

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

DISSERTAÇÃO

**CONTROLE FUZZY MULTIVARIÁVEL PARA CORREÇÃO DE PROPRIEDADES
FÍSICO-QUÍMICAS DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO**

RAMON ARAUJO MARTINS

2024



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

**CONTROLE FUZZY MULTIVARIÁVEL PARA CORREÇÃO DE PROPRIEDADES
FÍSICO-QUÍMICAS DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO**

RAMON ARAUJO MARTINS

Sob a orientação do Professor:
Dr. Luiz Augusto da Cruz Meleiro

e Coorientação do Professor:
Dr. Luís Américo Calçada

Dissertação submetida como requisito parcial
para a obtenção do grau de **Mestre em
Engenharia Química** no Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Química, Área de
Concentração em Tecnologia Química.

Seropédica-RJ
2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M379c Martins, Ramon Araujo, 2000-
Controle Fuzzy Multivariável para Correção de
Propriedades Físico-Químicas de Fluidos de Perfuração /
Ramon Araujo Martins. - Seropédica, 2024.
102 f.: il.

Orientador: Luiz Augusto da Cruz Meleiro.
Coorientador: Luís Américo Calçada.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química, 2024.

1. Controle Fuzzy. 2. Fluidos de Perfuração. 3.
Condutividade Elétrica. 4. Viscosidade Aparente. 5.
Densidade. I. Meleiro, Luiz Augusto da Cruz, 1965-,
orient. II. Calçada, Luís Américo, 1966-, coorient. III
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV.
Título.

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

RAMON ARAUJO MARTINS

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Química** no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Área de Concentração em Tecnologia Química.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 05/06/2024

Prof. Dr. Luiz Augusto da Cruz Meleiro. DEQ/UFRRJ
Orientador

Prof. Dr. Fábio Bentes Freire. DEQ/UFSCar

Prof. Dr. Maurício Bezerra de Souza Jr. DEQ/EQ/UFRJ



ATA DE DEFESA DE TESE Nº 132/2024 - PPGEQ (12.28.01.00.00.00.42)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 07/06/2024 20:18)

LUIZ AUGUSTO DA CRUZ MELEIRO

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DEQ (12.28.01.00.00.00.45)

Matricula: ###126#9

(Assinado digitalmente em 07/06/2024 14:36)

RAMON ARAUJO MARTINS

DISCENTE

Matricula: 2022#####5

(Assinado digitalmente em 07/06/2024 14:18)

MAURÍCIO BEZERRA DE SOUZA JÚNIOR

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.304-##

(Assinado digitalmente em 07/06/2024 10:16)

FÁBIO BENTES FREIRE

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.878-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: 132, ano: 2024, tipo: **ATA DE DEFESA DE TESE**, data de emissão: 07/06/2024 e o código de verificação: 2210b51876

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por tudo o que me foi concedido, pela força e discernimento para enfrentar os obstáculos, pela saúde e pela oportunidade de chegar até aqui.

A minha família e aos meus familiares, agradeço pelo apoio e incentivo ao longo desta caminhada. Em especial à minha mãe, Dora, por toda a compreensão, por sempre estar lutando ao meu lado, por ser a minha base, a você agradeço por acreditar em todos os meus sonhos.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, aos professores, aos técnicos e aos servidores.

Ao meu orientador Professor Luiz Augusto da Cruz Meleiro, agradeço pela tutela acadêmica durante toda a elaboração deste trabalho e por todo ensinamento, conhecimento e tempo compartilhado. Ao meu coorientador, Professor Luís Américo Calçada, expresso a minha sincera gratidão por toda a colaboração e por ter me concedido a oportunidade e realizar esta pesquisa em um laboratório com uma equipe tão qualificada.

A aluna de iniciação científica Larissa Salermo, agradeço por toda parceria e dedicação no planejamento e execução dos experimentos dessa dissertação. A você, meu muito obrigado pela parceria e ao aprendizado mútuo ao longo deste período.

A equipe técnica do Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF) agradeço pelos ensinamentos e por nunca pouparem esforços para me auxiliarem, pela amizade e pelos momentos de descontração. Em especial aos pesquisadores Thalles e Moacyr.

Agradeço ao CENPES/Petrobras pelos recursos aportados no Projeto de Pesquisa SAP No. 4600675541, pois sem este auxílio não seria possível a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivos Gerais.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
1.2 Organização da Dissertação	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Perfuração de Poços de Petróleo	18
2.2 Sistemas de Operação	18
2.2.1 Sistema de Circulação	20
2.3 Fluidos de Perfuração	22
2.3.1 Classificação dos Fluidos de Perfuração	23
2.3.2 Propriedades dos Fluidos de Perfuração.....	24
2.3.3. Contaminação do Fluido de Perfuração	28
2.4. Monitoramento e Controle dos Fluidos de Perfuração	28
2.4.1 Atuais Técnicas de Medição	29
2.5 Fundamentos da Lógica <i>Fuzzy</i>	31
2.5.1 Conjuntos <i>Fuzzy</i>	31
2.5.2 Controladores Baseados em Lógica <i>Fuzzy</i>	35
2.6 Estado da Arte da Aplicação da Lógica <i>Fuzzy</i>	38
2.6.1 Controladores <i>Fuzzy</i> na Indústria de Exploração e Produção de Petróleo	38
2.6.2 Controladores <i>Fuzzy</i> Aplicados a Fluidos de Perfuração	39
2.6.3 Patentes e Inovação	41
3. MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 Unidade Experimental	42
3.1.1 Instrumentação e Atuadores.....	44
3.1.2 Sistema Elétrico	49
3.2 Sistema de Controle e Aquisição de Dados	50
3.2.1 Sistema Supervisório	50
3.3 Materiais Utilizados.....	51
3.3.1 Caracterização dos Materiais	51
3.4 Planejamento Experimental	53
3.4.1 Testes na Unidade Experimental.....	54
4. PROJETO DO CONTROLADOR MULTIVARIÁVEL	56

4.1 Base de Regras	56
4.1.1. Desenvolvimento de Regras Linguísticas para o Controlador Fuzzy Multivariável	56
4.2 Construção das Funções de Pertinência	59
4.2.1 Funções de Pertinência de Entrada	60
4.2.2 Funções de Pertinência de Saída	62
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1 Caracterização dos Materiais	65
5.2 Análise da Composição do Fluido e Base de Regras	65
5.3 Análise Reológica dos Fluidos Formulados	67
5.4 Desempenho do Controlador <i>Fuzzy</i>	69
5.4.1 Análise do Controle <i>Fuzzy</i> Monovariável da Condutividade Elétrica	69
5.4.2 Desempenho do Controlador Multivariável: Testes do Tipo Servo	74
5.4.3 Desempenho do Controlador Fuzzy Multivariável: Testes do Tipo Regulador	86
5.5 Considerações Finais	93
6. CONCLUSÕES	94
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

RESUMO

MARTINS, Ramon Araujo; **CONTROLE FUZZY MULTIVARIÁVEL PARA CORREÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO**. 2024. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

Nas atividades petrolíferas, durante a etapa de perfuração, torna-se essencial a utilização dos fluidos de perfuração para o sucesso de toda a operação. Esses fluidos de perfuração são constituídos pela adição de produtos químicos a um fluido base, nos quais podem ser classificados de acordo com o tipo de fluido base empregado em sua formulação, podendo ser classificados como fluidos à base água, óleo ou gás. Inúmeras são as propriedades exercidas por esses fluidos, contudo destacam-se as que estão atreladas às propriedades reológicas e à manutenção do gradiente de pressão hidrostática no interior do poço. Tendo em vista que os fluidos de perfuração estão sujeitos a interações do tipo fluido-rocha, a contaminação por sais provenientes da formação geológica pode se tornar um problema durante a etapa de exploração do poço, podendo impactar as características reológicas e a densidade do fluido. O aumento da presença de sais em fluidos de perfuração à base água é indicado pelo aumento da condutividade elétrica do fluido. No entanto, o monitoramento e o controle dessa propriedade pouco foram explorados até o momento. A proposta desse trabalho foi desenvolver um sistema de controle fuzzy multivariável para a correção da condutividade elétrica, densidade e viscosidade aparente de fluidos de perfuração à base de água. A avaliação da técnica de controle desenvolvida foi validada por meio de uma unidade experimental de preparo e monitoramento de fluidos de perfuração equipada com tanques de mistura e armazenamento de água, bomba helicoidal para recirculação do fluido, bomba dosadora de água e alimentadores de sólidos. A instrumentação da unidade inclui sensores de medição de condutividade, temperatura, nível, vazão, densidade e viscosidade aparente. O sistema de aquisição de dados da unidade experimental é constituído de um CLP da *National Instruments* com o uso do software supervisor *LabVIEW®*. A estratégia de controle *fuzzy* foi desenvolvida no software *LabVIEW®*. Para avaliação do desempenho do controlador, foram propostos problemas de controle do tipo servo e regulatório, envolvendo as propriedades condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade. Também foram realizados testes experimentais para avaliar a interação entre a composição do fluido e as variáveis controladas. Nos testes experimentais de bancada observou-se que as propriedades avaliadas possuem interação estatisticamente significativas entre si, mas que o aumento da concentração de cloreto de sódio não altera a pseudoplasticidade dos fluidos. Em relação ao desempenho do controlador *fuzzy*, os resultados demonstraram a eficácia da estratégia proposta na manutenção da condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade dos fluidos, evidenciando assim seu potencial uso como ferramenta para o controle multivariável das propriedades físicas em fluidos de perfuração. Também foi possível identificar que a condutividade elétrica foi a variável de maior sensibilidade em relação a densidade e a viscosidade aparente.

Palavras-chave: Controle *fuzzy*, fluidos de perfuração, condutividade elétrica, viscosidade aparente, densidade.

ABSTRACT

MARTINS, Ramon Araujo; **MULTIVARIABLE FUZZY CONTROL FOR CORRECTION OF PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF DRILLING FLUIDS**. 2024. 103p. Thesis (Master of Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

In oil activities, during the drilling stage, the use of drilling fluids becomes essential for the success of the entire operation. These drilling fluids are constituted by adding chemical products to a base fluid, which can be classified according to the type of base fluid used in their formulation, categorized as water-based, oil-based, or gas-based fluids. These fluids exert numerous properties, but those related to rheological properties and maintaining the hydrostatic pressure gradient within the well are particularly noteworthy. Considering that drilling fluids are subject to fluid-rock interactions, contamination by salts from the geological formation can become a problem during the well exploration stage, potentially impacting the rheological characteristics and density of the fluid. An increase in the electrical conductivity of the fluid indicates the increase in salt presence in water-based drilling fluids. However, the monitoring and control of this property have yet to be explored so far. This work proposed developing a multivariable fuzzy control system for correcting water-based drilling fluids' electrical conductivity, density, and apparent viscosity. The developed control technique was evaluated through an experimental unit for the preparation and monitoring of drilling fluids equipped with mixing and water storage tanks, a helical pump for fluid recirculation, a water dosing pump, and solid feeders. The unit's instrumentation includes sensors for measuring conductivity, temperature, level, flow rate, density, and apparent viscosity. The data acquisition system of the experimental unit consists of a National Instruments PLC using LabVIEW® supervisory software. The fuzzy control strategy was developed using the LabVIEW® software. For the performance evaluation of the controller, servo and regulatory control problems involving the properties of electrical conductivity, apparent viscosity, and density were proposed. Experimental tests were also conducted to evaluate the interaction between the fluid composition and the controlled variables. In bench experimental tests, it was observed that the evaluated properties have statistically significant interactions with each other. However, the increase in sodium chloride concentration does not alter the pseudoplasticity of the fluids. Regarding the performance of the fuzzy controller, the results demonstrated the effectiveness of the proposed strategy in maintaining the electrical conductivity, apparent viscosity, and density of the fluids, thus evidencing its potential use as a tool for multivariable control of the physical properties in drilling fluids. It was also possible to identify that electrical conductivity was the most sensitive variable in relation to density and apparent viscosity.

