados gerados, escolher qual unidade deverá ser apresentada como resultado nos indicadores localizados na seção “Equivalência ao FANN 35A”. Essas unidades podem ser mudadas a qualquer momento depois do teste. O usuário poderá permutar entre as combinações de RPM ou taxa de deformação com tensão cisalhante, viscosidade aparente ou equivalência em graus ângulo. Desta forma, pode-se, por exemplo, checar o resultado em termos do par taxa/tensão, ou se o técnico estiver mais habituado, em termos de RPM/ângulo. A medida ângulo é calculada a partir da viscosidade

aparente. Significa calcular qual seria o ângulo de deflexão no viscosímetro FANN que proveria a mesma viscosidade lida no viscosímetro TT-100. É apenas usar as equações de viscosimetria de Machado no sentido “contrário”. Essa medida foi inserida pois muitos operadores, advindo de anos de experiência, já sabem quantificar se o fluido está adequado ou não a partir do ângulo lido, sem a necessidade de proceder nos cálculos transformando RPM em taxa e ângulo em tensão ou viscosidade aparente. VP e LE são unidades fixas e são correlações empíricas criadas para rapidamente qualificar um fluido, desta forma, não há escolha de unidades para estes dois parâmetros, ambos permanecem no sistema inglês praticado nos campos de perfuração;

- Indicadores dos resultados obtidos: Além da opção de escolher em qual unidade o resultado será exibido, o sistema pode de maneira automática dizer “imprecisão” ao invés de um resultado numérico. Isso ocorre toda vez que o desvio padrão durante os testes for maior que 20% da média da unidade escolhida. Por exemplo, após os testes o usuário escolhe receber o resultado na combinação taxa/viscosidade aparente. Nos blocos maiores cinza estarão os resultados de viscosidade aparente (ou tensão ou ângulo), nos blocos cinza menores localizados abaixo destes estarão a taxa (ou RPM) e nos blocos pequenos brancos estarão os desvios padrões encontrados respectivamente em cada velocidade. Suponha-se que o fluido apresentou 1500 cP a $5,11 \text{ s}^{-1}$, que é um valor comum para fluidos de perfuração, mas se o desvio padrão dos dados acumulados durante esta taxa foi de 350 cP, ao invés do valor da viscosidade, aparecerá a palavra “imprecisão”. Isso porque 350 cP é 23,34 % da média. Esse algoritmo foi criado para que não se reporte valores inadequados, evitando criar confusão em pessoas com menor grau de formação. Por vezes, podem ocorrer altos desvios padrões nas médias de tensão e taxa devido a flutuações randômicas durante as medições. Exemplos: perturbações elétricas, ruídos, acúmulo momentâneo de sólidos, heterogeneidades no fluido, efeitos de escorregamento; são alguns motivos que podem fazer com que o sensor de torque varie suas medições sem que haja variação da velocidade do motor do viscosímetro. São perturbações inerentes às características dos fluidos com que se trabalha e às complexidades de se medir reologia em linhas hidráulicas “vivas”. Pela experiência, é comum fluidos de perfuração com longo histórico de cisalhamento apresentarem “imprecisão” durante as duas primeiras velocidades. Os longos períodos de cisalhamento tendem a degradar os polímeros que dão as características viscosas e tixotrópicas típicas dos fluidos de perfuração. Como consequência, a curva reológica tende a ser mais linear e com menores índices de consistência, assim como os efeitos gelificantes também tendem a diminuir. Isso torna a leitura em baixas rotações mais difíceis, já que o elemento sensor de torque funciona praticamente em fundo de escala.

4.3.5. Algoritmos da “Estabilidade elétrica”.

Nesta seção o usuário controla o início dos testes de estabilidade elétrica. No zoom da IHM (Figura 96) apresentada na Figura 78 é possível notar o aviso “Teste será habilitado quando o fluido for base óleo”. Esta condição foi posta como medida de segurança a operadores inadvertidos, pois não há razão em aplicar este teste em outros tipos de fluidos a não serem os de base sintética.

O sistema de classificação do fluido é automático, baseado em regras heurísticas criadas a partir da experiência do autor. Como a UMPC possui uma série de sensores lendo as propriedades do fluido em tempo real, a partir de um algoritmo de enquadramento de condições, é possível criar um sistema automatizado que é capaz de discernir quando o fluido é água pura, óleo puro (parafina), escoamento bifásico, fluido de perfuração base água, base sintética ou quando a tubulação está cheia de ar (vazia). Caso nenhuma das condições prévias se enquadre, o algoritmo reportará “Fluido não identificado”. O resultado é demonstrado ao operador no indicador textual localizado acima da viscosimetria. Desta forma, somente quando o sistema detectar “Fluido base óleo” é que a interface para o teste de estabilidade elétrica ficará disponível. Na Figura 96 pode ser observada a comparação da interface desabilitada com a interface habilitada.

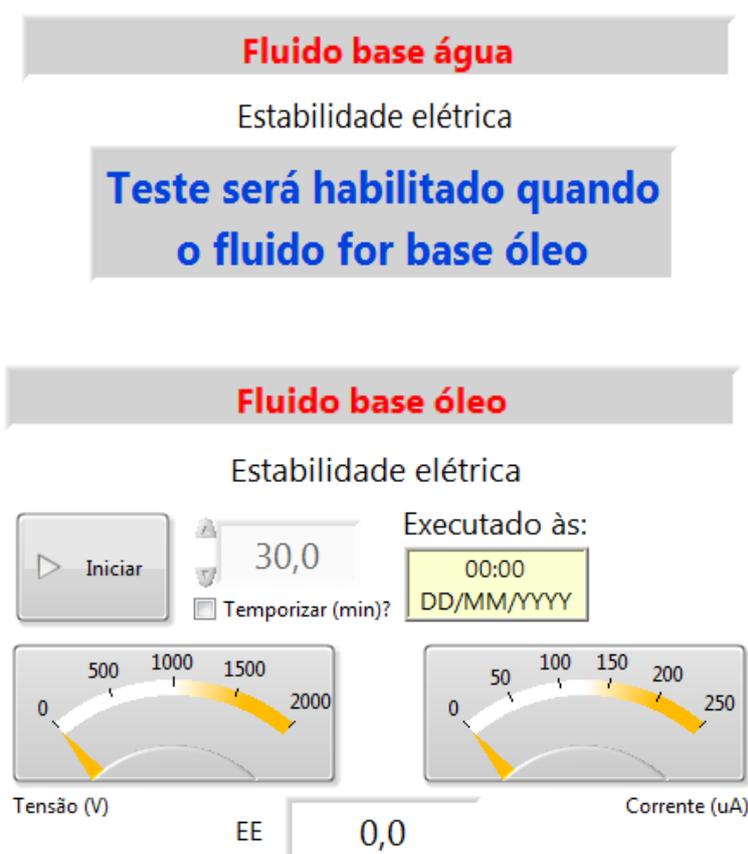


Figura 96. Acima sistema em detecção de fluido base água, abaixo, sistema em detecção de fluido a base óleo.

O algoritmo de autoclassificação dos fluidos funciona obedecendo ao fluxograma descrito na Figura 97.

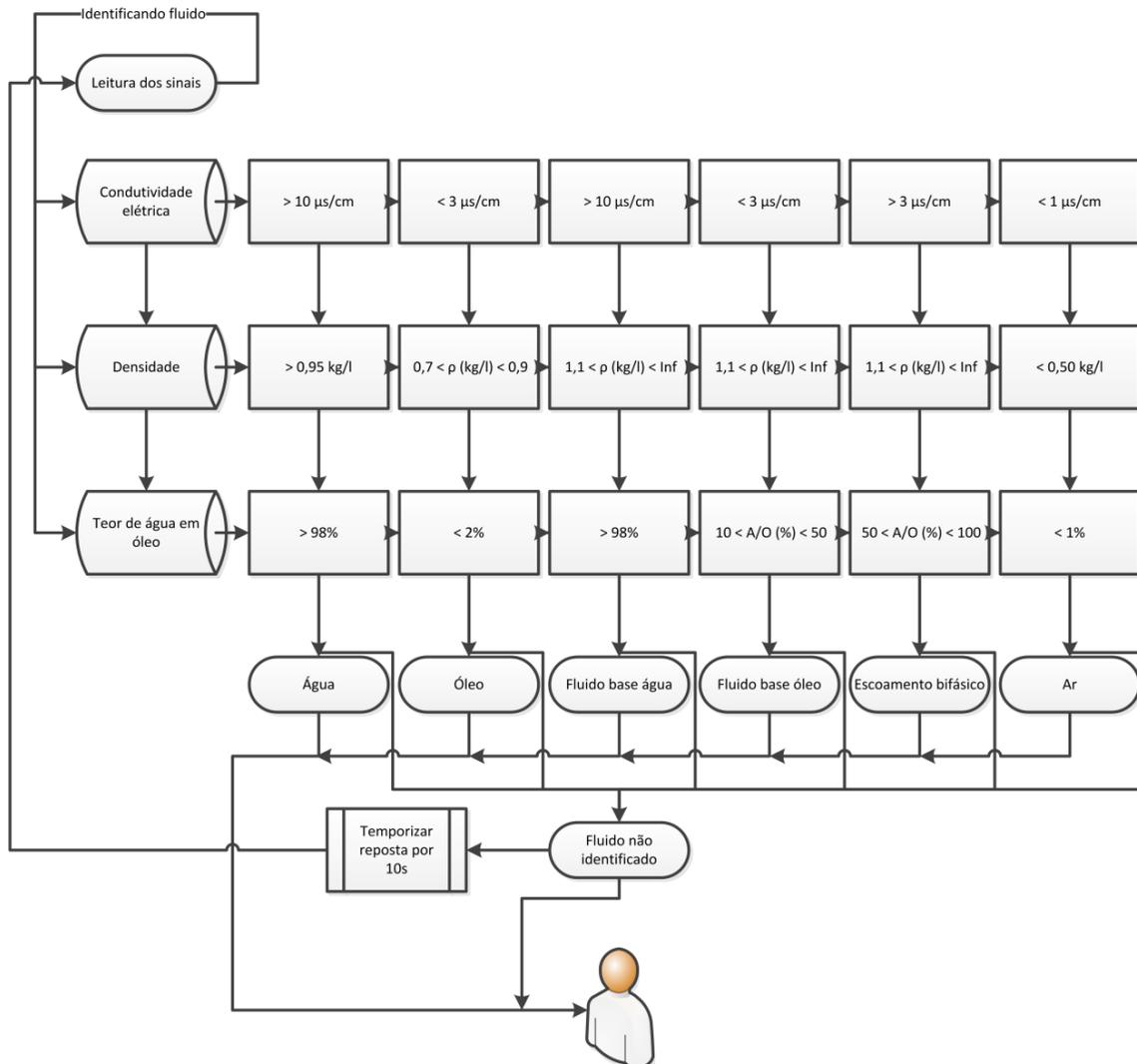


Figura 97. Fluxograma do algoritmo de autoclassificação dos fluidos

O sistema usa dados de densidade, teor de água em óleo e condutividade elétrica para classificar o fluido quanto água, óleo, fluido a base de água, fluido a base de óleo, escoamento bifásico ou ar. Cada fluido dito possui propriedades que são mapeáveis e estáveis. Por exemplo, água terá densidade sempre próxima a 0,98 kg/l, condutividade elétrica entre 10 e 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e teor de água em óleo quase 100%. É possível observar que os fluidos classificados possuem propriedades tão distintas que é possível discerni-los somente aferindo estas propriedades. Na prática, o algoritmo da Figura 97 fornece uma resposta ao operador de que tipo de fluido está passando pela UMPC baseado no enquadramento das propriedades físico químicas listadas. Caso o fluido não se enquadre em nenhuma das faixas concomitantemente, é dito fluido não identificado. A cada 10 segundos uma varredura é feita para atualizar o *status* do tipo de fluido em bombeamento. Uma vez classificado como base óleo, a interface que está à esquerda da

Figura 96 desaparecerá dando lugar à interface à direita da mesma figura. Os botões e indicadores tem a seguinte função:

- Botão “Iniciar”: Inicia o teste de estabilidade elétrica, num único ciclo. O teste obedece aos mesmos preceitos técnicos e metodologia do teste em bancada;
- Botão “Temporizar”: Temporiza para que o teste seja feito a cada 30 minutos. Esse tempo é ajustável, porém 30 minutos é o intervalo mínimo aceito pelo programa. Ao clicar neste botão um contador regressivo determinando o tempo remanescente para o próximo teste aparecerá da mesma forma que descrito na viscosimetria.
- Indicador “Executado às”: Informa a data completa do último teste.
- Indicadores “Tensão (V)” e “Corrente (μA)”: Indicam em tempo real o valor da tensão elétrica sendo aplicada no seio do fluido e a resposta da corrente alcançada a cada valor de tensão.
- Indicador numérico “EE”: indica o valor da estabilidade elétrica (valor de tensão cuja corrente correspondente foi de 61 μA).

O algoritmo completo do teste pode ser observado no fluxograma da Figura 98.

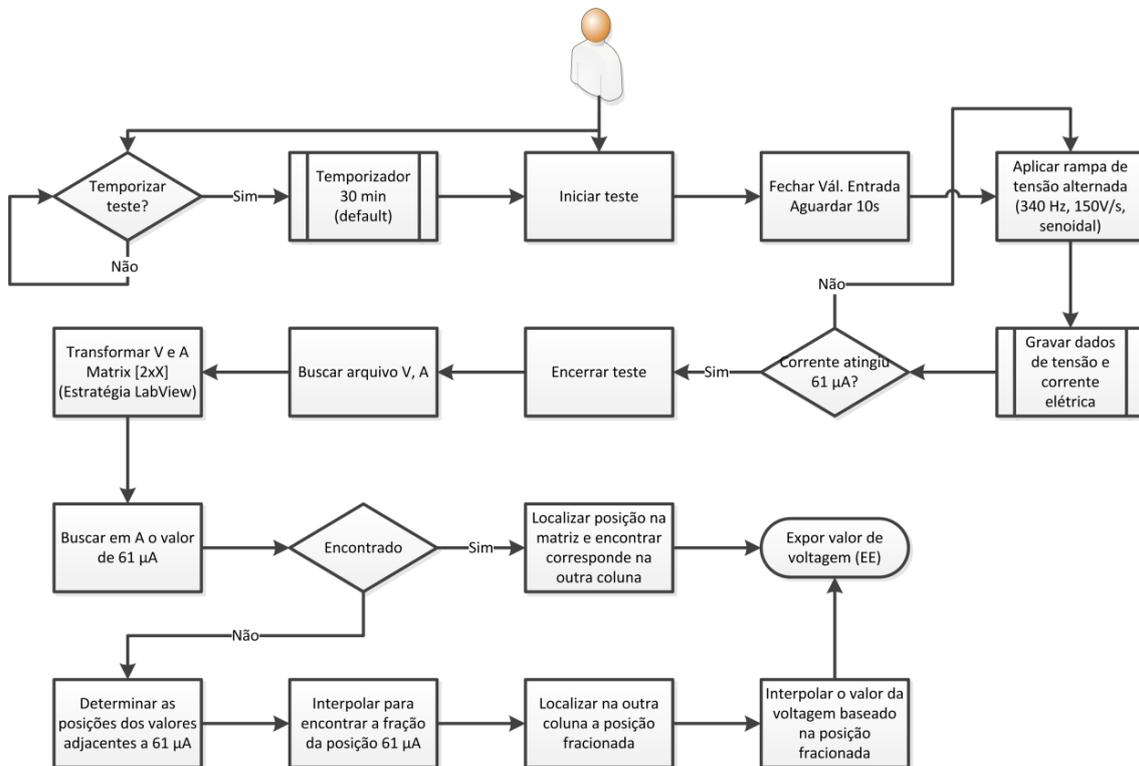


Figura 98. Fluxograma do algoritmo de testes de estabilidade elétrica.

Em linhas gerais, o fluxograma da Figura 98 demonstra uma metodologia parecida com aquela usada para os testes de viscosidade. Primeiro controlar a ação sobre o fluido, grava a resposta e em seguida tratar os dados. O que se faz na prática para os testes de estabilidade elétrica é aplicar a rampa de tensão elétrica, monitorar a corrente gerada gravando o par tensão/corrente, em seguida tratar os dados seguindo um algoritmo de interpolação. Vide fluxograma para maiores detalhes.

Como resultado típico, um fluido de perfuração base óleo teve sua estabilidade elétrica monitorada durante várias horas de operação, semelhantemente como foi feito com o fluido de perfuração de base aquosa. O zoom da IHM da “Estabilidade Elétrica” durante funcionamento pode ser visto na Figura 99.

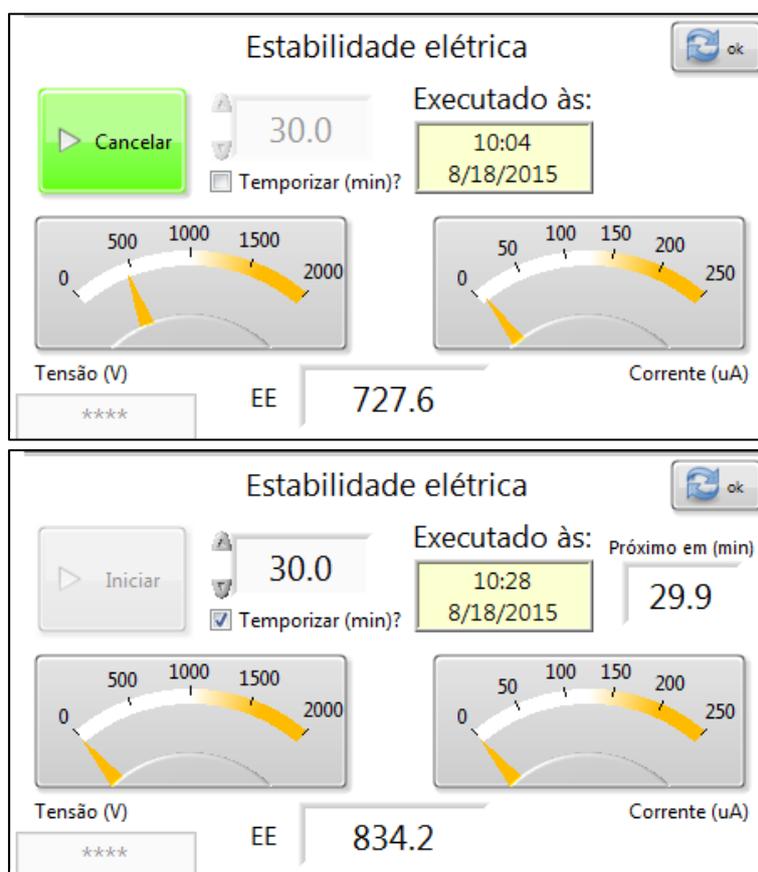


Figura 99. Zoom na IHM da “Estabilidade Elétrica” e funcionamento.

Na Figura 99 é possível verificar que um teste foi executado às 10h04min (vide região superior da figura), e que a resposta foi de 727,6 volts. Ainda nesta região, é visto que outro teste foi manualmente requerido e está em andamento, já que o botão “Iniciar” foi pressionado tornando-se “Cancelar”. Neste teste em andamento a voltagem está em quase 500 volts e a corrente ainda apresenta valores próximos à zero. Já na região inferior da Figura 99 é demonstrado como a interface se comporta quando existe agendamento de testes. Às 10h28min um teste foi executado, estando outro agendado para daqui a 29,9 minutos. Caso o usuário esteja interessado em conhecer os valores de estabilidade elétrica em testes passados, ele deve acessar o “histórico de estabilidade elétrica”.