Keywords: *Fuzzy* control, drilling fluids, electric conductivity, apparent viscosity, density.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Esquema de uma sonda de perfuração rotativa. Fonte: Iramina, 2016.....	18
Figura 2.2. Sistema básico de circulação de fluidos. Fonte: Applied Drilling Engineering, 1986....	20
Figura 2.3. Unidade de tratamento de fluidos de perfuração. Fonte: THOMAS, 2001.....	21
Figura 2.4. Janela operacional de poços em águas profundas. Fonte: ARAGÃO et al., (2005).	25
Figura 2.5. Viscosímetro FANN modelo 35ª. Fonte: Adaptado do manual FANN.	29
Figura 2.6. Balança de lama pressurizada (Mud Balance). Fonte: Adaptado do manual FANN.	30
Figura 2.7. Medidor de estabilidade elétrica FANN 23D. Fonte: Adaptado da Web FANN.	30
Figura 2.8. Pertinência para a variável temperatura. Fonte: Adaptado de COSTA, 2007.	32
Figura 2.9. Função de pertinência triangular. Fonte: Adaptado de BARBOSA, 2011.....	33
Figura 2.10. Função de pertinência Gaussiana. Fonte: Adaptado de BARBOSA, 2011.	33
Figura 2.11. Função de pertinência trapezoidal. Fonte: Adaptado de BARBOSA, 2011.....	34
Figura 2.12. Função de pertinência trapezoidal aberta a direita. Fonte: Adaptado de BARBOSA, 2011.	34
Figura 2.13. Função de pertinência trapezoidal aberta a esquerda. Fonte: Adaptado de BARBOSA, 2011.....	35
Figura 2.14. Arquitetura de um controlador <i>fuzzy</i> . Fonte: Autor, 2024.....	35

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Diagrama P&ID- UNIPAF atualizada.....	43
Figura 3.2. Diagrama P&ID- UMPC.	44
Figura 3.3. Tanque Misturador.	45
Figura 3.4. Agitador mecânico MIX159L.....	45
Figura 3.5. Sensor ultrassônico SITRANS Probe LU.....	46
Figura 3.6. Bomba helicoidal.	46
Figura 3.7. Medidor mássico Metroval: modelo RHM20. Fonte: Adaptado-Catálogo Metroval.	46
Figura 3.8. Viscosímetro tubular Brookfield modelo TT-100. Fonte: Autor, 2024.	47
Figura 3.9. Transmissor Stratos PRO e Sensor SE 604. Fonte: Adaptado Catálogo Knick, 2020. ...	47
Figura 3.10. Moega vibratória F 0.10.	48
Figura 3.11. Alimentador DR100.	48
Figura 3.12 Bomba dosadora Grabe. Fonte: Autor, 2024.	48
Figura 3.13. Quadros de Potência (a) e comando (b) da UNIPAF. Fonte: Autor, 2024.....	49
Figura 3.14. Quadros de Potência (a) e comando (b) da UMPC. Fonte: Autor, 2024.....	49
Figura 3.15. CLP- Chassis Modular de aquisição de dados e controle.....	50
Figura 3.16. Módulo de saída de corrente série C. Fonte: Adaptado de National Instruments.	50
Figura 3.17. IHM Principal: Sistema supervisor da unidade experimental. Fonte: Autor, 2024. ..	50
Figura 3.18. Módulo do Controlador Fuzzy. Fonte: Autor, 2024.....	51
Figura 3.19 Granulômetro a Laser Mastersizer 2000.....	52
Figura 3.20. Picnômetro de 50 ml.....	52
Figura 3.21 Procedimento operacional padrão da condução dos testes.	55

CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Análise MANOVA. Fonte: Autor, 2024.	58
Figura 4.2. Interface de programação da ferramenta Fuzzy System Designer. Fonte: Autor, 2024 .	60
Figura 4.3. Funções de pertinência para Condutividade elétrica. Fonte: Autor, 2024.....	61
Figura 4.4. Funções de pertinência da viscosidade aparente. Fonte: Autor, 2024.	61
Figura 4.5. Funções de pertinência para a densidade. Fonte: Autor, 2024.	62
Figura 4.6. Funções de pertinência para a dosagem de NaCl. Fonte: Autor, 2024.	62
Figura 4.7. Funções de pertinência para a dosagem de Goma Xantana. Fonte: Autor, 2024.	63
Figura 4.8. Funções de pertinência para a dosagem de Barita. Fonte: Autor, 2024.	63
Figura 4.9. Funções de pertinência para a injeção de água. Fonte: Autor, 2024.....	64

CAPÍTULO 5

Figura 5.1. (a), (b) e (c) - Curvas reológicas e modelo Herschel-Bulkley ajustado para as 27 combinações dos formulados. Fonte: Autor, 2024.	67
Figura 5.2. Controle Fuzzy Monovariável: Mudança de setpoint na condutividade elétrica de 12,1 mS/cm para 9,5 mS/cm. Ações da variável manipulada (curva azul) e resposta da variável controlada (curva vermelha). Fonte: Autor, 2024.....	70
Figura 5.3. Respostas dinâmicas da densidade (curva azul) e da viscosidade aparente do fluido (curva verde) às ações corretivas para controlar a condutividade elétrica. Fonte: Autor, 2024.	71
Figura 5.4. Controle Fuzzy Monovariável: Mudança de setpoint na condutividade elétrica de 10 mS/cm para 20 mS/cm- Ações da variável manipulada (cinza) e resposta da variável controlada (curva vermelha). Fonte: Autor, 2024.....	71
Figura 5.5. Respostas da densidade (curva azul) e da viscosidade aparente do fluido (curva verde) às ações corretivas para controlar a condutividade elétrica. Fonte: Autor, 2024.	72
Figura 5.6. Controle fuzzy multivariável: Testes do tipo servo para a condutividade elétrica (curva vermelha) e regulador para densidade (curva azul) e viscosidade aparente (curva verde). Fonte: Autor, 2024.....	74
Figura 5.7. Controle fuzzy multivariável: Teste servo para a condutividade elétrica. Ações de controle e resposta dinâmica da condutividade elétrica. Fonte: Autor, 2024.	75
Figura 5.8. Controle fuzzy multivariável: Teste servo para a condutividade elétrica. Ações de controle para rejeitar as perturbações na viscosidade aparente e a resposta dinâmica dessa variável. Fonte: Autor, 2024.....	75
Figura 5.9. Controle fuzzy multivariável: Teste servo para a condutividade elétrica. Ações de controle correspondente à injeção de água no sistema para rejeitar as perturbações na viscosidade aparente e na densidade do fluido. Fonte: Autor, 2024.	76
Figura 5.10. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a viscosidade aparente (curva verde) e regulador para a condutividade elétrica (curva vermelha) e densidade (curva azul). Fonte: Autor, 2024.....	78
Figura 5.11. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a viscosidade aparente. Ação de controle e resposta dinâmica relacionadas à mudança de setpoint da viscosidade aparente. Fonte: Autor, 2024.....	78
Figura 5.12. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a viscosidade aparente. Ações de controle na taxa de injeção de água para corrigir o efeito de hidratação do viscosificante. Fonte: Autor, 2024.....	79

Figura 5.13. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a viscosidade aparente. Ações de controle na taxa de adição de sal para rejeitar as perturbações na condutividade elétrica e resposta da dinâmica dessa variável controlada. Fonte: Autor, 2024.	79
Figura 5.14. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a viscosidade aparente. Ações de controle na taxa de adição de barita para rejeitar as perturbações na viscosidade e resposta da dinâmica dessa variável controlada. Fonte: Autor, 2024.	80
Figura 5.15. Controle Fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a densidade (curva azul) e regulador para a condutividade elétrica (curva vermelha) e viscosidade aparente (curva verde). Fonte: Autor, 2024.	81
Figura 5.16. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a densidade. Ação de controle e resposta dinâmica relacionadas à mudança de setpoint da densidade. Fonte: Autor, 2024.	82
Figura 5.17. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a densidade. Ações de controle na taxa de injeção de água para corrigir o overshoot da densidade e a condutividade elétrica. Fonte: Autor, 2024.	82
Figura 5.18. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a densidade. Ações de controle na taxa de adição de sal para rejeitar as perturbações da condutividade e resposta da dinâmica dessa variável controlada. Fonte: Autor, 2024.	83
Figura 5.19. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a densidade. Ação de controle para rejeitar as perturbações na viscosidade aparente e a resposta dinâmica dessa variável. Fonte: Autor, 2024.	84
Figura 5.20. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Respostas em malha fechada das variáveis controladas condutividade elétrica (curva vermelha), viscosidade aparente (curva verde) e densidade (curva azul) após perturbação com a adição de 10 litros de água. Fonte: Autor, 2024.	86
Figura 5.21. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ações de controle na taxa de adição de sal para rejeitar as perturbações da condutividade elétrica e resposta da dinâmica dessa variável controlada para recuperar frente a adição de 10 litros de água. Fonte: Autor, 2024.	87
Figura 5.22. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ação de controle para rejeitar as perturbações na viscosidade aparente e a resposta dinâmica dessa variável frente a adição de 10 litros de água. Fonte: Autor, 2024.	88
Figura 5.23. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ação de controle e resposta dinâmica para rejeitar as perturbações na densidade e a resposta dinâmica dessa variável frente a adição de 10 litros de água. Fonte: Autor, 2024.	88
Figura 5.24. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ações de controle na taxa de injeção de água para corrigir o overshoot da viscosidade aparente promovido pela dosagem de viscosificante. Fonte: Autor, 2024.	89
Figura 5.25. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Respostas em malha fechada das variáveis controladas condutividade elétrica (curva vermelha), viscosidade aparente (curva verde) e densidade (curva azul) após perturbação com a adição de 500 gramas de NaCl. Fonte: Autor, 2024.	91
Figura 5.26. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ações de controle na taxa de injeção de água para restaurar o setpoint da condutividade elétrica. Fonte: Autor, 2024.	91
Figura 5.27. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ação de controle para rejeitar as perturbações na viscosidade aparente do fluido e a resposta dinâmica dessa variável controlada.	92
Figura 5.28. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ações de controle para rejeitar as perturbações na densidade do fluido e a resposta dinâmica dessa variável controlada.	92

APÊNDICE

Figura B.1- Análise granulométrica da amostra da Barita (BaSO_4).	102
Figura C-1. Gráficos das curvas de calibração para atuadores de sólidos: A) Vazão mássica de NaCl, B) Vazão mássica de Barita e C) Dosagem de Goma Xantana.	103

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2-1. Sistemas básicos presente em uma um sonda de perfuração rotativa.	19
--	----

CAPÍTULO 3

Tabela 3-1. Instrumentos da Unidade Experimental de Preparo de Fluidos. Fonte: Autor, 2024.....	43
Tabela 3-2. Instrumentos da Unidade Móvel de Pesquisa Científica. Fonte: Autor, 2024.....	44
Tabela 3-3 Variáveis e níveis experimentais. Fonte: Autor, 2024.	53
Tabela 3-4. Numeração e Formulação dos experimentos. Fonte: Autor, 2024.....	54

CAPÍTULO 5

Tabela 5-1. Diâmetro das partículas. Fonte: Autor, 2024.	65
Tabela 5-2. Base de regras linguísticas implementadas para o controlador. Fonte: Autor, 2024.	66
Tabela 5-3. Parâmetros do modelo reológico- Herschel-Buckley. Fonte: Autor, 2024.....	68
Tabela 5-4. Cálculo do PTDBE para o teste servo para a condutividade elétrica e regulatório para a viscosidade aparente e densidade. Fonte: Autor, 2024.	77
Tabela 5-5. Cálculo do PTDBE para o teste servo para a viscosidade aparente e regulatório para a condutividade elétrica e densidade. Fonte: Autor, 2024.	81
Tabela 5-6. Cálculo do PTDBE para o Teste servo para a densidade e regulatório para a condutividade elétrica e viscosidade aparente. Fonte: Autor, 2024.	85
Tabela 5-7. Cálculo do PTDBE para o teste regulatório perturbação com água. Fonte: Autor, 2024.	90
Tabela 5-8. Cálculo do PTDBE para o teste regulatório perturbação com cloreto de sódio. Fonte: Autor, 2024.....	93

APÊNDICE

Tabela A 1. Medições obtidas experimentalmente para os vinte e sete fluidos formulados em triplicata (densidade, viscosidade aparente e condutividade elétrica).	101
---	-----

CAPÍTULO 1

Resumo: Este capítulo apresenta uma breve contextualização do tema abordado nesta pesquisa, assim como os objetivos gerais e específicos a serem alcançados com o desenvolvimento deste estudo. Também é apresentada a organização textual da dissertação.

1. INTRODUÇÃO

Para auxiliar nas etapas de perfuração de poços de petróleo, os fluidos de perfuração são comumente utilizados, sendo sistemas químicos complexos que desempenham diversas funções. Entre essas funções, destacam-se o transporte dos cascalhos gerados pela broca até a superfície do poço, a manutenção de uma pressão hidrostática para estabilizar as paredes do poço, a prevenção de danos à formação, a lubrificação da broca, entre outras (KOSYNKIN *et al.*, 2012).

Normalmente, os fluidos de perfuração à base de água utilizados para explorar regiões com alta concentração de sais são preparados como salmouras. Isso é feito com o objetivo de evitar possíveis alterações nas propriedades reológicas, bem como o aumento da densidade do fluido devido à dissolução de sais (CENPES, 2023).