4.3.6. Algoritmos do “Controle do Container”

O algoritmo do controle do container segue a lógica descrita no fluxograma apresentado na Figura 100.

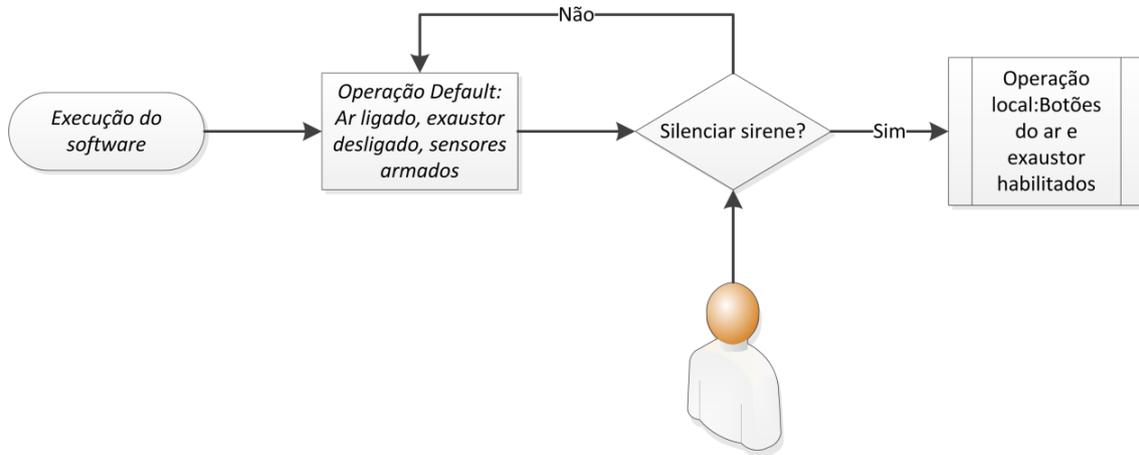


Figura 100. Esquema da lógica disponível para controle da segurança e climatização do container.

O algoritmo descrito no fluxograma da Figura 100 deu origem à IHM descrita na Figura 78, cujo zoom pode ser visto na Figura 101.

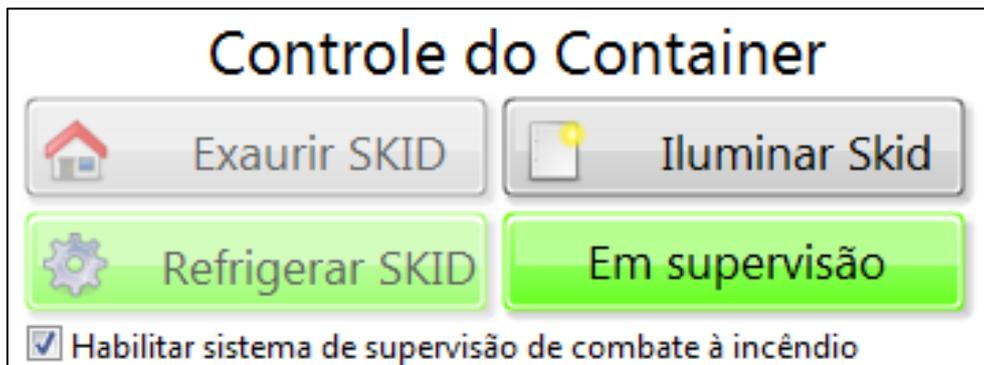


Figura 101. Zoom em “Controle do Container”.

Ao executar o sistema supervisório, automaticamente o ar condicionado é ligado, o exaustor permanece desligado e o sistema supervisório habilita a entrada dos sinais dos sensores de fumaça, calor, presença e gases inflamáveis por meio do botão “Habilitar sistema de supervisão...”. Para confirmar que o sistema está sob supervisão, um sinal visual aparece abaixo do botão “Iluminar *skid*”. Se o usuário desabilitar o sistema de supervisão, o programa ignora os dados dos sensores e habilita o botão do ar condicionado para ser ligado e desligado. É também neste botão que o usuário irá silenciar a sirene de emergência após algum evento. O botão do exaustor funciona sempre ao contrário do ar, por isso que basta apenas a liberação do botão do ar condicionado. Se ligar o ar, o exaustor automaticamente será desligado, se desligar o ar, o exaustor será ligado. Se o usuário quiser obter o controle total sobre estes dois

equipamentos, ele deverá ir ao quadro de distribuição e virar a manopla de “Automático” para “Manual”. Desta forma, o comando do ar e exaustor passa a ser nos botões locais, e não mais pelo *LabView*. O botão iluminação é independente de qualquer lógica, podendo ser acessado a qualquer momento.

4.3.7. Algoritmos do “Controle Operacional – Retro lavagem”.

Nesta seção o usuário poderá executar as operações de retro lavagem. O controle da vazão da retro lavagem é feito em malha aberta, manipulada por meio do RPM da bomba interna. Existe um indicador para identificar a pressão de descarga da bomba interna, por questões de segurança. Caso a pressão da retro lavagem exceda 10 bares, a bomba se auto desliga e sugere ao operador que algum entupimento ocorreu na linha, já que a perda de carga do circuito hidráulico, mesmo na máxima vazão, não chegaria a este valor. Na Figura 102 pode ser observada as IHMs (em zoom) da parte da “Retro lavagem”, uma em operação de limpeza (acima) e outra não (abaixo).

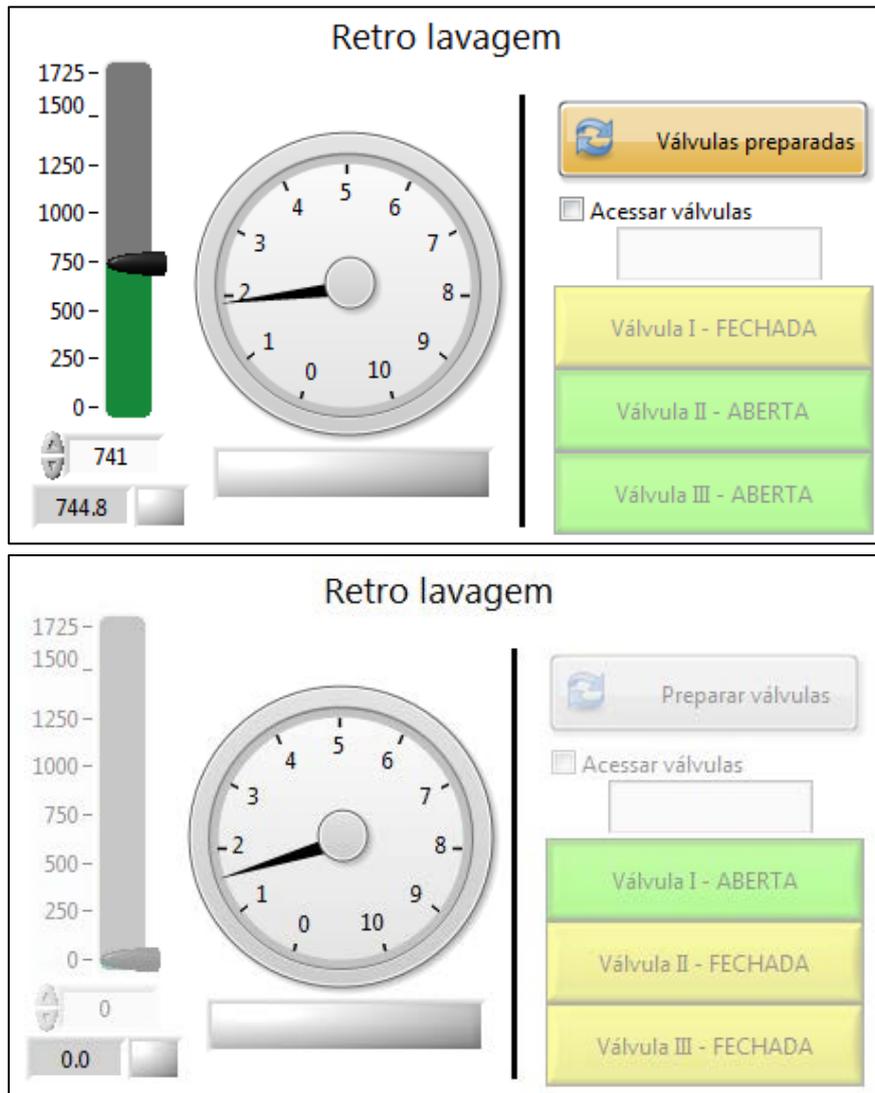


Figura 102. Zoom em “Retro lavagem”.

Para iniciar a operação de retro lavagem, basta o usuário pressionar o botão “Preparar válvulas”. O sistema hidráulico possui três válvulas automáticas para direcionamento de fluxo. Como modo *default*, o botão de retro lavagem está desligado e as válvulas I, II e III estão respectivamente aberta, fechada e fechada. Se o botão “Preparar válvulas” for apertado, as válvulas se invertem de posição e a manipulação da bomba interna é liberada ao usuário, dez segundos após a válvula de entrada se fechar e a válvula de *by pass* se abrir. Assim, a operação de retro lavagem pode ser feita sem que haja a interrupção do bombeio do fluido de perfuração. Isto é desejável, pois longos períodos sem bombeio do fluido podem incorrer em depósitos de sólidos ao longo das tubulações externas à UMPC.

Na Figura 103 pode ser observado o esquema hidráulico da UMPC para elucidação dos possíveis caminhos formados a partir da manipulação das aberturas das válvulas I, II, III e das válvulas de entrada e *by pass*.