Atualmente, as atividades de correção das propriedades dos fluidos de perfuração são realizadas em estações de análise e tratamento de fluidos presentes nas sondas de perfuração. As análises dos fluidos são realizadas por meio de coletas de amostras e ensaios laboratoriais e, após os resultados obtidos, os operadores do processo realizam manualmente a intervenção necessária, adicionando aditivos para recuperar a propriedade perturbada (MAGALHÃES, 2015). Esse processo de coleta, análise e correção do fluido é bastante manual e pouco automatizado, aumentando os riscos nos processos de perfuração devido ao tempo gasto até a detecção e ação adequada para correção do fluido.

O grupo de pesquisa do Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF/UFRRJ) é pioneiro no estudo de escoamento de fluidos e sistemas particulados. O laboratório desenvolve pesquisas para a indústria de óleo e gás, envolvendo a modelagem e simulação de dinâmica de fluidos, prototipagem de novos equipamentos, monitoramento, detecção de anomalias e o desenvolvimento de algoritmos de controle para fluidos de perfuração. Alguns trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa do LEF trouxeram propostas para o monitoramento e correção de fluidos de perfuração em tempo real, utilizando técnicas clássicas e avançadas de controle. Contudo, devido a esses fluidos possuírem diferentes propriedades a serem exercidas durante a perfuração, o desenvolvimento e aperfeiçoamento de controladores multivariáveis se tornam constante objeto de estudo devido a complexidade desses sistemas.

Com isso, o presente trabalho traz uma proposta de um controlador *fuzzy* multivariável para controlar as propriedades condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade em fluidos de perfuração à base de água. O diferencial deste trabalho é que, até o momento, nenhuma técnica de controle multivariável foi desenvolvida para controlar simultaneamente três propriedades em fluidos de perfuração. Vale ressaltar que não há na literatura estudos abordando técnicas de controle para correção de fluidos com foco na perfuração de regiões salinas.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a aplicação de um sistema de controle para a correção das propriedades de fluidos de perfuração em tempo real por meio de um controlador baseado em lógica fuzzy, avaliando experimentalmente a aplicação desta técnica ao processo de preparo e controle das propriedades de fluidos de perfuração.

1.1.1 Objetivos Gerais

- ✓ Contribuir com o desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas de automação para a indústria de exploração de petróleo.
- ✓ Desenvolvimento de uma estratégia de controle multivariável para uma unidade experimental de preparo e monitoramento em tempo real de fluidos de perfuração.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Analisar a interação entre as substâncias constituintes de um fluido de perfuração e seus efeitos sobre suas propriedades físicas e reológicas;
- ✓ Obter uma base de regras fuzzy relacionando a composição do fluido de perfuração e suas propriedades físicas e reológicas;
- ✓ Projetar um controlador fuzzy monovariável e avaliar o seu desempenho no controle da condutividade elétrica e seus efeitos sobre a viscosidade aparente e a densidade do fluido;
- ✓ Projetar um controlador fuzzy multivariável e avaliar o seu desempenho no controle da condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade de fluidos de perfuração.

1.2 Organização da Dissertação

Este trabalho está estruturado em oito capítulos e sua organização textual apresenta-se da seguinte forma: O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica e o estado da arte acerca do tema. O capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da técnica de controle deste estudo. O capítulo 4 aborda a modelagem da estratégia *fuzzy* para o controle das propriedades condutividade, densidade e viscosidade aparente em fluidos de perfuração. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e a respectiva discussão, o capítulo 6 traz a conclusão do estudo, no capítulo 7 contém as sugestões para trabalhos futuros e, por último, o capítulo 8 as referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2

Resumo: Este capítulo apresenta de forma sucinta os conceitos básicos das operações de perfuração, circulação e monitoramento de fluidos de perfuração em poços de petróleo, assim como as propriedades e características destes fluidos. Em seguida, é apresentada a estratégia de controle baseado em lógica *fuzzy*, abordando os principais aspectos sobre a técnica para o entendimento inicial da proposta deste trabalho. Também são apresentados o estado da arte abordando os principais trabalhos de caráter teórico-experimental que utilizaram esta técnica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Perfuração de Poços de Petróleo

A perfuração de um poço é um processo físico-mecânico que ocorre por meio da abrasão das rochas devido à ação rotacional e à aplicação de peso sobre uma broca localizada ao fim da coluna de perfuração. A perfuração de um poço de petróleo é realizada por meio de uma sonda, podendo ser classificadas como terrestres ou marítimas (THOMAS, 2001).

Thomas (2001) descreve que, durante a perfuração os fragmentos das rochas trituradas são removidos pela ação de um fluido, onde o mesmo é injetado por bombeamento através da região interna coluna de perfuração, o carregamento dos fragmentos até a superfície ocorre entre o espaço existente na coluna de perfuração e a formação no qual foi perfurada, essa região é conhecida como espaço anular. A Figura 2.1 ilustra um sistema básico de uma sonda de perfuração rotativa.

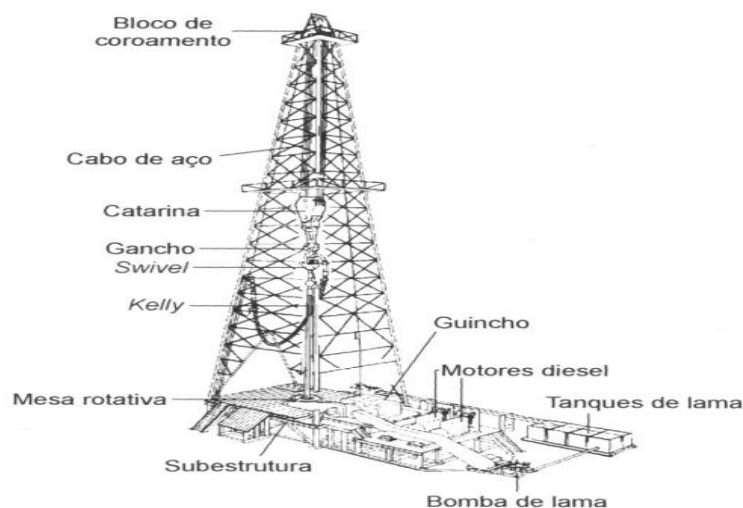


Figura 2.1. Esquema de uma sonda de perfuração rotativa. Fonte: Iramina, 2016.

2.2 Sistemas de Operação

Todos os equipamentos contidos em uma sonda são responsáveis por uma determinada função durante a perfuração de um poço, esses conjuntos de equipamentos são subdivididos e chamados de “sistemas” (THOMAS, 2004). Dentre os sistemas presentes em uma sonda destacam-se: o sistema de sustentação e movimentação de cargas, o sistema de geração e transmissão de energia, o sistema de

rotação, o sistema de circulação e o sistema de segurança e monitoramento, todos apresentados na Tabela 2-1.

Tabela 2-1. Sistemas básicos presente em uma um sonda de perfuração rotativa.

Sistemas	Características
Sustentação e movimentação de cargas	O sistema de sustentação e movimentação de cargas é responsável por fornecer o peso para que a broca utilize seus dentes e perfure as diversas formações rochosas. A coluna de perfuração é a responsável por fornecer esta energia de peso para o equipamento. A movimentação dessas cargas mostra que a estrutura conta com equipamentos de elevação da tubagem sendo os principais guinchos, catarina, cabo de perfuração, elevador, âncora e bloco de coroamento. Para sustentar o peso da coluna de perfuração o sistema de sustentação de carga é constituído por uma torre ou mastro, a subestrutura e a base ou fundação (PONTES, 2015).
Geração e transmissão energia	Esse sistema é responsável pelo fornecimento e distribuição de energia para toda a sonda. Normalmente, a energia de uma unidade de perfuração é gerada por motores a diesel. Também pode-se utilizar a energia elétrica de redes públicas, quando houver disponibilidade (THOMAS, 2004).
Rotação	Normalmente neste sistema é utilizado o Top drive, porém existem outros equipamentos comumente aplicados nessa operação, um exemplo clássico é a mesa rotativa (GOMES, 2007). No sistema Top drive a rotação é transmitida diretamente no topo da coluna de perfuração através de um motor elétrico ou hidráulico acoplado à catarina (conjunto de polias que auxiliam na movimentação de cargas).
Circulação de fluidos	A circulação acontece com um fluido de perfuração que é bombeado pelas bombas de lama e injetado na coluna através do <i>swivel</i> , percorrendo um caminho até a broca, resfriando a mesma e retornando pelo espaço anular (formado pelas paredes do poço e a coluna) removendo os cascalhos cortados pela broca até a superfície onde a última etapa desse sistema é a fase de tratamento/condicionamento do fluido (THOMAS, 2004).
O sistema de segurança e monitoramento	O sistema de segurança é constituído por equipamentos de segurança instalados na cabeça do poço e por outros equipamentos complementares que possibilitam o monitoramento e controle do poço (THOMAS, 2001). A função desse sistema é prevenir acidentes oriundo de influxos indesejáveis, como <i>kicks</i> e acidentes que levem ao fechamento do poço total do poço como o <i>blowout</i> . O equipamento utilizado para essa prevenção é um conjunto de válvulas que permite fechar o poço conhecido como <i>blowout preventer</i> (BOP) (GOMES,2007).

Fonte: Adaptado dos autores Gomes, 2007; e Thomas, 2004.

Nos tópicos seguintes será apresentado de forma mais detalhada o sistema de circulação, abordando suas subdivisões e os equipamentos que o constituem. Essa abordagem mais específica

ocorre para que haja uma compressão do sistema no qual a técnica de controle desenvolvida neste trabalho irá ser aplicada.

2.2.1 Sistema de Circulação

Normalmente durante uma operação de perfuração, o fluido de perfuração é bombeado dos tanques de armazenamento através do interior da coluna até atingir a cabeça da broca, seu retorno ocorre pelo espaço anular até a superfície, trazendo consigo os cascalhos oriundos da formação rochosa triturada (THOMAS, 2001). Na superfície, após seu retorno, o fluido permanece no interior de tanques para receberem o tratamento adequado, seja para a correção de suas propriedades para reinjeção no poço ou para seu descarte de forma adequada. Esse conjunto de operações que realizam o transporte e o tratamento destes fluidos é chamado de sistema de circulação, no qual se subdivide em três fases; a fase de injeção, a fase de retorno e por último a fase de tratamento (BOURGOYNE *et al.* 1986). A Figura 2.2, apresenta de forma ilustrativa um sistema básico que compõe uma unidade de circulação de fluidos em uma sonda de perfuração.

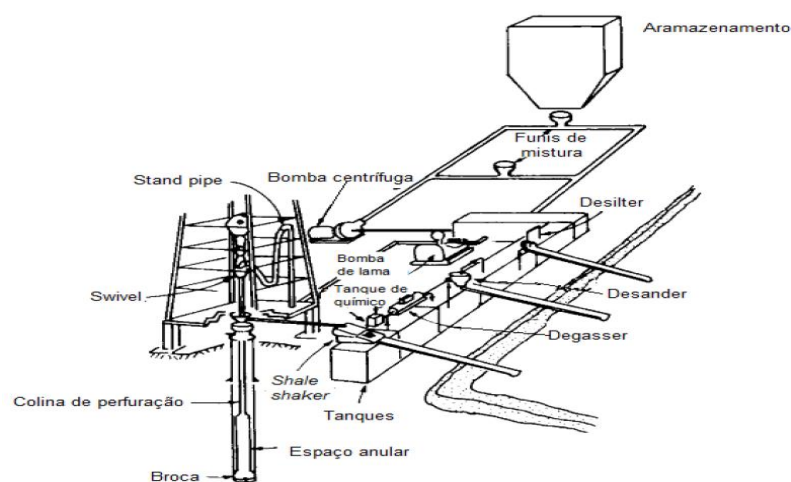


Figura 2.2. Sistema básico de circulação de fluidos. Fonte: Applied Drilling Engineering, 1986.

2.2.1.1 Fase de Injeção

Nesta etapa, o fluido de perfuração é succionado dos tanques de armazenamento pela ação de bombas, onde ele circula ao longo da coluna de perfuração até atingir o espaço anular (espaço existente entre o poço perfurado e a coluna) através de orifícios existentes na broca, estes orifícios são conhecidos como jatos da broca.

Durante a perfuração, as vazões e pressões de bombeio variam com a profundidade e a geometria do poço. As bombas ou *mud pumps*, como são conhecidas, são responsáveis por todo o sistema de circulação de fluido na planta, estas podem ser associadas em paralelo na fase inicial da perfuração, quando são requeridas grandes vazões (GATLIN, 1960). Com o prosseguimento da perfuração, são exigidas altas pressões, para baixas vazões, usualmente utiliza-se apenas uma bomba, substituindo os pistões e as camisas por outros de menor diâmetro de forma a atender às solicitações do poço.

2.2.1.2 Fase de Retorno

Esta fase tem início com a saída do fluido de perfuração nos jatos da broca e termina ao chegar na peneira vibratória (CHIPALAVELA, 2013). Nesta etapa, o fluido percorre o espaço anular entre

a coluna de perfuração e a parede do poço, transportando consigo os detritos rochosos (cascalho/*cuttings*) provenientes da ação da broca até a superfície. Em seguida, o fluido passa uma tubulação chamada *flow-line*, a qual transporta o fluido e os cascalhos até as peneiras vibratórias.

2.2.1.3 Fase de Tratamento

A fase de tratamento ou condicionamento do fluido de perfuração, consiste na remoção de sólidos fragmentados ou gases que se incorporam ao fluido durante a etapa de perfuração, o tratamento desse fluido ocorre pela aplicação sequencial de diferentes equipamentos de separação, essas operações têm como objetivo a recuperação do fluido para posterior reutilização (CAENN, 2014). Quando necessário, também é realizado a adição de produtos químicos para os ajustes das suas propriedades (THOMAS, 2001). A Figura 2.3 ilustra de forma representativa a sequência de operações e os equipamentos típicos desta unidade, em seguida eles são abordados separadamente.

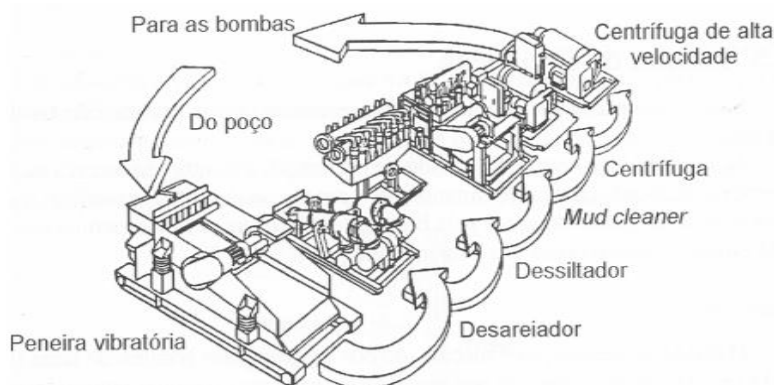


Figura 2.3. Unidade de tratamento de fluidos de perfuração. Fonte: THOMAS, 2001.

- i. O primeiro equipamento a receber o fluido a ser tratado é a peneira vibratória, no qual também é chamada de *shale shaker*. Este equipamento faz parte de um conjunto de operações existentes no sistema de controle de sólidos em uma unidade de perfuração. As peneiras vibratórias destas unidades têm como principal objetivo separar os sólidos (cascalhos) oriundos da perfuração, que foram carregados pelo fluido até a superfície, o mecanismo de separação ocorre através da vibração mecanizada imposta às peneiras (PEREIRA, 2013).
- ii. Em seguida, o fluido que deixa as peneiras é alimentado em um conjunto de dois a quatro hidrociclones que também são conhecidos como desareidores ou *desander*, estes equipamentos são responsáveis por remover os sólidos contido no fluido na faixa granulométrica de areia (ABNT NBR 6502/95). A separação das partículas ocorre através da separação ciclônica formada por um campo centrífugo gerado a partir do deslocamento helicoidal turbulento no interior do hidrociclones (MURPHY, 2012).
- iii. Basicamente a separação dessas partículas ocorre através da alimentação tangencial da carga que impacta nas paredes da câmara cilíndrica do equipamento, desse modo o fluido desenvolve uma velocidade rotacional e descendente até o ponto de estrangulamento da seção circular devido ao seu formato cônico na zona inferior (formação de um vórtex), assim forçando uma parte desse fluxo a se direcionar de forma ascendente (formação de um vórtex

secundário). A corrente ascendente, também conhecida como *overflow*, sai pelo topo do equipamento enquanto a descendente, também conhecida como *underflow* sai pela zona inferior carregando consigo os materiais particulados existentes (MOGNON, 1990).

- iv. Os hidrociclones desareiaadores possuem diâmetros que podem variar entre 4 e 12 in e apresentam uma capacidade de processamento entre 50 e 500 galões por minuto. O resíduo que sai do *underflow* da bateria de desareiaadores é enviado às peneiras de alto desempenho e o líquido do *overflow* é enviado ao tanque da bateria de dessiltadores (PETRI, 2014).
- v. Saindo do desareiaador, o fluido passa pelo dessiltador, um conjunto de 8 a 12 hidrociclones de 4” a 5”, cuja função é descartar partículas de dimensões equivalentes ao do silte.
- vi. O equipamento seguinte é o *mud cleaner*, que nada mais é que um dessiltador com uma peneira que permite recuperar partículas, onde parte do material particulado é descartado e outra parte retorna ao fluido, reduzindo os gastos com aditivos adensantes.
- vii. Após passar pelo *mud cleaner*, o fluido adentra o desgaseificador pois, embora não tenha sido ilustrado pela Figura 2.3, é importante cita-lo, pois este equipamento é indispensável numa sonda de perfuração, seja para o tratamento do fluido ou para a segurança do poço. O principal objetivo do desgaseificador é eliminar a existência de gases presentes no fluido de perfuração, pois durante a etapa de perfuração o fluido pode entrar em contato com formações ou regiões que contenham a presença de gás, assim, partículas de gás se incorporam ao fluido de perfuração e a sua recirculação no poço pode ser perigosa.
- viii. Por último, o fluido de perfuração é armazenado em tanques que também são conhecidos/chamados de *Mud tanks* (MAGALHÃES, 2015). Nestes tanques são realizados o *Mud Check* (processo de coleta, análise e o monitoramento das propriedades físico-químicas do fluido de perfuração) para que haja a correção das propriedades do fluido caso necessário. Após realizadas as análises e as correções, o fluido é reinjetado através de bombas na linha de injeção ou direcionado para seu descarte.

2.3 Fluidos de Perfuração

Os fluidos de perfuração, também denominados de lamas de perfuração, são fluidos constituídos pela adição de produtos químicos a um fluido base de forma a auxiliar o processo de perfuração de poços (FANCHI, 2010). Segundo Guimarães *et al.* (2007), nas atividades petrolíferas, torna-se essencial o uso destes fluidos para o sucesso de toda a operação de perfuração. Os autores Darley & Gray (1988) e Mitchell & Miska (2011), descreve que, entre as principais funções para um fluido de perfuração, destacam-se:

- Transportar o cascalho oriundo da perfuração e permitir sua separação na superfície;
- Resfriar, limpar e lubrificar a broca rotativa;
- Reduzir o atrito entre a coluna de perfuração e a formação;
- Exercer gradiente de pressão hidrostática para a estabilização do poço;
- Prevenir influxo de fluidos oriundo das formações para o interior do poço;

- Formar um filme/camada de baixa permeabilidade nas paredes do poço;
- Formar efeito gel quando o escoamento é interrompido;
- Não comprometer a estrutura e conseqüentemente a contaminação do reservatório;
- Controlar a corrosão dos equipamentos;
- Auxiliar na coleta e na interpretação das informações disponíveis a partir dos cascalhos provenientes da perfuração;
- Minimizar os impactos ambientais.

As funções de um fluido de perfuração podem se alterar ou se sobrepor uma com as outras com maior intensidade em determinados processos. Caenn & Chillingar (1996), relatam que as funções de um fluido de perfuração se baseiam nas necessidades e nas etapas ao longo da perfuração.

2.3.1 Classificação dos Fluidos de Perfuração

Os fluidos de perfuração são dispersões complexas de sólidos, líquidos e gases, constituídas por duas fases: uma dispersante e outra dispersa, na qual sua complexidade depende da natureza dos produtos dispersos (TERZAGHI *et al.*, 1998). Sua classificação é baseada de acordo com o principal constituinte da sua fase contínua, sendo eles classificados como do tipo à base de água, óleo ou gás. Do ponto de vista químico, eles podem apresentar aspectos de suspensões, dispersões coloidais ou emulsão, dependendo dos constituintes presentes (THOMAS, 2001).

2.3.1.1 Fluidos Base Água

Os fluidos base água ou fluidos aquosos, são aqueles em que a água é utilizada como substância predominante, na qual são adicionados alcalinizantes, sais, surfactantes, polímeros orgânicos, bactericidas e adensantes. A seleção desses aditivos deve ser realizada levando-se em consideração o tipo da formação geológica a ser perfurada e os materiais dispersantes que estarão em suspensão ao longo do processo de carreamento. (APALEKE, 2012).

Os fatores a serem considerados na seleção da água para o preparo de fluidos a base água, segundo Thomas (2001), destacam-se; a disponibilidade, o transporte, o tratamento, as técnicas de monitoramento e os equipamentos disponíveis na unidade.

2.3.1.2 Fluidos Base Óleo

Os fluidos base óleo ou sintéticos são aqueles onde a fase contínua é constituída predominantemente por óleo, geralmente composta por hidrocarbonetos líquidos (geralmente olefinas ou parafinas), dentre eles destacam-se o óleo diesel e o mineral, nos quais geralmente são acrescidos agentes emulsificantes e outros produtos químicos. Estes fluidos também podem se caracterizar como emulsões do tipo água em óleo ou emulsões do tipo inversa (teor de água de 10% a 45%) (SHIROMA, 2012).

Thomas (2001) ainda descreve que, os fluidos a base óleo possuem vantagens em relação aos fluidos a base água, destacando-se: baixas taxas de corrosão, alto grau lubrificidade, amplo intervalo de variação da densidade e baixa solubilidade de sais inorgânicos. Caenn *et al.*, (2017) relata que os fluidos de base óleo apresentam algumas desvantagens em sua utilização, onde se destacam o alto grau de poluição, um alto valor de obtenção, dificuldade no monitoramento das propriedades, tratamento e descarte, assim tornando-os menos empregados do que os fluidos a base água nas

operações de perfuração. Com tudo, os fluidos a base óleo são os mais eficazes e melhor desempenham seus papéis em regiões de exploração onde há um elevado gradiente geotérmico no interior do poço.

2.3.1.3 Fluidos Gasosos

Também conhecidos como fluidos pneumáticos, os fluidos gasosos podem possuir em sua composição ar, gás (natural ou inerte), névoa ou espuma. A utilização de um fluido deste grupo apresenta vantagens econômicas em regiões onde as formações rochosas são mais duras e onde há pouca chance de se encontrar grandes quantidades de água (BAROID Limited, 1985).

Segundo Darley & Gray (1988), os fluidos de ar são particularmente utilizados quando deseja-se realizar perfurações a pressões reduzidas, a fim de aumentar a estabilidade do poço quando a frente de formações cavernosas, esse tipo de fluido ainda apresenta tolerância frente a formações salinas. Os autores Caenn & Chillingar (1996), ainda mencionam que cerca de uma baixa percentagem dos fluidos utilizados na indústria são deste tipo, sendo apenas utilizados quando a pressão de fratura da formação rochosa é muito baixa em relação à pressão relativa mínima que uma coluna de líquido exerce no interior do poço.

2.3.2 Propriedades dos Fluidos de Perfuração

Diversos autores têm estudado o efeito da variação das composições dos fluido de perfuração, com o objetivo de analisar o efeito das alterações em suas propriedades. Uma vasta gama de trabalhos na literatura procura suprir as necessidades e demandas do avanço tecnológico nos processos de *upstream*, onde as propriedades desses fluidos é um dos principais alvo de estudo, já que o mesmo possui papel indispensável durante a perfuração. Segundo Caenn e Chillingar (1996), as propriedades mais importantes dos fluidos de perfuração são a massa específica (densidade), as propriedades reológicas, o teor de sólidos, o pH e a filtração.

2.3.2.1 Densidade

A densidade equivalente dos fluidos de perfuração (ECD – *equivalent circulating density*) é definida pela janela operacional (Figura 2.4), a qual é o limite mínimo da pressão de poros e pelo limite máximo da pressão de fratura das formações expostas (THOMAS, 2001). A pressão de poros representa a pressão exercida pelo fluido presente na formação em direção ao poço, enquanto a pressão de fratura é a pressão necessária para causar a falha mecânica de uma formação resultando a perda de fluido para a formação.

A densidade é um das propriedades mais importantes a serem monitoradas, controladas e estudadas, uma vez que, fora da faixa de operação, pode ocorrer uma série de problemas tais como: fraturas, desmoronamentos, *kicks e blowouts*, pondo em risco a integridade do poço e a segurança operacional.

Existem três tipos de técnicas de perfuração que podem ser utilizadas durante a perfuração de um poço de petróleo: a perfuração *over-balance*, *near-balance* a *under-balance*. A escolha adequada da técnica a ser utilizada depende de fatores técnicos como a pressão de poros e fratura da formação, da estabilidade e composição da formação e a viabilidade econômica (ABIMBOLA *et al.*, 2014).