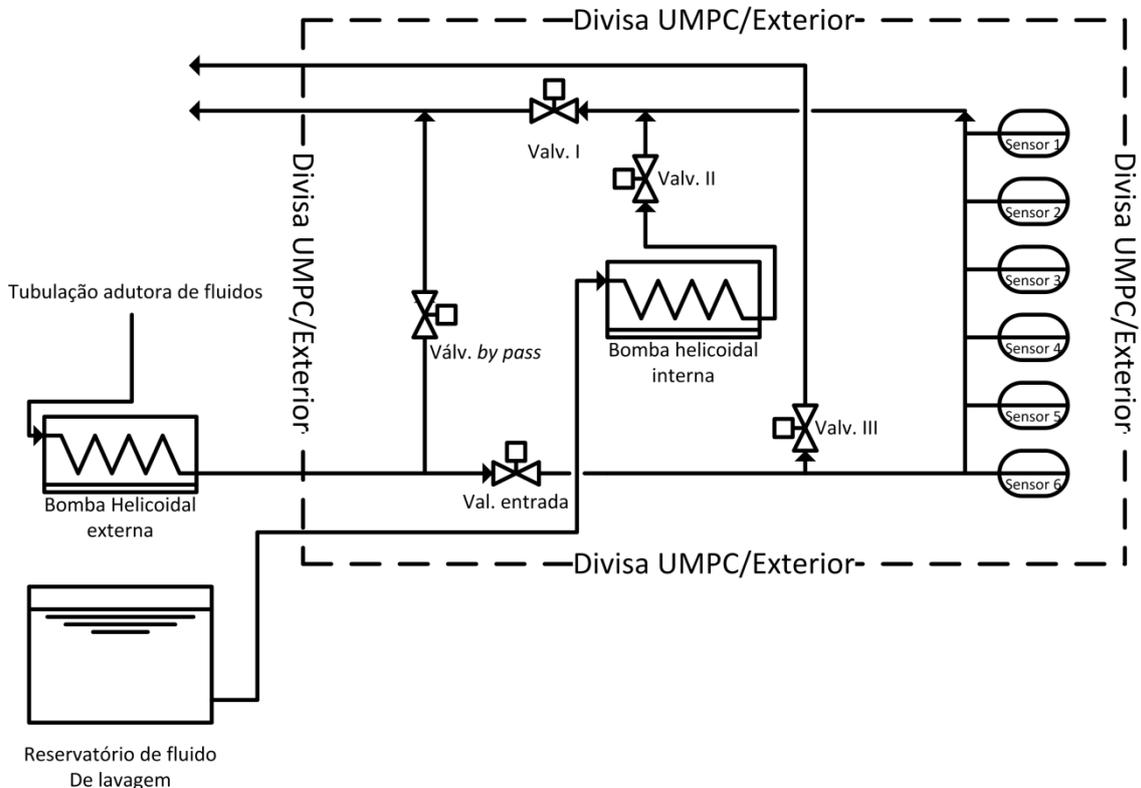


Figura 103. Esquema hidráulico simplificado das linhas hidráulicas da UMPC. Enfoque no sistema de retro lavagem.

Vide Figura 104 e Figura 105 para detalhes das válvulas instaladas e bomba de retro lavagem na UMPC.

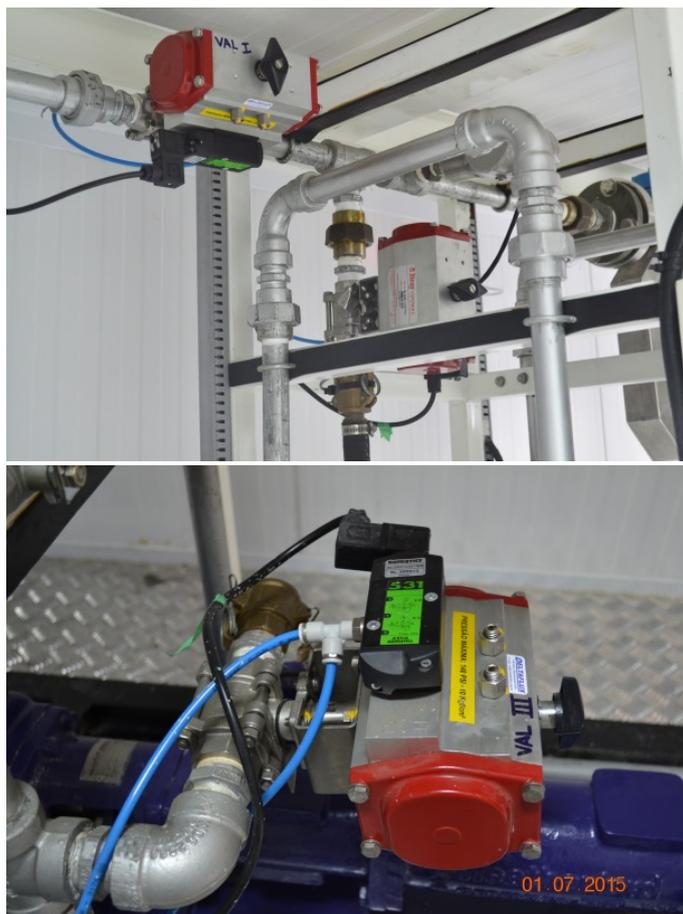


Figura 104. Foto das válvulas I e II, acima e respectivamente. Foto da válvula III, abaixo.

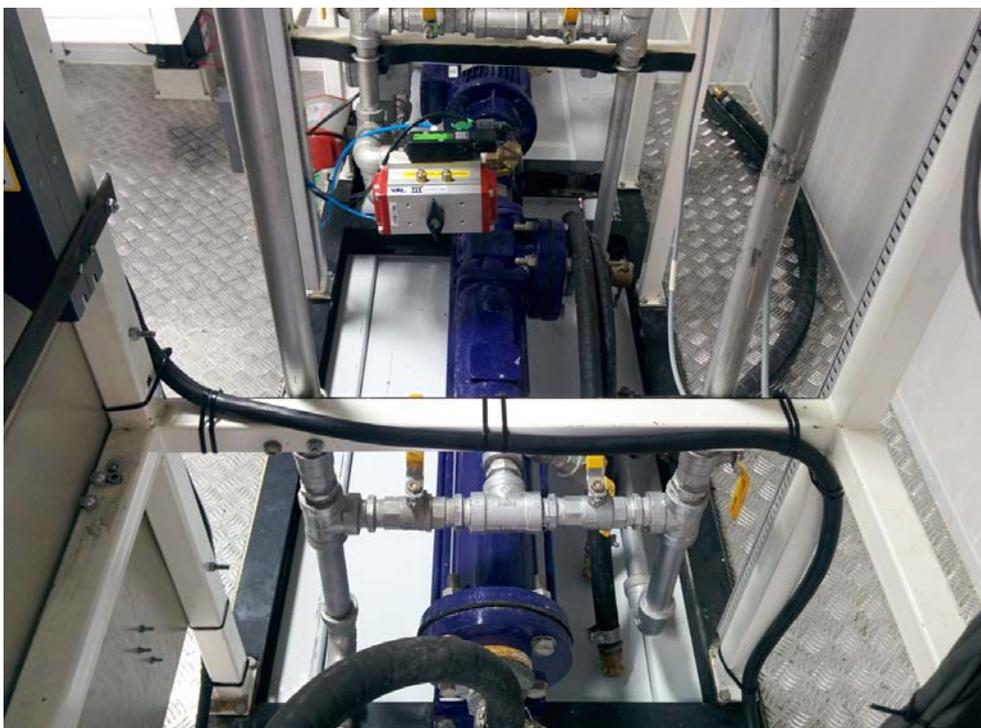


Figura 105. Foto Bomba instalada para retro lavagem no interior da UMPC

4.3.8. Resultados dos módulos de *software* criados para acessar o histórico da viscosimetria e estabilidade elétrica

Em última etapa, demonstram-se dois módulos de *software* criados para acessar os históricos dos testes de viscosimetria e estabilidade elétrica, já que seus respectivos resultados na tela são sempre referentes ao último teste. Os programas consistem basicamente em plotar o histórico da grandeza de interesse em função da sua frequência de ocorrência.

O usuário deve primeiramente selecionar o arquivo que contém o banco de dados de interesse, clicando no botão procurar arquivo. O *Windows* abrirá uma janela já na localidade do disco rígido onde o banco de dados está criado. O usuário poderá escolher o arquivo de qualquer data. Depois de selecionado o arquivo desejado, um próximo *pop up* é aberto para o usuário escolher o arquivo que contém informações complementares dos testes, como data e hora dos testes realizados naquele dia, comentários gerais etc.. Após, o indicador abaixo do botão “Procurar arquivo” se tornará amarelo com o dizer “Executando dados”. Isso significa que o programa está importando os dados dos arquivos para a memória volátil do *loop*. Após importados, automaticamente o segundo botão indicador abaixo se tornará verde com os dizeres “Executando gráficos”. Ao término, o gráfico será traçado no espaço à direita, assim como serão listados todos os horários em que os testes foram feitos no dia em questão. Também são listados os pontos discretos do gráfico, sendo os pontos do eixo da abscissa listadas na primeira coluna na matriz presente no espaço Logs, e os pontos da ordenada na segunda coluna. Por fim, são listados os valores de VP e LE encontrados para cada teste, sequencialmente, na matriz encontrada no espaço VP e LE. A unidade usada no eixo das ordenadas para traçar o gráfico será aquela escolhida previamente na IHM da UMPC, no eixo da abscissa será a frequência dos dados.