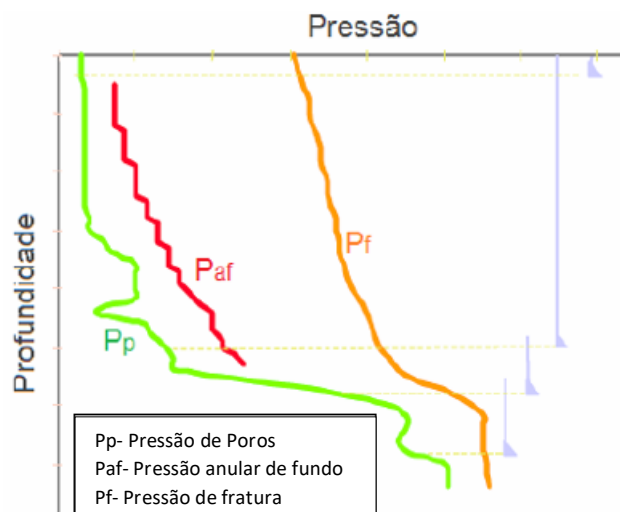


Figura 2.4. Janela operacional de poços em águas profundas. Fonte: ARAGÃO *et al.*, (2005).

Na literatura, diversos autores fornecem valores típicos da massa específica de fluidos de perfuração em regiões de *under*, *near* e *over-balance*. Simpson (2005), apresenta valores entre 1,06 e 1,68 g/cm³ para a densidades de fluidos em regiões de operação *overbalance*, essa técnica baseia-se na criação de um diferencial de pressão no qual a pressão hidrostática no interior do poço é maior do que a formação, esta técnica também é adotada como medida de segurança, pois impede que haja qualquer tipo de influxo (gás, óleo e/ou água) da formação para o poço durante a operação. Entretanto, valores muito altos de pressão podem causar dano à formação, devido ao grande volume de fluido que invadirá a rocha durante as operações de perfuração, de completação ou de intervenção. Jan (2009), destaca valores entre 0,62-0,99 g/cm³ para regiões de *under-balance*, caracterizando que a densidade do fluido mantém a pressão hidrostática do poço abaixo das pressões de poros, com a possível ocorrência de pequenos influxos (*Kicks*) durante a perfuração. Por fim, Qiansheng & Baoguo (2008), fornecem valores médios de 0,96-1,02 g/cm³ para perfurações do tipo *near-balance*, neste caso a pressão do poço é mantida próxima à pressão de poros da formação.

2.3.2.2 Reologia

A Reologia é a ciência que estuda a resistência mecânica que os materiais exercem quando são submetidos a tensões ou deformações, sob diferentes condições. Além disso, as respostas mecânicas desses materiais estão associadas a um intervalo de tempo de análise do escoamento (COSTA, 2021).

Na indústria do petróleo, é de extrema importância conhecer o comportamento reológico dos diferentes tipos de fluidos empregados durante a perfuração. Essas informações são essenciais para obter propriedades como viscosidade aparente, elasticidade e plasticidade do fluido (NORONHA, 2016). Para os fluidos de perfuração, os conceitos básicos da reologia também se aplicam pois, considera-se que o fluido siga um modelo reológico no qual os parâmetros que nele constam irão influenciar diretamente nos cálculos de transporte do cascalho e nas perdas de carga da tubulação (THOMAS, 2001).

Além de ressaltar as definições citadas por Thomas (2001), Machado (2002), apresenta alguns dos problemas operacionais em razão das propriedades reológicas inadequadas dos fluidos de perfuração, como: a perda de circulação, altas variações da velocidade de carregamento do cascalho até a superfície. Os autores Darley & Gray (1998) descrevem que os fluidos de perfuração podem

apresentar viscosidade baixa quando expostos à temperatura ambiente, mas ao longo do poço, quando expostos às variações de temperatura e pressão, essa viscosidade pode se apresentar bastante elevada e com isso um aditivo químico, que à temperatura ambiente atua aumentando a viscosidade, pode desempenhar um efeito contrário no interior do poço.

Noronha (2016), ainda ressalta que fluidos de perfuração possuem comportamento não-Newtoniano e são projetados para possuírem características tixotrópicas, ou seja, o fluido de perfuração é projetado/formulado para gelificar gradativamente quando não há cisalhamento aplicado sobre ele, no qual tal fenômeno se faz necessário para impedir que os cascalhos oriundos da perfuração sedimentem durante as paradas, assim evitando problemas operacionais por aprisionamento e colapso de poço.

2.3.2.3 Teor de Sólidos

A concentração de sólidos nos fluidos de perfuração é algo muito importante a se monitorar. Uma pequena variação na concentração de sólidos existente no fluido o mesmo provoca alterações de outras propriedades que estão diretamente relacionadas, exemplo é a reologia do fluido e a densidade (FERRAZ, 2014).

O teor de sólidos no fluido deve ser mantido no mínimo possível, é uma propriedade que deve ser controlada com rigor, porque o seu aumento implica no aumento da probabilidade de problemas como desgaste dos equipamentos de circulação, fratura das formações devido à elevação das pressões de bombeio ou hidrostática, prisão da coluna e redução da taxa de penetração (THOMAS, 2001). O tratamento do fluido para reduzir o teor de sólidos pode ser preventivo ou corretivo. O tratamento preventivo consiste em inibir o fluido, física ou quimicamente, evitando-se a dispersão dos sólidos perfurados, já no método corretivo, pode-se recorrer ao uso de equipamentos extratores de sólidos.

2.3.2.4 Filtração

A filtração é um processo que ocorre quando o fluido de perfuração, contendo sólidos suspensos, é pressurizado contra a parede do poço (formação rochosa). No início do fenômeno, os sólidos mais finos percolam a rocha juntamente com a fase líquida do fluido de perfuração. Em seguida, as partículas realizam um processo de colmatação/acomodação no interior dos poros da formação, assim, retendo as partículas maiores na superfície da rocha (BORGES, 2019).

Quando as partículas sólidas presentes no fluido de perfuração possuem dimensões, adequadas, a obstrução dos poros sucede de forma mais rápida e pouco fluido flui através dos poros da rocha. A camada de reboco formado pelos sólidos suspensos nos poros da rocha deve crescer rapidamente a fim de diminuir a taxa de filtração para não comprometer o espaço anular do poço e o volume de fluido a ser injetado no poço (FERRAZ, 2014).

2.3.2.5 pH

Durante a etapa de perfuração, o fluido de perfuração está sujeito a interações do tipo sólido-fluido com o cascalho e interações líquido-líquido com os fluidos que podem ser produzidos no interior poço. Essas interações podem afetar diretamente no aumento da acidez do fluido. Para minimizar a corrosão dos equipamentos e da linha de circulação de fluido, o pH deve ser controlado e mantido em uma faixa intermediária entre os valores de sete a dez (FERRAZ, 2014). Khandal & Trados (1988), discutem acerca do potencial hidrogeniônico presentes nos fluidos de perfuração, onde para valores de pHs mais baixos (meio ácido), observa-se alteração nos parâmetros reológicos, pois

é possível observar um aumento significativo na viscosidade aparente e na tensão de escoamento do fluido.

2.3.2.6 Estabilidade Elétrica

Os fluidos base óleo ou sintéticos são compostos nos quais a fase líquida é constituída por uma emulsão do tipo água em óleo ou emulsão do tipo inversa. As proporções entre óleo e água podem variar para ambos de acordo com as necessidades da perfuração. Os fluidos de perfuração dessa natureza, por se tratar de uma emulsão, apresentam-se termodinamicamente instáveis visto que as condições que são submetidos durante etapa de perfuração favorecem diretamente a sua instabilidade, assim é necessário um agente externo para mantê-lo estável, geralmente utiliza-se tensoativos com afinidade ao óleo. Sabe-se que a estabilidade de emulsões está correlacionadas diretamente com diversas variáveis, uma delas é a estabilidade elétrica.

A estabilidade elétrica é a medida da voltagem requerida para iniciar um fluxo de corrente elétrica, este é um indicativo de quão fortemente a água está emulsionada em uma fase orgânica. Altos valores indicam uma emulsão mais forte e, portanto, um fluido com maior estabilidade. Óleos e bases sintéticas não possuem características de condução de eletricidade, no entanto conhecer essa propriedade é extrema importância para saber quais valores de corrente elétrica necessária para desestabilizar/quebrar as emulsões (GONÇALVES, 2003).

Gonçalves (2003), ainda menciona que alguns fatores podem influenciar a estabilidade elétrica dos fluidos a base óleo, entre eles destacam-se.

- i. **Concentração de água:** Altas concentrações de água diminuem a estabilidade elétrica, pois diminuem a distância entre as gotículas de água, facilitando o fechamento do circuito elétrico causado pela coalescência das gotículas dispersas.
- ii. **Temperatura:** A temperatura na qual é medida a estabilidade elétrica causa variações nos valores lidos de estabilidade elétrica. As medidas devem ser feitas avaliando as condições térmicas que serão submetidas as emulsões e estipulando valores fixos para os testes.
- iii. **Concentração de sal:** A condutividade elétrica da água aumenta com a presença de sais. O aumento da concentração de sais normalmente causa uma pequena redução na estabilidade elétrica das emulsões, assim favorecendo a coalescência da fase dispersa.
- iv. **Saturação:** Quando a fase aquosa (gotículas emulsionadas-fase dispersa) satura com sais, o mesmo irá precipitar como um sólido molhado por água, o que irá reduzir a estabilidade da emulsão. Quando se perfuram formações rochosas salinas deve se avaliar com atenção à quantidade e tipo de sal para evitar situações de instabilidade do fluido.
- v. **Adensantes:** Fluidos de perfuração com alta densidade, principalmente adensados com hematita ou outros adensantes especiais normalmente apresentam valores inferiores de estabilidade elétrica do que aqueles adensados com barita.

2.3.3. Contaminação do Fluido de Perfuração

No universo dos fluidos de perfuração, um contaminante é qualquer tipo de material que exerce um efeito prejudicial sobre as características físicas ou químicas a serem desempenhadas pelo fluido de perfuração. Os contaminantes podem ser do tipo sólidos, líquidos e gasosos. É importante observar que o que constitui um contaminante em um determinado tipo de fluido de perfuração pode não ser necessariamente considerado como um contaminante em outro tipo de fluido (MI SWACO, 2001).

Os problemas provocados pela contaminação do fluido de perfuração são frequentes. Essa contaminação pode ser causada por inúmeros fatores como, o uso de águas impróprias no preparo do fluido e as interações do fluido com as formações geológicas perfuradas. No primeiro caso, diferentes águas provenientes de rios, lagos e de poços, são utilizadas como fonte de água para o preparo dos fluidos, estas podem conter sais que afetam propriedades como densidade, gelificação e no controle de filtrado e reboco. No segundo caso, resumidamente, a interação fluido-rocha contribui com dissolução de sais presentes na composição das rochas. Essa dissolução provoca o aumento de íons livres, os quais prejudicam diretamente as propriedades do fluido, como a viscosidade, a floculação da dispersão hidroargilosa ou precipitação dos polímeros em solução (MADRUGA, 2012). Assim, a contaminação por sais é um fator que representa um grande problema no uso de fluidos à base de água, pois durante o processo de perfuração, o contato com determinadas formações, como os depósitos de evaporitos e os domos de sal contribuem de forma expressiva para a descaracterização das propriedades do fluido. Esses sais podem ser simples ou compostos, monovalentes ou polivalentes, sendo a halita o sal mais comum, um mineral com elevado teor de cloreto de sódio (LOMBA, 2007).

Além disso, pode-se mencionar a contaminação do fluido de perfuração pelo influxo de fluidos oriundos da formação, onde, segundo Shubert (1995), quando há uma contaminação no fluido de perfuração por um fluido da formação, pode acontecer um corte da lama, provocando uma redução da sua massa específica, que conseqüentemente pode gerar eventuais *kicks*. Essa contaminação pode ser por óleo, água ou gás oriundos da formação perfurada. O caso mais crítico ocorre no momento que o corte é feito por gás, uma vez que este pode causar uma brusca diminuição da densidade do fluido por devido a sua expansão.

2.4. Monitoramento e Controle dos Fluidos de Perfuração

Durante o processo de perfuração, os fluidos devem ser monitorados e controlados constantemente com o intuito de garantir a eficiência e segurança da operação. As propriedades mais importantes e frequentemente medidas em uma sonda são a densidade e as propriedades reológicas (DARLEY & GREY, 1988). Segundo Caenn & Chillingar (1996), além das propriedades citadas por Darley & Gray, também pode-se incluir a taxa de filtração e a salinidade.

A medição adequada das propriedades dos fluidos de perfuração é um desafio a ser alcançado, uma vez que, dependendo das condições do processo, as propriedades desses fluidos podem variar rapidamente. Essas variações são detectadas somente após a análise via testes de campo realizados de forma manual. Segundo Magalhães (2015), o processo de monitoramento e controle das propriedades dos fluidos de perfuração inicia-se com a coleta de amostras realizadas diretamente nos tanques de armazenamento de fluido. Posteriormente, essas amostras são levadas para análise laboratorial para que haja aferição de suas propriedades, nas quais, após aferidas, são realizadas as correções e adequação do fluido de acordo a necessidade atual da perfuração. O conjunto de etapas

que abrange as análises, o monitoramento e o controle das propriedades dos fluidos de perfuração é chamado/conhecido como *Mud Check*.

Thomas (2001), ainda descreve que, as propriedades intrínsecas que são utilizadas para controlar as características desses fluidos a fim de adequá-los às necessidades durante o andamento da perfuração podem ser classificadas em propriedades do tipo físicas ou químicas.

2.4.1 Atuais Técnicas de Medição

- Propriedades Reológicas

A atual técnica de medição/aferição das propriedades reológicas, como viscosidade aparente e forças gel, dos fluidos de perfuração é realizada por meio da utilização de viscosímetros. Na Figura 2.5, é possível observar o esquema do viscosímetro FANN, modelo 35 A. Este instrumento é amplamente utilizado nas sondas de perfuração brasileiras pela sua simplicidade, facilidade de operação e baixo custo de manutenção. Seu princípio de funcionamento consiste basicamente nas combinações que geram seis diferentes velocidades de rotação no cilindro externo, a saber: 3, 6, 100, 200, 300 e 600 RPM. Cada velocidade gera uma taxa de deformação diferente. Ao girar, o cilindro externo cria uma força de arraste no fluido que está confinado no espaço anular formado entre os dois cilindros. Esse arraste provocado movimenta o fluido na direção radial até que o mesmo encontra o cilindro interno, que está conectado a uma mola. O cilindro interno começa a se flexionar, e com ele a mola, proporcionalmente ao torque causado pelo fluido no cilindro. A medição é realizada por meio da leitura do valor de cada deflexão angular em cada velocidade correspondente. Para os cálculos das tensões de cisalhamento e taxas de deformação, o fabricante informa as equações necessárias, assim sendo possível encontrar a viscosidade aparente do fluido.

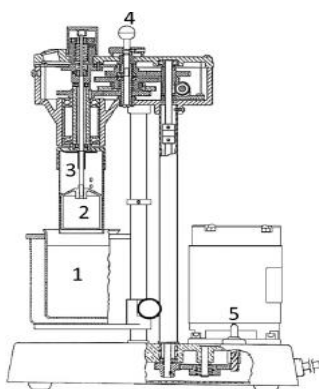


Figura 2.5. Viscosímetro FANN modelo 35^a. Fonte: Adaptado do manual FANN.

- Densidade (massa específica)

A medição da densidade dos fluidos de perfuração é atualmente realizada por meio de um equipamento chamado balança de lama. Essa ferramenta consiste essencialmente em um densímetro que se baseia no equilíbrio entre dois pesos: de um lado, o peso da amostra do fluido, e do outro, uma escala graduada e calibrada. A balança está disponível em dois modelos: o pressurizado e o sem pressão. Normalmente, o modelo pressurizado permite que o usuário injete a amostra do fluido na câmara e, sob pressão por meio de um êmbolo, reduzem-se os erros causados por aprisionamento de ar no interior do cilindro. A balança pode ser vista na Figura 2.6.

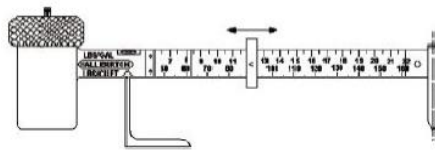


Figura 2.6. Balança de lama pressurizada (Mud Balance). Fonte: Adaptado do manual FANN.

- Estabilidade Elétrica

A técnica comumente utilizada para a aferição da estabilidade elétrica dos fluidos de perfuração à base óleo também envolve a realização de testes em bancada. Essa técnica consiste em submergir um par de eletrodos em uma amostra do fluido e forçar a quebra da emulsão por meio de uma rampa de voltagem. Essa rampa é formada pela aplicação de uma tensão senoidal entre dois eletrodos com espaçamentos e geometria conhecidas. À medida que este potencial elétrico cresce, a intensidade do campo elétrico começa a provocar rearranjos espaciais no interior do fluido. Basicamente, o teste de estabilidade elétrica tem o propósito de prever qual a tensão necessária para romper a rigidez dielétrica do fluido, o que resulta na desestabilização das fases emulsionadas. O equipamento utilizado para essa aferição é o medidor de estabilidade elétrica. Na Figura 2.7, é apresentado uma foto de um típico medidor de estabilidade elétrica, o modelo é o 23D da fabricante FANN.



Figura 2.7. Medidor de estabilidade elétrica FANN 23D. Fonte: Adaptado da Web FANN.

As técnicas de aferição mencionadas neste tópico são exemplos de que a medição de algumas propriedades dos fluidos de perfuração ainda é pouco automatizada. Considerando a importância de controlar essas propriedades durante a etapa de perfuração para aumentar a eficiência, a confiabilidade e a segurança das operações, abordagens tecnológicas se tornam um grande aliado no diagnóstico, aferição e consequentemente no controle dessas propriedades.

Com o intuito de se monitorar e controlar os fluidos de perfuração em tempo real, a lógica *fuzzy* é uma alternativa viável para controlar os processos de preparo, correção e monitoramento desse fluidos. A técnica, essencialmente, baseia-se em conhecimentos especialistas, tornando-se uma estratégia atraente, uma vez que na indústria de exploração de poços, o conhecimento das equipes de *upstream* é fundamentais para tomadas de decisões inteligentes. Reforçado por Ferraz (2019), a aplicabilidade da lógica *fuzzy* para fins de desenvolvimento de controladores para fluidos de perfuração ainda não é amplamente conhecida. No entanto, observa-se uma grande oportunidade de aplicação desta técnica, pois os controladores *fuzzy* possuem diversas aplicações e alta versatilidade

nas indústrias químicas, tornando-se um objeto de estudo para o controle de propriedades físicas e químicas dos fluidos de perfuração.

2.5 Fundamentos da Lógica *Fuzzy*

A lógica *fuzzy* foi introduzida em 1930 pelo filósofo e lógico polonês Jan Lukasiewicz. Ao estudar termos do tipo: quente, velho e alto, Lukasiewicz propôs a utilização de um intervalo [0,1] para indicar a possibilidade que uma declaração ser verdadeira ou falsa em diferentes graus.

Em 1937, o filósofo Max Black, apresentou a ideia de que a continuidade poderia ser descrita em graus. Ele definiu e descreveu o primeiro conjunto *fuzzy* e algumas ideias de operações com conjuntos *fuzzy*.

Em 1965, o Professor Lofti Zadeh publicou um artigo intitulado de *Fuzzy Sets*, que ficou conhecido como a origem da lógica *fuzzy*, pois neste artigo o autor redescobriu a ideia de fuzzyficação, identificando e definindo as ideias básicas, explorando a interseção e a inclusão da técnica (ZADEH, 1965). A partir disso, Zadeh ficou conhecido como uma das maiores referências da lógica *fuzzy*.

A teoria de subconjuntos *fuzzy* nasceu da observação de que, à medida que a complexidade de um sistema aumenta, a capacidade de tirar conclusões precisas e, ao mesmo tempo significativas tende a diminuir, chegando a um ponto em que a precisão e a relevância se tornam quase que mutuamente exclusivas (CAMPOS & SAITO, 2004).

A lógica *fuzzy* baseia-se na teoria dos conjuntos *fuzzy*, onde Zadeh (1965), afirma que, a base da lógica reside na possibilidade de flexibilizar os critérios que definem a pertinência de dado elemento em relação a um determinado conjunto. A teoria dos conjuntos *fuzzy* é o fundamento de toda teoria de sistemas *fuzzy* e consiste numa extensão da teoria clássica de conjuntos.

A teoria da lógica *fuzzy* parte da ideia de que todas as coisas podem admitir graus de pertinência. Isso significa que, uma proposição pode ser além de verdadeira ou falsa (lógica clássica: booleana), adquirindo características do tipo parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa, assim assumindo um grau de verdade que varia entre os valores de [0,1]. Esse grau de “verdade” é chamado como grau de pertinência e indica em que medida e/ou grau um elemento é pertencente a um conjunto.

2.5.1 Conjuntos *Fuzzy*

Um conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma função característica, conhecida com função de pertinência, no qual a transição de não-pertinência para pertinência é gradual, não abrupta, e varia dentro de um intervalo entre zero e um (ZADEH, 1965). Na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto é simples de ser compreendida, pois os valores de pertencimentos são definidos como 0 ou 1. O exemplo abaixo expressa um exemplo básico da teoria de um conjunto clássico (booleano):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases}$$

Um conjunto *fuzzy* pode ser interpretado como o meio que liga um conceito impreciso à sua modelagem numérica, atribuindo a cada elemento do universo um valor entre os intervalos [0,1], que representa o grau de pertinência desse elemento ao conjunto *fuzzy* (ZADEH, 1965). A lógica *fuzzy* pode ser considerada como uma generalização da lógica booleana, estendendo-se para lidar com a

noção de verdades parciais. Num conjunto *fuzzy*, cada função de pertinência (função característica) representa um conjunto *fuzzy*, A , de um universo de discurso, X , por meio da atribuição de um grau ou nível de pertinência.

A lógica *fuzzy* é uma das melhores ferramentas para analisar dados que são vagos ou subjetivos. Por exemplo, o item *iv* abaixo, ao contrário dos itens *i*, *ii*, possui valor diferente de zero e um, onde a lógica *fuzzy* caracteriza-se por atribuir graus ou níveis de pertencimento a um elemento x num universo A .

- i)* $\mu_A(x) = 1$ - Descreve que x pertence completamente a A .
- ii)* $\mu_A(x) = 0$ - Descreve que x não possui nenhum grau de pertencimento a A .
- iii)* $0 < \mu_A(x) < 1$ - Descreve que x pertence parcialmente em A .
- iv)* $\mu_A(x) = 0,7$ - Descreve que 30% de x não pertence a A e 70% pertence parcialmente.

Segundo Marro (2010), os conjuntos *fuzzy* permitem a representação de conceitos ambíguos expressos em uma linguagem natural. Sua representação depende não apenas do conceito em si, mas também do contexto em que serão utilizados.

Frequentemente, muitos conjuntos *fuzzy* são empregados para definir o estado de uma variável, estes conceitos são chamados de variáveis linguísticas. Esses conceitos podem ser expressos de inúmeras formas, exemplo a Figura 2.8, onde a temperatura para um determinado processo pode tomar como variáveis linguísticas os termos alta, média e baixa.

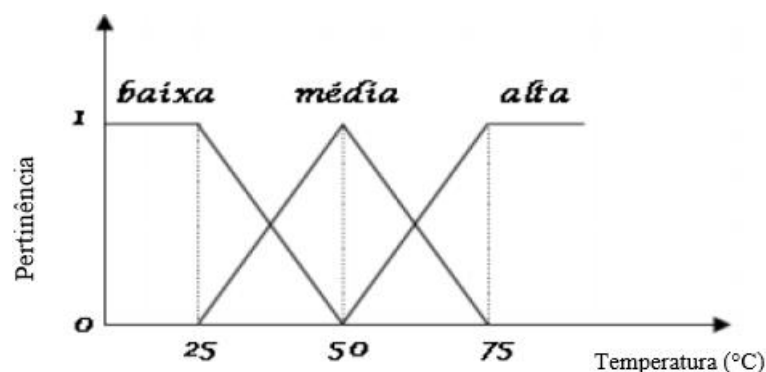


Figura 2.8. Pertinência para a variável temperatura. Fonte: Adaptado de COSTA, 2007.

O primeiro passo na representação de conjuntos *fuzzy* é a escolha da função de pertinência. Essa escolha depende do problema a ser delineado e da capacidade computacional para o processamento desejado. As funções de pertinência podem ter várias formas geométricas, como triangular, trapezoidal, gaussiana, sino, sigmoideal, entre outras. As funções de pertinência definem a forma como cada ponto no espaço do universo de discurso é relacionado ao grau de pertinência no intervalo $[0,1]$.

Vale ressaltar que as funções de pertinência podem assumir inúmeras formas e diferentes geometrias, cabendo ao projetista a seleção mais adequada para a resolução de sua aplicação. A seguir, são apresentadas algumas funções de pertinência e suas representações matemáticas:

- **Triangular**

Para a função de pertinência triangular os temos a , b e c , ilustrados na Figura 2.9, são parâmetros escalares que representam os vértices do triângulo.