Será dado um exemplo para elucidar o porquê do eixo da abscissa ser a frequência de ocorrência de dados. Se fosse utilizado as variáveis RPM ou taxa, os gráficos seriam plotados sobrepostos. Dependendo do número de corridas executadas no dia em avaliação, o entendimento ficaria dificultado. Imagina-se que o arquivo escolhido para acessar o histórico das corridas de viscosidade contenha dez testes. O programa plotará a viscosidade (ou tensão ou ângulo) aferida na primeira taxa da primeira corrida em par com o número “1”, a segunda viscosidade na segunda taxa da primeira corrida com o número “2”, a terceira com o número “3” e sucessivamente. Ao chegar à última viscosidade, a mesma será plotada com o número 6 na abscissa, esse é a última viscosidade da primeira corrida. A seguir, seria plotada a primeira viscosidade aferida na primeira taxa do segundo teste com o número “7”, a segunda viscosidade da segunda taxa da segunda corrida com o número “8” e assim sucessivamente. Desta forma, ao final o usuário teria 60 pontos em ciclos de seis em seis. Como cada ciclo de seis pontos possui uma hora específica do dia, observando o gráfico junto com o “Histórico dos testes realizados” é possível discernir com facilidade a tendência reológica do dia.

Na Figura 106 é demonstrado a IHM do *software* para visualização do histórico da viscosimetria e na Figura 107 um resultado típico durante um dia de testes.

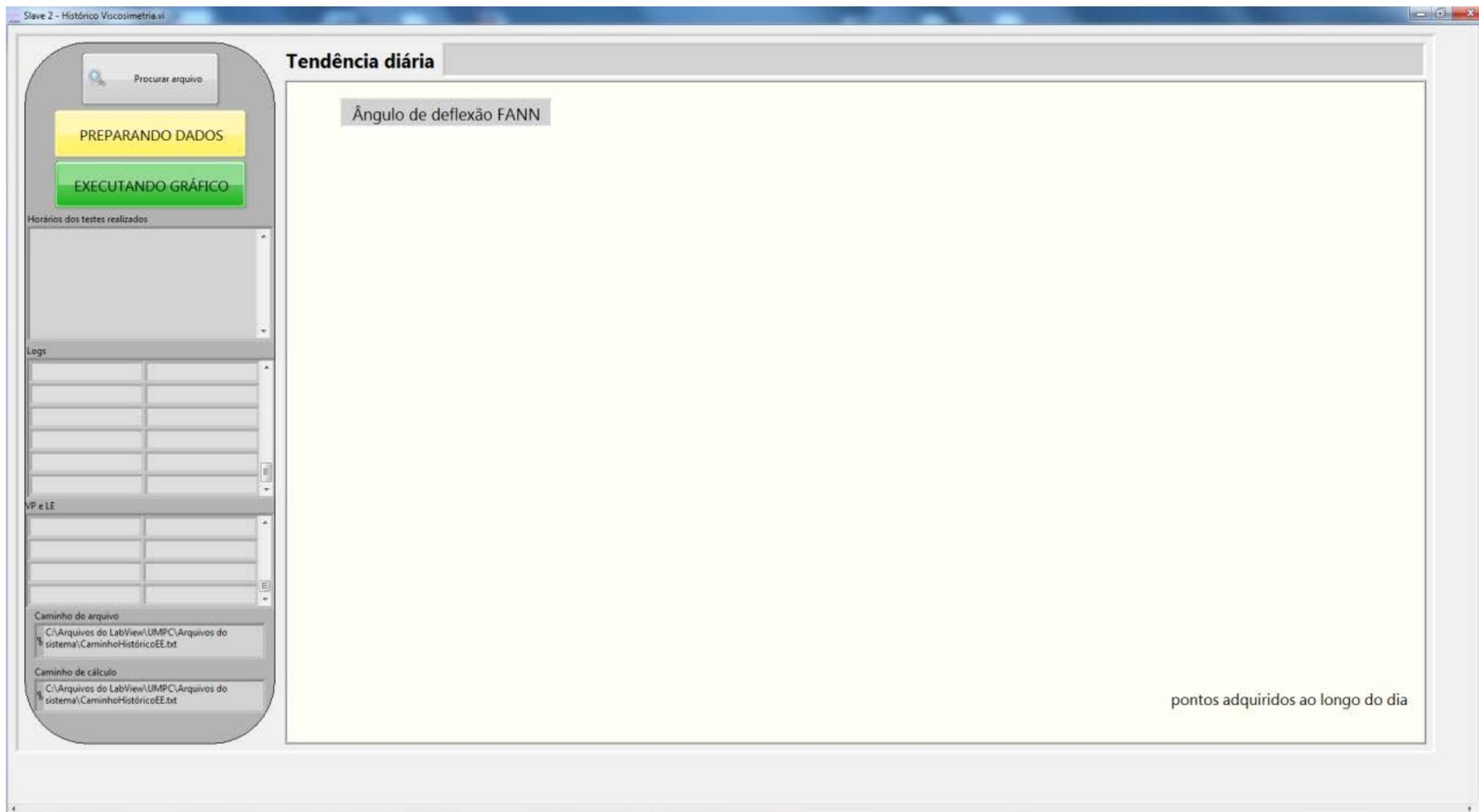


Figura 106. IHM do *software* desenvolvido para acessar o histórico de viscosidade aparente.

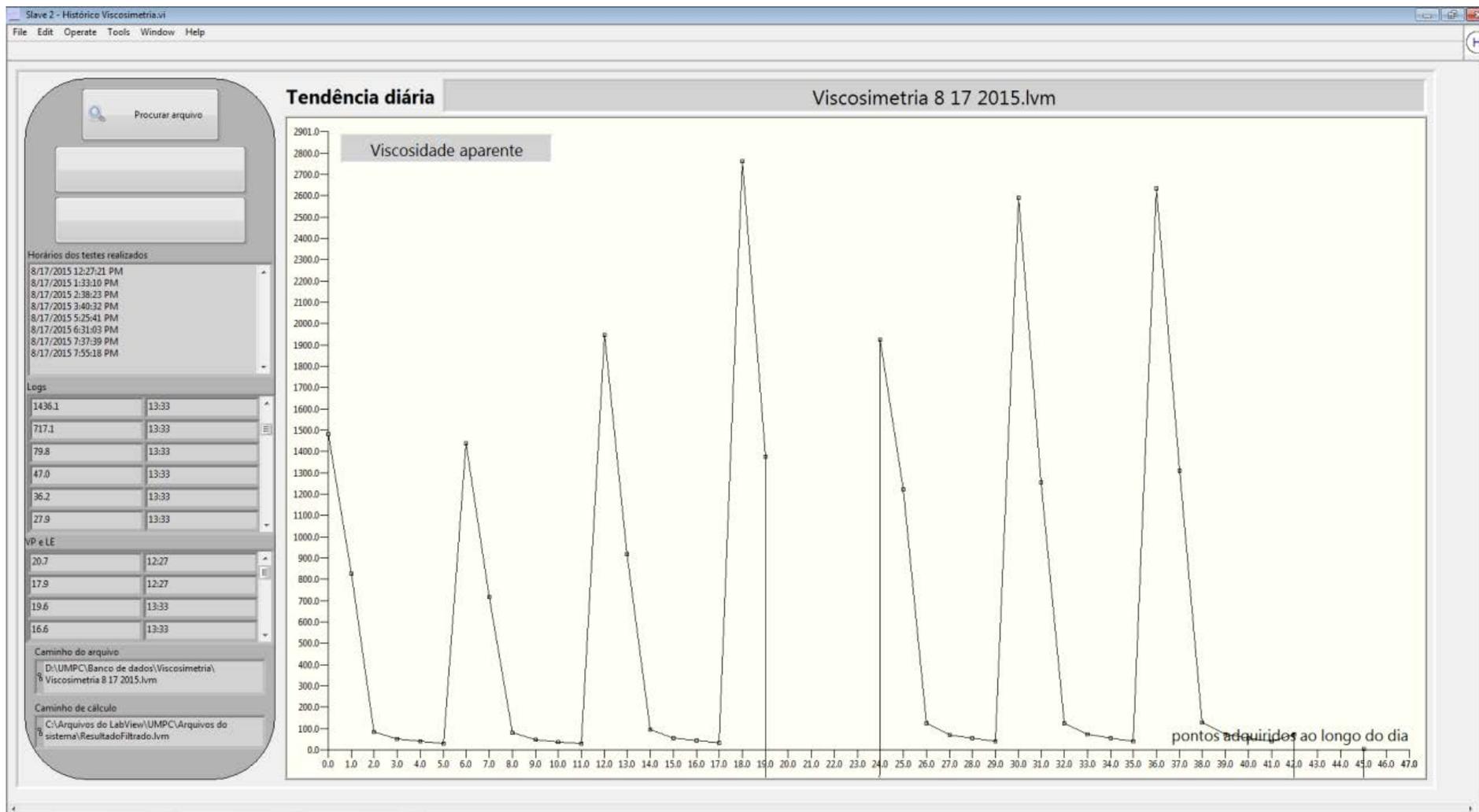


Figura 107. Histórico de viscosimetria obtido a partir dos testes executados durante o dia 17/8/2015 com fluido de perfuração de base aquosa.

À direita é possível observar que foram feitos oito testes em horários distintos, em sua maioria com um intervalo de uma hora. Abaixo estão todos os pontos discretos no gráfico que podem ser acessados usando a barra de rolagem, assim como os VP e LE calculados. Cada ponto discreto tem consigo o horário, para que seja fácil identificar no gráfico os horários dos testes. O fluido em questão recebeu correção de viscosidade, o que pôde ser observado. Ao longo do teste, o fluido ficou cada vez mais viscoso. Apesar da viscosidade aparente está plotada contra “frequência”, é possível discernir que o fluido é pseudoplástico. Como dito anteriormente, é claro também diferenciar os testes reológicos pelas formas geométricas características que cada conjunto de seis pontos fazem. Percebem-se no meio do gráfico e ao final, pontos com tendência negativa, na verdade foram testes pré-agendados de limpeza, feitos respectivamente durante a retro lavagem e o colchão lavador, ao final do dia.