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (1)$$

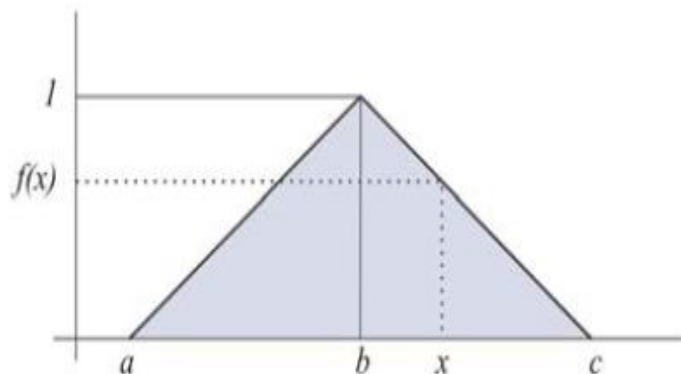


Figura 2.9. Função de pertinência triangular. Fonte: Adaptado de BARBOSA, 2011.

- **Gaussiana**

Apresentada pela Figura 2.10 e definida pela equação (2), a função de pertinência gaussiana tem dois parâmetros na sua equação, sendo a média (b) e o desvio padrão (σ).

$$f_A(x) = \exp \left[\frac{-(x-b)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2)$$

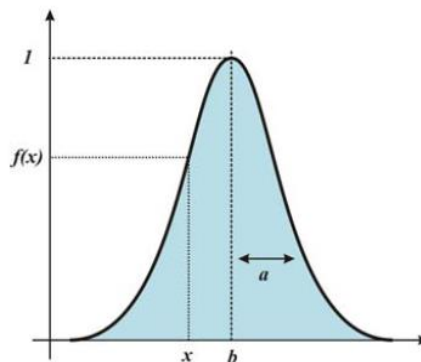


Figura 2.10. Função de pertinência Gaussiana. Fonte: Adaptado de BARBOSA, 2011.

- **Trapezoidal**

A Figura 2.11 ilustra a função de pertinência trapezoidal, na qual os temos a , b , c e d são os quatros parâmetros que representam os vértices do trapézio.

$$f_A(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 1, & c \leq a \end{cases} \quad (3)$$

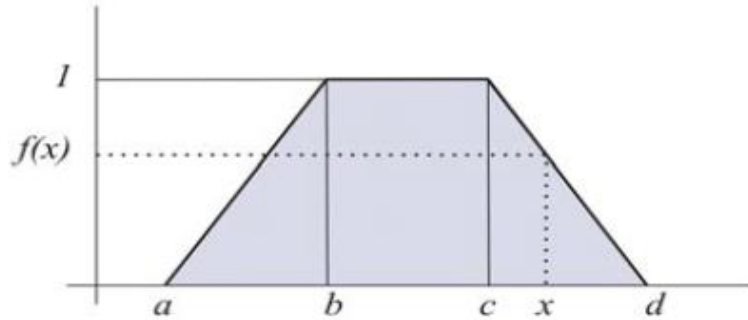


Figura 2.11. Função de pertinência trapezoidal. Fonte: Adaptado de BARBOSA, 2011.

- **Trapezoidal aberta**

A função de pertinência trapezoidal também pode ser subdividida em partes, sendo elas funções que representam aberturas em regiões à direita e à esquerda do trapézio. Na equação abaixo, é apresentado o modelo matemático da função trapezoidal aberta à direita, no qual os parâmetros da equação são os termos a e b apresentados na Figura 2.12 a seguir.

$$f_A(x, a, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \left(\frac{x-a}{b-a}\right), & a \leq x \leq b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (4)$$

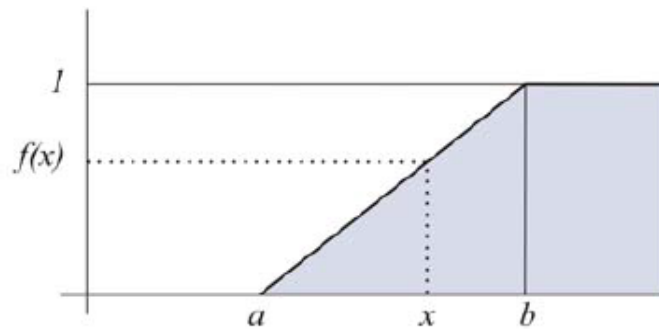


Figura 2.12. Função de pertinência trapezoidal aberta a direita. Fonte: Adaptado de BARBOSA, 2011.

Quando aberta a esquerda (Figura 2.13), a função de pertinência trapezoidal é representada da seguinte forma.

$$f_A(x, a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - \left(\frac{x-a}{b-a}\right), & a \leq x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (5)$$

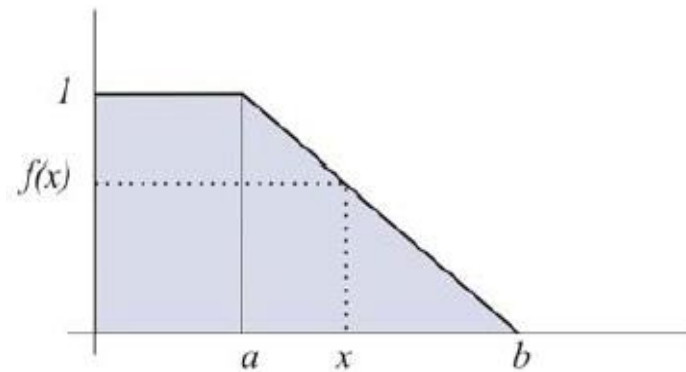


Figura 2.13. Função de pertinência trapezoidal aberta a esquerda. Fonte: Adaptado de BARBOSA, 2011.

2.5.2 Controladores Baseados em Lógica Fuzzy

Os controladores baseados em lógica *fuzzy* não necessitam de um modelo analítico ou dinâmico do processo no qual se deseja controlar. Eles calculam suas ações por meio de uma base de conhecimento heurística sobre como controlar este processo, o qual, por sua vez, pode ser complexo, pouco conhecido e incerto (BERENJI, 1993).

Um sistema especialista clássico tem necessidade de uma regra para cada situação. Contudo, um sistema de controle baseado na lógica *fuzzy* permite generalizar e inferir dentro do universo de referência de cada variável controlada. O controlador *fuzzy* pode, desta forma, considerar vários critérios de desempenho concomitantemente, que podem ser expressos de forma matemática ou mesmo escrito em linguísticas (CAMPOS & SAITO, 2004).

Ainda segundo Campos & Saito (2004), os controladores *fuzzy* tem por objetivo: i) Controlar e operar automaticamente processos simples, complexos, não-lineares e multivariáveis; ii) Possuir bom desempenho ou pelo menos equivalente ao dos operadores; iii) Ser simples e robusto operando em tempo real; e iv) Respeitar as especificações e restrições operacionais.

A configuração básica de um controlador *fuzzy* é constituída dos seguintes blocos funcionais apresentados na Figura 2.14;

- Fuzzificação;
- Base de Conhecimento;
- Inferência;
- Defuzzificação.

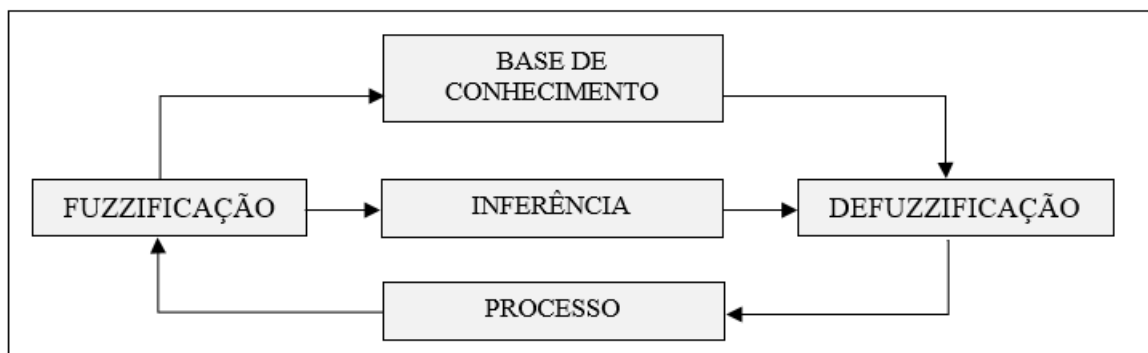


Figura 2.14. Arquitetura de um controlador *fuzzy*. Fonte: Autor, 2024.

2.5.2.1 Fuzzificação

A fuzzificação é um processo que converte as entradas, frequentemente grandezas contínuas no domínio dos números reais, para o domínio *fuzzy*. Em outras palavras, a interface de fuzzificação é responsável por converter as variáveis do domínio real (ou seja, os valores medidos no processo) em variáveis do domínio *fuzzy*, que utiliza os números difusos. Os sinais de entrada da interface de fuzzificação, proveniente de sensores ou dispositivos computadorizados, são escalonados para um universo pré-definido. Nessa etapa, cada variável de entrada é transformada em instâncias de variáveis linguísticas.

No processo de fuzzificação, as funções de pertinência contidas na base de conhecimento são utilizadas para converter os sinais de entrada em valores dentro de um intervalo vertical $[0,1]$, que podem estar associados a rótulos linguísticos. Normalmente, a escolha do número de valores linguísticos é feita de forma heurística (CAMPOS & SAITO, 2004).

2.5.2.2 Base de Conhecimento

Segundo Silva (2009), a base de conhecimento de um controlador *fuzzy* representa o modelo do sistema a ser controlado. Ela é composta por uma base de dados e uma base de regras *fuzzy*, que juntas caracterizam a estratégia de controle. Campos & Saito (2004), ainda reforçam que a base de conhecimento de um controlador *fuzzy* é o “cérebro” do sistema, onde está localizada a sua inteligência.

A base de dados contém as definições e as informações numéricas e linguísticas essenciais para as funções de pertinência aplicadas no conjunto de regras *fuzzy* (SHAW & SIMÕES, 1999).

Já a base de regras *fuzzy* possui uma estrutura conforme o modelo apresentado abaixo, onde a utiliza-se o termo “Se” para a condição antecedente e “então” como consequente.

Se < antecedente 1 > então < consequente >

Exemplos:

- 1- Se<condutividade do fluido: alta > então <Dosagem de água: Alto >
- 2- Se<condutividade do fluido: baixa > então <Dosagem de sal: Alto >
- 3- Se<condutividade do fluido: muito baixa > então <Dosagem de sal: Muito alto>

Para a construção da base de regras para sistemas do tipo MIMO (Multiple Input Multiple Output), comumente utilizam-se operadores lógicos “e” e “ou” nas variáveis linguísticas do antecedente e do consequente.

2.5.2.3 Inferência ou Raciocínio Fuzzy

Esta é a etapa de um sistema de controle *fuzzy*, no qual são realizadas as tomadas de decisões. A lógica de tomada de decisões está incluída na estrutura de inferência da base de regras e simula tomadas de decisão humanas por meio de implicações *fuzzy*. A partir de um conjunto de condições de entrada, o sistema produz ações de controle de acordo com o estado do sistema, aplicando o operador de implicação, conforme o procedimento de inferência adotado (SHAW & SIMÕES, 1999).

Na literatura da área, os principais métodos de inferência para controladores baseados em lógica difusa são os métodos clássicos e métodos de interpolação. Os métodos clássicos mais comuns incluem os de Mamdani e Larsen, enquanto o método de interpolação mais utilizado é a técnica de Takagi-Sugeno. Basicamente, nos modelos clássicos, a conclusão de cada regra especifica um termo

difuso dentro de um conjunto fixo de valores. Geralmente, esses termos são representados por conjuntos *fuzzy*, cada um possuindo sua própria função de pertinência. Com isso, uma ação de controle mais adequada é escolhida num processo chamado de defuzzificação (SHAW & SIMÕES, 1999).

Diferentemente dos métodos clássicos, os controladores *fuzzy* que utilizam como método de inferência as técnicas de interpolação não necessitam do processo de defuzzificação, pois para estes modelos, a ação de controle é obtida por meio de uma média ponderada dos valores individuais, em que cada peso é o próprio grau de compatibilidade entre a premissa da regra de controle e as entradas. Em outras palavras, neste tipo de controlador, o processo de defuzzificação não é utilizado (SANDRI & CORREIA, 1999).

2.5.2.4 Defuzzificação

Na defuzzificação, o valor da variável linguística de saída inferida pela regras *fuzzy* será traduzido num valor discreto, no qual possa ser utilizável numa ação de controle concreta no mundo real. Os objetivos é obter-se um único valor numérico que melhor represente os valores *fuzzy* inferidos da variável linguística de saída. Assim, a defuzzificação é a transformação inversa que traduz a saída do domínio *fuzzy* para o domínio numérico da aplicação (BARBOSA, 2011).