Exatamente da mesma forma funciona o histórico da estabilidade elétrica. Mas como o teste gera apenas um dado, na estabilidade elétrica cada ponto é um teste propriamente dito. Na Figura 108 é demonstrada a IHM do *software* com os resultados aferidos durante operação com um fluido a base oleosa. Nesta figura é possível observar que ao todo, durante o dia de teste, foram feitos 29 ensaios de estabilidade, distante cada um 30 minutos aproximadamente. Observa-se que a estabilidade elétrica do fluido em questão sofreu um aumento durante as primeiras horas de operação e depois se manteve estável entre 800 e 850, com alguns pontos em exceção. O aumento inicial é natural decorrente do cisalhamento constante que contribuiu para a melhoria da homogeneidade da emulsão, uma vez que o fluido de perfuração oleoso estava em estoque, estático, há alguns meses.

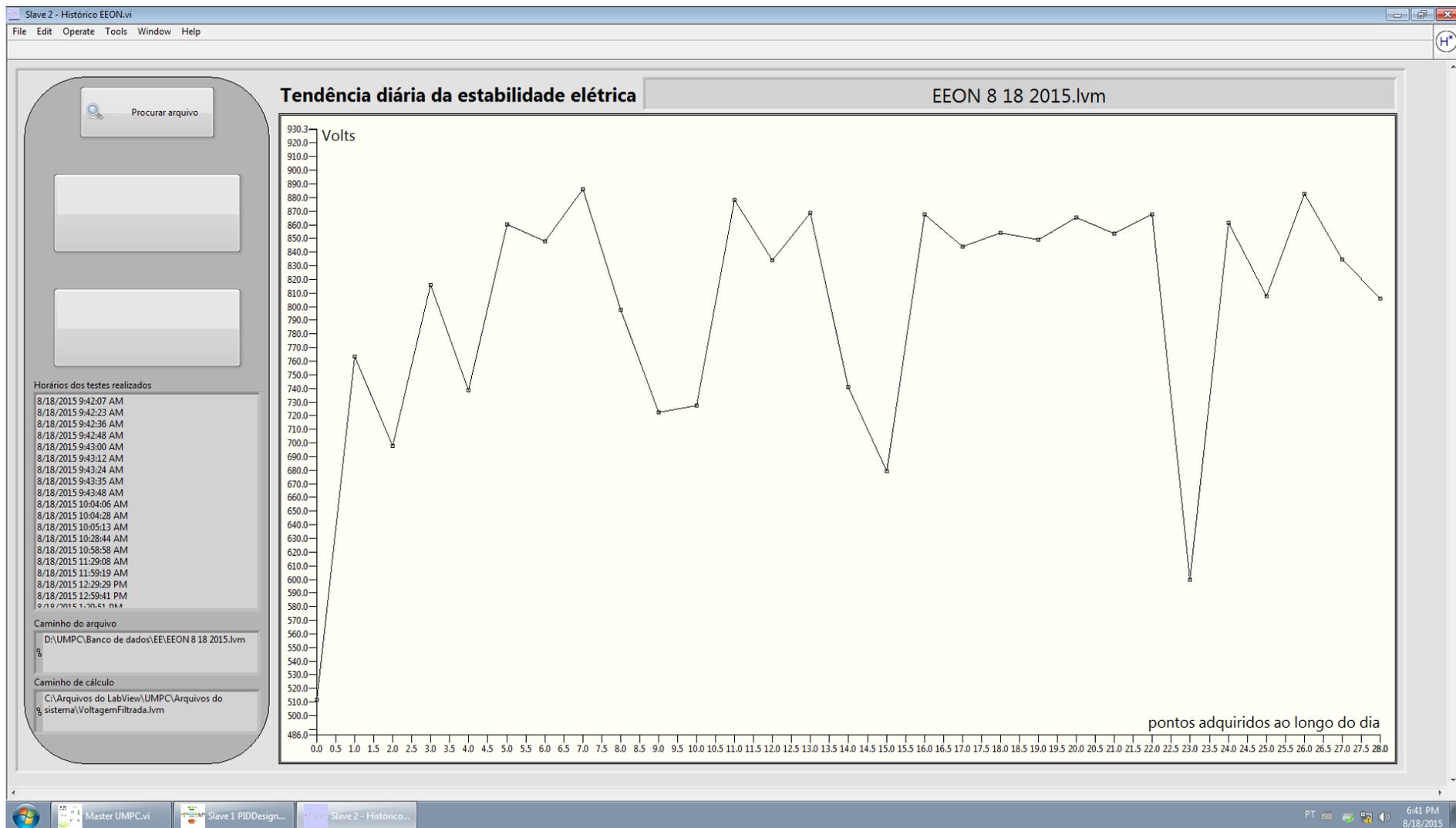


Figura 108. Histórico de estabilidade elétrica obtido a partir dos testes executados no dia 18/8/2015 com fluido de perfuração de base oleosa.

4.3.9. Resultado da interface criada para conexão de clientes remotos

A primeira menção feita à conectividade remota foi na Figura 62 e depois na Figura 63. Nesta seção serão dados maiores detalhes sobre o algoritmo que torna capaz tal capacidade.

Foram criadas duas maneiras de conectividade remota, uma utilizando um aplicativo compatível com sistema operacional *Android 4+*, fornecido pela própria *National Instruments*, chamado *Data Dashboard*, disponibilizado na loja da Google. Neste aplicativo, foram criadas duas interfaces personalizadas. Uma das interfaces possui somente privilégios de usuário, assim somente é possível visualizar as entradas remotas. A outra possui privilégios de administrador, contendo algumas funções de controle. A conexão entre o aplicativo e o computador *host* se dá por uma ferramenta nativa do *LabView®* chamada *Shared Variable Engine (SVE)*, que funciona a nível de ambiente operacional.

A outra forma utilizada por este trabalho para visualizar remotamente os dados da UMPC foi por meio da ferramenta *remote panel*, também intrínseco ao *LabView®*. Neste serviço o *LabView* cria, a partir da IHM, uma foto cópia da tela e a posta em forma de HTML, num endereço específico de IP, em uma determinada porta (sob protocolo TCP). Essa foto cópia se atualiza em tempos pré-determinados, este trabalho utilizou um intervalo de cinco segundos.

Na Tabela 7 são demonstradas as ferramentas utilizadas para criar a conectividade remota à IHM da UMPC, bem como suas capacidades, vantagens e desvantagens.

Tabela 7. Informações sobre as capacidades de cada ferramenta para conexão remota de clientes à IHM.

Ferramenta	Aplicativo?	<i>Android / iOS / Outros</i>	Intranet / Internet	Supervisão / Controle
<i>Data Dashboard</i>	SVE	Sim	✓ / ⊗	✓ / ✓
	WS ⁵⁷		✓ / ✓ / ⊗	✓ / ✓
Remote Panel	<i>Embedded</i>	Não	✓ / ✓	✓ / ✓
	<i>Monitor</i>		✓ / ✓ / ✓	✓ / ✓

Na Figura 109 são apresentadas duas telas da IHM criada no aplicativo *Data Dashboard*, para a versão usuário.

⁵⁷ *Web Service* – Outro serviço disponibilizado no *Data Dashboard*, além da SVE (*Shared Variable Engine*).

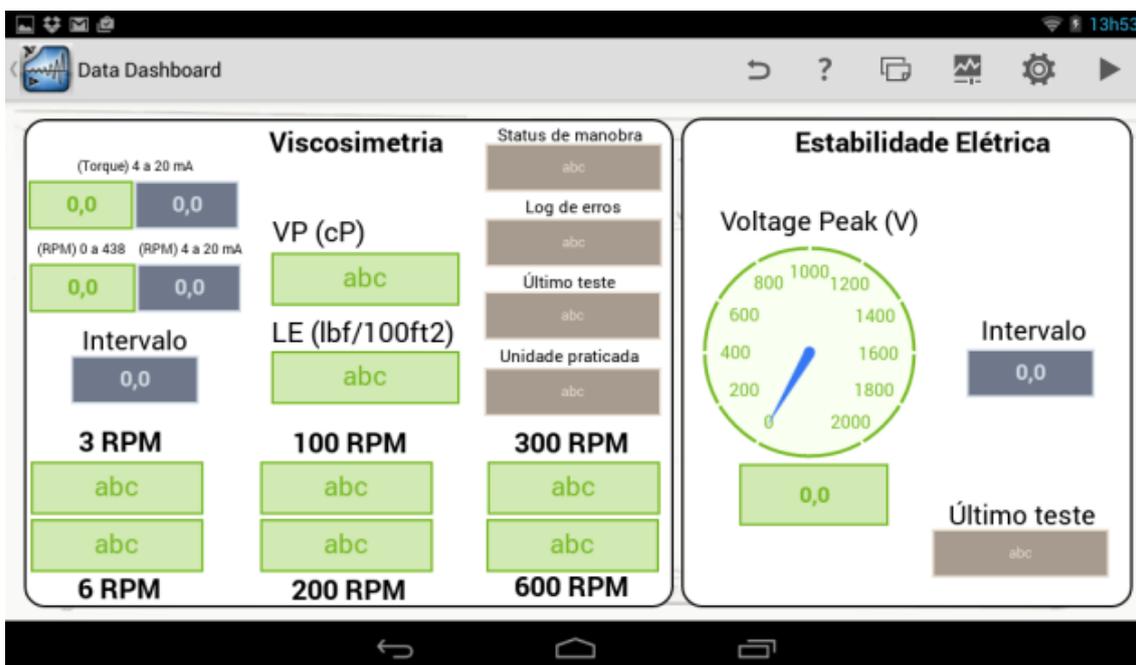


Figura 109. Imagem da tela inicial da IHM criada para uso do usuário no *Data Dashboard*, rodando em ambiente *Android 4.2.2* em Tablet, acima. Abaixo uma tela subsequente ao deslizar para o lado no aplicativo.

Já na Figura 110 são apresentadas as mesmas duas telas da figura anterior, porém na versão administrador.

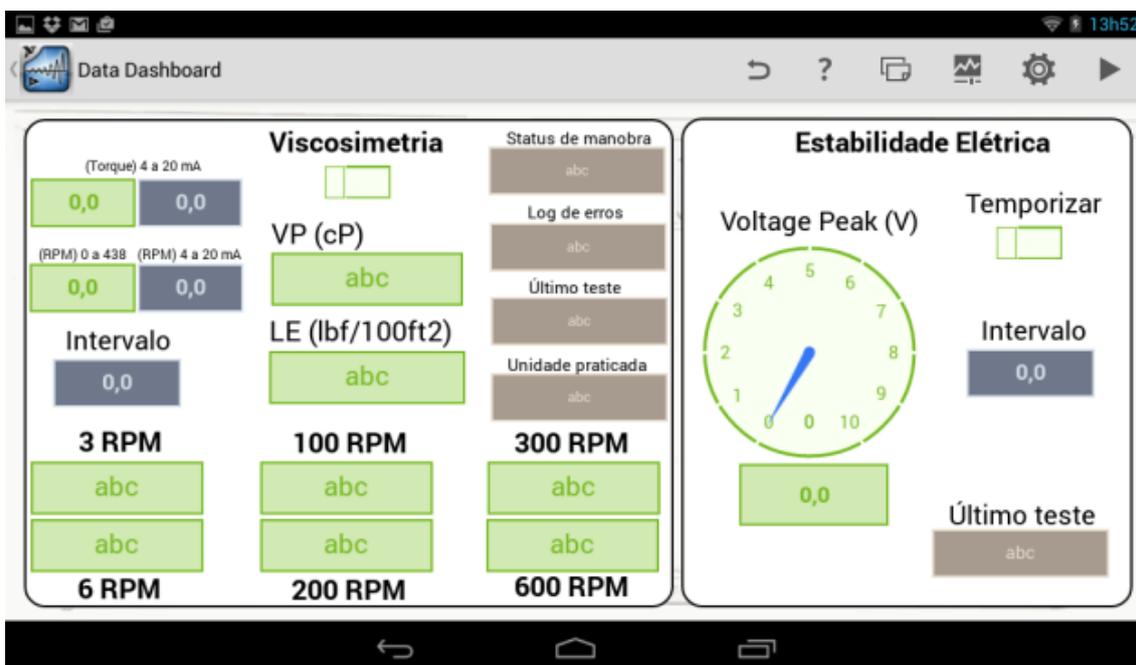
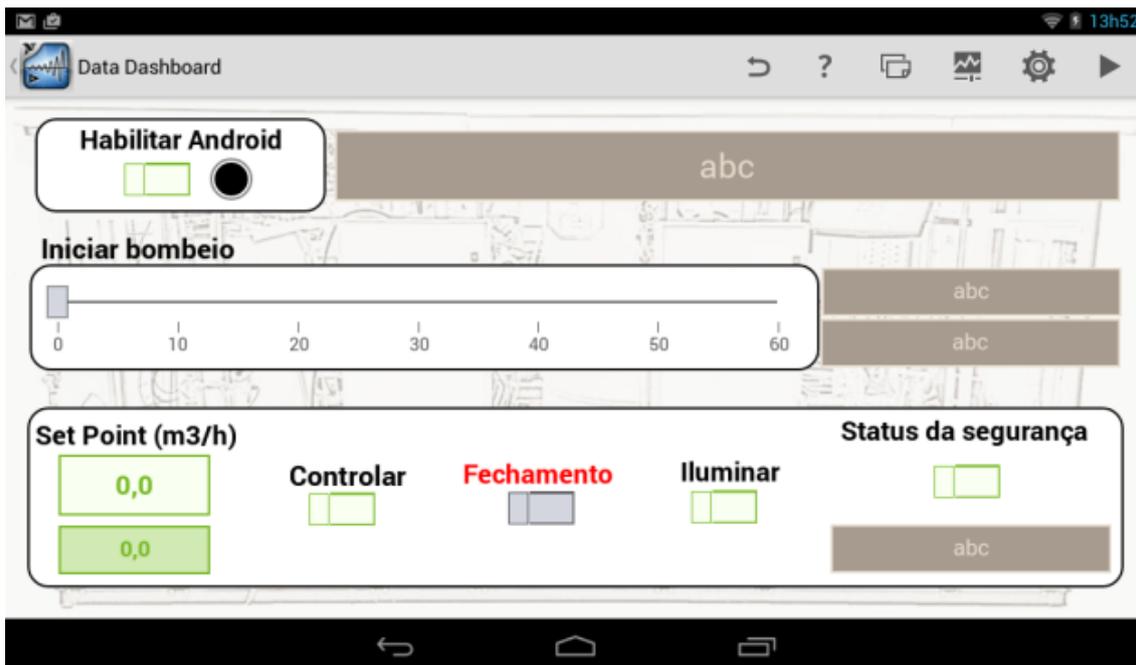


Figura 110. Imagem da tela inicial da IHM criada para uso do administrador no *Data Dashboard*, rodando em ambiente *Android 4.2.2* em Tablet, acima. Abaixo uma tela subsequente ao deslizar para o lado no aplicativo.

Concernente ao método de conexão via *remote panel*, é demonstrada na Figura 111 a foto do usuário conectado ao computador *host* utilizando o *Browser* de um PC (acima) e o *Browser* de um *smartphone* (abaixo).

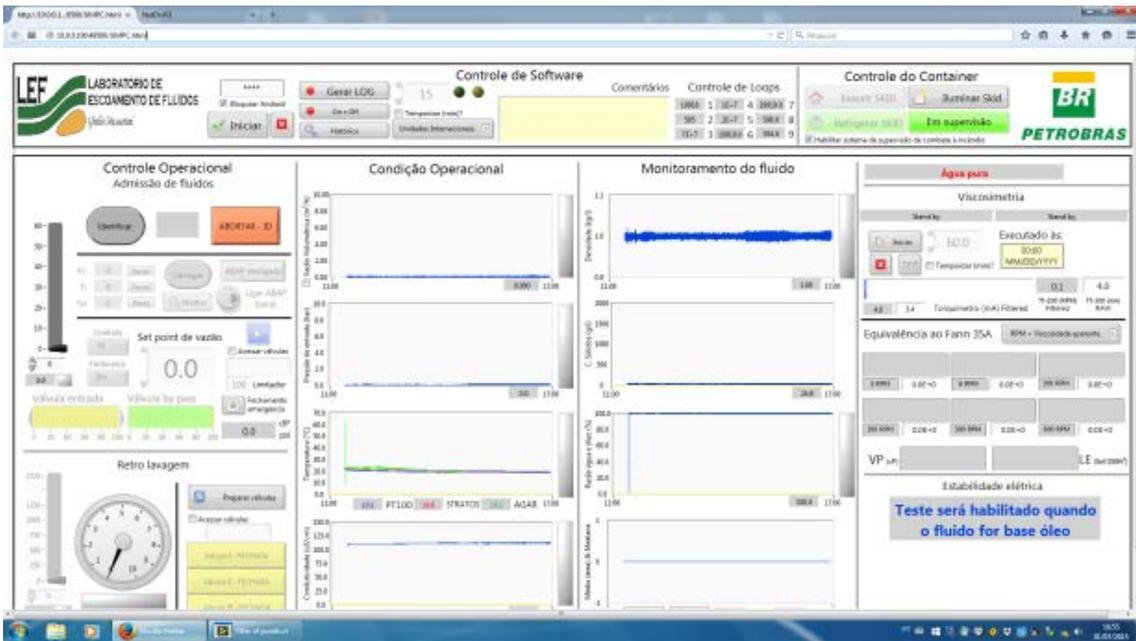


Figura 111. Usuário conectado ao computador *host* via *Browser* de uma PC (acima) e via *Browser* de um *smartphone* (abaixo).

Na Figura 112 pode ser observado o fluxograma com maiores detalhes a respeito da interface de conexão remota a clientes.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÃO

A partir dos trabalhos reconhecidos por meio da revisão bibliográfica e tendo como base o projeto de Magalhães *et al.* (2014), este trabalho propôs e desenvolveu um sistema capaz de aferir remotamente e em tempo real algumas das propriedades físico-químicas mais importantes para fluidos de perfuração.

O desenvolvimento de tal sistema permitiu as seguintes conclusões:

- O sensor de tamanhos e contagem de sólidos apresentou funcionamento adequado durante todos os testes. Foi feita a validação de suas medidas comparando as leituras deste instrumento com leituras efetuadas em equipamento de bancada. Ambas apresentaram semelhança de tamanhos de partículas para a caracterização de barita em suspensão, apesar das técnicas utilizadas por cada um serem completamente diferentes. Para leituras desta natureza em fluidos de perfuração, somente o FBRM se apresentou adequado, neste sentido, não há comparação entre dados em tempo real e dados de bancada para tais fluidos. Em se tratando de fluidos a base de óleo, o FBRM quantifica o total de partículas como a soma das gotículas de água dispersa na emulsão e dos sólidos em suspensão;
- O sensor de teor de água em óleo foi recalibrado com os fluidos do processo estudado, a saber: salmoura e parafina. A partir desta calibração em campo, o sensor apresentou funcionamento adequado e seus dados foram confrontados com dados de bancada medidos no *Kit* Retorta, da FANN. Os resultados de processo e de bancada demonstraram semelhança, assim como ficou provado que a densidade não influencia na precisão do equipamento, o que é fundamentalmente desejável, uma vez ela varia frequentemente durante o processo de perfuração. No entanto, a salinidade pode ser tornar um limitante para a tecnologia. Como a fase que contém sal é a fase dispersa, os fluidos de perfuração a base de óleo permanecem adequados para serem usados no instrumento;
- Concernente ao sistema, foi possível readequar o *loop* de Magalhães *et al.* (2014) em um sistema móvel de aferição remota das propriedades físico-químicas de fluidos de perfuração;
- Quanto ao sistema de informática desenvolvido para gerenciamento do módulo móvel, entende-se que:
 - Foi possível se controlar de forma local ou remota todos os componentes internos da UMPC;

- Foi possível controlar a vazão volumétrica da UMPC de forma automática utilizando uma mistura de estratégias de controle clássico com técnicas avançadas. Dentre todas as funcionalidades presente no algoritmo de controle, destacam-se a capacidade que o sistema tem de sintonizar automaticamente os controladores e aperfeiçoá-los utilizando ganho adaptativo baseado em regras heurísticas;
- O sistema montado é capaz de receber, tratar, organizar e comandar todos os dados dos sensores e atuadores de forma inteligível, utilizando uma IHM com recursos gráficos intuitivos;
- O algoritmo personalizado para o controle do viscosímetro permitiu que o equipamento fosse controlado remotamente, executando testes automaticamente, fornecendo em tempo real o perfil reológico do fluido;
- O algoritmo personalizado para o controle do sensor de estabilidade elétrica tornou possível que medidas desta natureza sejam feitas em tempo real, continuamente. O algoritmo montado possui qualidade para se tornar uma opção no mercado mundial, já que atualmente só existem disponíveis tecnologias para medição em bancada;
- O sistema supervisor foi capaz de manter em segurança o ambiente do container, climatizado e observado 24h por dia de forma totalmente remota e automática;
- Frente a problemas operacionais como entupimento por sólidos ou limpeza nos sensores, o algoritmo de retro lavagem foi capaz de eliminá-los a partir da manipulação automática e remota das válvulas e bomba presentes no interior do container.

CAPÍTULO VI

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento ou continuação do desenvolvimento de tecnologias para aferir propriedades que não foram abordadas por este trabalho, tais como: concentração de sólidos totais suspensos, teor de filtrado, alcalinidade, salinidade, teor de areia, pH, força gel, excesso de hidróxido de cálcio, determinação de H₂S, determinação de cálcio e magnésio, determinação de potássio, avaliação da estabilidade de emulsões utilizando o FBRM em sistemas isentos de sólidos dentre outras menos importantes.
- Executar testes em campo para:
 - Validar a montagem e verificar a resiliência do sistema às intempéries de um campo de perfuração;
 - Verificar a compatibilidade das medidas em tempo real com aquelas reportadas pelo pessoal de sonda nos instrumentos de bancada;
 - Verificar erros ocultos nos *softwares* (*bugs*);

CAPÍTULO VII

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aadnoy B. S., Bernt S. A., 1996. Modern Well Design. Second Edition. Taylor & Francis Group.

Alegria F. C., Martinho E., Almeida F., 2009. Measuring soil contamination with times domain induced polarization method using LabVIEW. *Measurement*, 42, páginas 1082 – 1091.

Anjos J. M. S., Coracini G. K., Villani E., 2013. A proposal and verification of a software architecture based on LabVIEW for a multifunctional robotic end-effector. *Advances in Engineering Software*, 55, 32 – 44.

Apaleke A. S, Al-Majed A., Hossain M. E., 2012. Drilling fluid: state of the art and future trend. North Africa technical conference and exhibition, Cairo, Egypt. SPE 149555.

Auflem, I. H., 2002. Influence of Asphaltene Aggregation and Pressure on Crude Oil Emulsion Stability, Department of Chemical Engineering, Norwegian University of Science and Technology – Trondheim.

Azar J. J., Samuel G. B., 2007. Drilling Engineering. PennWell Corporation.

Billon, H.H., 1996. Shear Rate Determination in a Concentric Cylinder Viscometer. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, PO Box 4331, Melbourne Victoria 3001. Publication track AR-009-701, DSTO-GD-0093.

Bourgoyne Jr., A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M. E., Young Jr., F. S., 1991. Applied Drilling Engineering, Second Printing Society of Petroleum Engineers.

Broussard, S., Gonzalez, P., Murphy, R., Marvel, C., 2010. Making Real-Time Fluid Decision with Real-Time Fluid Data at the Rig Site. Society of Petroleum Engineering (SPE). SPE Drilling Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE. SPE 137999.

Caenn, R., Chillingar G.V., 1996. Drilling fluids: State of the Art. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Issue 14, pages 221–230.

Carlsen L. A., Nygaard G., 2012. Utilizing Instrumented Stand Pipe for Monitoring Drilling Fluid Dynamics for Improving Automated Drilling Operations. Proceedings of the 2012 IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production, Norwegian. University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

Consulta online à *Chesapeake Energy* em 20/07/2015:
<https://www.youtube.com/watch?v=fBQCQ6HL2Yw>

Consulta online à *Horizontal Technologies* em 20/07/2015:
<https://www.youtube.com/watch?v=c18BBoCV7gU>

Cohen G. H., Coon G. A., 1953. Theoretical Considerations of Retarded Control. Transactions of ASME, pages 827 – 834.

Craft, Holden and Graves, 1962. Well Design: Drilling and Production. Prentice – Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

Dias F. T. G., Souza R. R., Lucas E. F., 2015. Influence of modified starches composition on their performance as fluid loss additives in invert-emulsion drilling fluids. Fuel, 140, páginas 711 – 716.

Gandelman R. A., Martins A. L., Teixeira G. T., Aragão A. F. L., Neto R. M. C., Lins D. G. M., Lenz C., Guilardi P., Mari A., 2013. Real Time Drilling Data Diagnosis Implemented In Deepwater Wells - A Reality, OTC-24275-MS/OTC-24275-MS, Rio de Janeiro, October 29th to 31th, Brazil.

Growcock F. B., Ellis C. F., Schmidt D. D., 1995. Electrical Stability, Emulsion Stability, and Wettability of Inverted Oil-Based Muds. SPE Annual Technical Conference Exhibition in New Orleans. SPE 20435.

Jones D. S. J., Pujadó P. R., 2008. Handbook of Petroleum Processing. Publicado pela editora *Springer* (www.springer.com). Reimpresso em 2008, ISBN 13 978-1-4020-2819-9.

Hong Jui-Hong., 2007. Hybrid MATLAB and LabVIEW with neural network to implement a SCADA system of an AC servo motor. Advances in Engineering Software, 39, páginas 149 – 155.

Lin B., Xiaofeng L., Xingxi, H., 2011. Measurement system for Wind turbines noises assessment based on LabVIEW. Measurement, 44, páginas 445 – 453.

Kis P., Kuczmann M., Fuzi J., Iványi A., 2004. Hysteresis measurement in LabView. Physica B, 343, páginas 357-363.

Machado, J. C. V., (2002), Reologia e Escoamento de Fluidos, Ênfase na Indústria do Petróleo, editora Interciência.

Magalhães S. C., Scheid C. M., Calçada L. A., Folsta M., Martins A. L., SÁ C. H. M., 2014. Development of on-line sensor for automated measurement of drilling fluid properties. IADC/SPE-167978-MS.

Manual FANN 35A, 208878, revisão O.

Manual FANN *Pressurized Mud Balance*, 100063065, revisão J.

Manual FANN 23D, 102149576, revisão B

Manual FANN *Retort Kit*, 210445, revisão E.

Miller, A., Minton, R. C., Colquhoun, R., Ketchion, M., 2011. The Continuous Measurement and Recording of Drilling Fluid Density and Viscosity. SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, Netherlands. SPE/IADC 140324.

Oort E. V., Brady K., 2011. Case-Based Reasoning System Predicts Twist-off in Louisiana Well Based on Mideast Analog. Special Focus – Drilling Technology.

Rondon J., Barrufet M. A., Falcone G., 2012. A novel downhole sensor to determine fluid viscosity. Flow Measurement and Instrumentation 23 (2012) 9-18.

Saasen A., Omland T. H., StatoilHydro ASA, Ekrene S., Breviere J., Villard E., Geoservices SA, Kaageson-Loe, Tehrani A., Cameron J., Freeman M., Growcock F., Patrick A., Stock T., M.I Swaco, Jørgensen T., Reinholt F., Scholz N., AnaTec AS, Amundsen H. E. F., Steele A., EPX AS, Meeten G., 2009. Automatic Measurement of Drilling Fluid and Drill Cuttings Properties. IADC/SPE Drilling Conference.

Salager, J. L., 1999. Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para Obterner las Propiedades Deseadas. Estado del Arte Parte B. Propiedades de las Emulsiones y su Medición. In: Cuaderno FIRP S747-B, Mérida, Venezuela.

Shaughnessy, J., Daugherty, W., Graff, R., Durkee, T., 2007. More Ultra-Deepwater Drilling Problems. SPE/IADC Drilling Conference, ID: 105792-MS. ISBN 978-1-55563-158-1.

Sundaresan K. R., Krishnaswamy P. R., 1977. Estimation of Time Delay, Time Constant Parameters in Time, Frequency and Laplace Domains. Can. J. Chem. Eng., 56, páginas 257 – 262.

Thomas, J. E., 2001. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Editora Interciência, 2º Edição, Rio de Janeiro.

Tomic J., Kusljevic M., Vidakovic M., Rajs V., 2014. Smart SCADA system for urban air pollution monitoring. *Measurement*, 58, páginas 138 – 146.

Waldmann, A. T. A. “Mecanismos que governam a efetividade de agentes obturantes no controle da invasão de fluidos de perfuração na rocha reservatório de petróleo”.
Dissertação (Mestrado) – Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.

Wang W., Li C., Tollner E. W., Rains G. C., 2012. Development of software for spectral imaging data acquisition using LabVIEW. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84, páginas 68-75.

Ziegler J. B., Nichols N. B., 1942. Optimum Settings for Automatic Controllers. *ASME Transactions*, volume 64, páginas 759 – 768.