Existem diversas opções de métodos de defuzzificação. Dentre os métodos comumente empregados, podemos citar os métodos do centro de área, método do centro máximo e o métodos da média dos máximos.

O método do centro de área (C-o-A), também conhecido de método de centro de gravidade, calcula o centroide da área composta que representa o termo de saída *fuzzy*. O centroide é o ponto que divide determinada área em duas partes equivalentes. A defuzzificação pelo método do centro de área é dada pela equação (7), onde, A_i , n e c_i são o número de níveis de quantização da saída da posição do centroide função de pertinência individual e o valor discreto do grau pertinência.

$$\text{defuzzificação} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (7)$$

O método pelo centro média (C-o-M) é calculado como uma média dos máximos das funções de pertinência de saída. A defuzzificação por este método é dada pela equação (8), em que μ_i , n , Max_i representam, respectivamente, o número de níveis de quantização da saída, o valor inferido para a pertinência da varável de saída e o ponto máximo da função de pertinência.

$$\text{defuzzificação} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot Max_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (8)$$

O método de defuzzificação pela média dos máximos (M-o-M), demonstrado na equação (9), é calculado como a média dos máximos das funções de pertinência da saída.

$$\text{defuzzificação} = \sum_{i=1}^n \frac{Max_i}{n} \quad (9)$$

2.6 Estado da Arte da Aplicação da Lógica Fuzzy

Nos subtópicos seguintes, são apresentados alguns trabalhos que demonstram a versatilidade de controladores baseados em lógica *fuzzy*. É apresentada a utilização da técnica em vários processos na indústria de óleo e gás, com foco especial para as áreas de exploração e produção de poços. Em seguida, é abordado o estado da arte para técnica de controle *fuzzy* aplicada na correção de propriedades dos fluidos de perfuração.

2.6.1 Controladores Fuzzy na Indústria de Exploração e Produção de Petróleo

Amado (2008) realizou o projeto de um sistema para o controle de aquecimento em uma linha de medição de vazão e *BS&W* (teor de água e sedimentos no petróleo bruto), utilizando um controlador *fuzzy*-PI. Tendo em vista que a temperatura é uma das variáveis que exercem grande influência na medição de vazão e *BS&W*, o objetivo principal do autor foi avaliar a técnica de controle numa planta piloto por meio do comparativo com um controlador PID auto sintonizável. Como resultados, autor ressalta a robustez e eficiência do controlador *fuzzy*-PI implementado, pois para ambas as alternativas (controle por meio de resistências e por trocador de calor), a técnica demonstrou maior eficiência para o processo de aquecimento da linha, reduzindo o tempo resposta do sistema para todos os casos em comparativo com o controlador clássico auto adaptativo.

Gajate *et al.* (2010) apresentaram um projeto e a aplicação de um método de inferência neuro-*fuzzy* para controlar a força aplicada sobre uma broca em um processo de perfuração de alto desempenho. O objetivo principal foi analisar e verificar o comportamento do sistema desenvolvido por meio de simulações computacionais com dados reais (força de perfuração *vs* tempo) e realizar uma comparação entre as técnicas neuro-*fuzzy* e *fuzzy*-adaptativo. Os autores obtiveram resultados que demonstraram que o sistema de controle proposto (neuro-*fuzzy*) fornece uma boa resposta, com baixo overshoots, menores tempos de resposta e melhores índices de desempenho baseados nos métodos do erro absoluto ponderado e do erro quadrático ponderando quando comparado com o controlador *fuzzy*-adaptativo, efetivando que essa abordagem é superior à adaptativa.

Qi *et al.* (2011) aplicaram um algoritmo de agrupamento em nuvem para determinar a previsão de acidentes durante a perfuração de poços de petróleo. Nesse artigo, os autores buscaram estabelecer uma nova função de adesão chamada de “função normal de adesão à nuvem” para duas variáveis críticas no sistema de previsão de acidentes (*kicks*), sendo elas as mudanças no volume total e da taxa de fluxo do fluido de perfuração, por meio de um algoritmo de agrupamento baseado em lógica difusa chamado de *fuzzy*-c-means. Os resultados computacionais demonstraram que a técnica proposta é benéfica. Além de implementar um sistema que se baseia nos conhecimentos dos operadores de campo, a ferramenta tem o potencial para auxiliar a tomada de decisões no local de trabalho, especialmente considerando que a previsão de *kicks* é um número aleatório unidimensional que reflete a incerteza de acidentes durante o processo de perfuração.

Costa (2012) propôs um sistema capaz de controlar em tempo real a operação de bombas centrífugas submersas em poços produtores de petróleo, com base nas regras de pertinência de um controlador *fuzzy*. As simulações foram realizadas por meio de modelos computacionais implementados em Ladder que foram incorporados a um simulador numérico e a um simulador físico (poço). Os resultados demonstraram que o controlador *fuzzy* aplicado à técnica de elevação de petróleo em processos por meio de bombeamento mecânico centrífugo submerso é eficiente para aplicações em poços onshore, pois o controlador conseguiu manter a bomba operando dentro das faixas recomendadas, evitando condições operacionais indesejadas, como paradas, interferência de gás e a

elevação da temperatura do motor. Além da técnica permitir o auxílio para o aumento do potencial produtivo do poço e a redução de custo da operação, o autor também construiu um sistema supervisorio para monitoramento das simulações. O trabalho desenvolvido resultou num pedido de patente, tendo em vista que até o presente momento os algoritmos desenvolvidos para a técnica BCS não tratavam o controle da vazão compensando incertezas do processo, limitando a submergência de operação das bomba a valores mínimos.

Ahamed *et al.* (2016) apresentaram o projeto e o desenvolvimento de um controlador *fuzzy* para compor um sistema de perfuração inteligente durante a Conferência Internacional de Controle Automático e Sistemas Inteligentes, realizada em Selangor, Malásia. O objetivo desse projeto foi selecionar o parâmetro de corte com mais precisão durante as operações de perfuração em poços de petróleo. Especificamente, no projeto do controlador, foram considerados diferentes critérios de entrada, incluindo parâmetros de usinagem, como a dureza da ferramenta e do material, o diâmetro do poço e a vazão do fluido de perfuração. Todas as simulações do controlador foram realizadas por meio da caixa de ferramenta MATLAB-*Fuzzy Logic*. Os parâmetros de saída do controlador transmitiram informações sobre a velocidade do fuso e a taxa de avanço com mais precisão, tornando a implementação do sistema viável para otimizar as operações de perfuração.

Laib *et al.* (2022) apresentaram um sistema de controle aplicado a de colunas de perfuração para evitar problemas como aprisionamento de broca e vibração de deslizamento, utilizando um controlador híbrido do tipo *fuzzy*-PID. O algoritmo desenvolvido pelos autores teve por finalidade regular as velocidades rotativas dos componentes da coluna de perfuração, em especial a velocidade da mesa rotativa e a da broca, para valores pré-definidos. No sistema em questão, é abordado um modelo de coluna com quatro graus de liberdade nas partes do fundo do poço, considerando as interações não lineares da broca e das rochas, incluindo o torque de fricção e o efeito do avanço da perfuração no fluido de perfuração. Foram realizadas extensas simulações em Matlab/Simulink e validações experimentais por meio de um sistema hardware in the loop (HIL) em tempo real para demonstrar a eficácia do controlador sugerido em comparação aos controladores PID. A comparação quantitativa realizada, utilizando resultados de simulação, prova que o controlador proposto fornece um melhor desempenho de controle em termos de tempo de acomodação e ultrapassagem de pico sob variação do peso na broca, da velocidade rotativa desejada da broca e do tratamento de incertezas paramétricas.

Siqueira (2022) desenvolveu um sistema especialista utilizando lógica *fuzzy* para prevenir do aprisionamento de colunas de perfuração durante a etapa de perfuração. Nesse sistema, foram aplicadas as características (*features*) derivadas das variáveis do processo, a partir das quais, o trabalho utilizou dados de quatorze casos de aprisionamento de coluna e em quatro diferentes poços que se encontram na costa brasileira. A técnica desenvolvida alcançou uma precisão de 80% na detecção de aprisionamento de coluna, demonstrando sua eficácia, considerando que em 92% dos casos, os operadores teriam tempo suficiente para evitar o aprisionamento utilizando o sistema proposto.

2.6.2 Controladores *Fuzzy* Aplicados a Fluidos de Perfuração

O monitoramento automatizado das propriedades físico-químicas em fluidos de perfuração é, relativamente, uma tecnologia nova aplicada em processos de perfuração de poços. A Noruega é um dos principais polos de pesquisa com relevantes aplicações tecnológicas voltadas para essa temática. Em 2009 foi divulgado por Saasen *et al.* (2009) que um grupo norueguês desenvolveu uma série de

sensores para a medição em tempo real de algumas propriedades em fluidos de perfuração de forma experimental, pode-se destacar as medições com sucesso da densidade, viscosidade aparente, volume de filtrado, pH, concentração de H_2S , entre outros. Embora a medição dessas propriedades sejam algo prematuro, pouco ou quase nada foi desenvolvido envolvendo estratégias de controle para correção ou ajuste dessas variáveis.

Yue *et al.* (2011) publicaram na Oitava Conferência Internacional de Descoberta e Conhecimento de Sistemas *Fuzzy*, em Xangai, um cenário de projeto que apresenta um sistema especialista que utiliza inteligência artificial (lógica *fuzzy*), para resolver o projeto de fluidos de perfuração. O trabalho proposto pelos autores é um dos primeiros a apresentar uma espécie de técnica de armazenamento de regras que pode resolver a questão da composição entre o antecedente e o consequente de regras na produção de fluidos de perfuração. O sistema desenvolvido leva em consideração em sua base de conhecimento um banco de dados de parâmetros geológicos e a geometria do determinado estágio específico no qual o poço se encontra. Assim, o fluido proposto pelo sistema tem a finalidade de compensar a deficiência do projeto manual e otimizar as tomadas de decisão durante as etapas de perfuração de forma eficaz.

No Brasil, poucos foram os trabalhos relacionados à medição em tempo real das propriedades físicas e químicas em fluidos de perfuração. Magalhães (2015), com base no projeto de apresentado por Magalhães *et al.* em (2014), apresentou um trabalho no qual realizou o desenvolvimento de um sistema de aferição para algumas propriedades em fluidos de perfuração de forma automatizada. Essas propriedades incluem a viscosidade aparente, a densidade, a estabilidade elétrica, condutividade elétrica, o teor de água em óleo e a concentração de sólidos suspensos. A técnica desenvolvida se mostrou eficiente abrindo inúmeras possibilidades para monitoramento online de fluidos de perfuração, pois além do comparativo com testes experimentais em bancada a técnica foi avaliada em campo utilizando uma unidade experimental construída no Laboratório de Escoamento de Fluidos da UFRRJ (LEF/UFRRJ) denominada de UMPC (Unidade Móvel de Pesquisa Científica). Com essas contribuições, tendo em vista a possibilidade do monitoramento experimental das propriedades de fluidos de perfuração de forma online, deu-se início no LEF/UFRRJ o desenvolvimento de novos trabalhos não apenas para o monitoramento de novas propriedades de interesse, mas também para o desenvolvimento de estratégias de correção forma inteligente e automatizada.

Radich (2018) propôs a implementação de um controlador híbrido utilizando lógica *fuzzy-PI* para a correção da densidade em fluidos de perfuração. A estratégia de controle desenvolvida pelo autor foi testada e avaliada frente ao controlador ao PI em uma unidade experimental de preparo e monitoramento de fluidos de perfuração (UNIPAF) do LEF/UFRRJ, onde o objetivo do seu estudo foi realizar o controle da densidade de fluidos de perfuração, por meio da adição de água e barita ($BaSO_4$) em testes dos tipo servo e regulatório. Os resultados obtidos evidenciaram o ótimo desempenho do controlador *fuzzy-PI* com um comportamento dinâmico estável, visto que apresentou baixos *overshoots* e, conseqüentemente, menores consumos de insumos para a correção do fluido, tornando essa técnica um potencialidade para esse tipo de problema.

Ferraz *et al.* (2019), dando continuidade ao trabalho de Radich (2018) também no LEF/UFRRJ, apresentaram uma proposta de modelagem e controle da viscosidade aparente em soluções de água e carboximetilcelulose para simular o comportamento dessa propriedade em fluidos de perfuração. Este estudo de caso foi conduzido utilizando a estratégia de controle baseado em lógica *fuzzy*. O controlador desenvolvido foi testado através de uma unidade experimental manipulando a

adição de água e carboximetilcelulose (biopolímero viscosificante) em testes do tipo servo e regulatório. A técnica apresentada demonstrou a efetividade da lógica *fuzzy* no controle de viscosidade em tempo real em fluidos de perfuração, absorvendo os problemas causados pelas perturbações no sistema, fazendo com que a variável controlada estivesse estável, e retornando para faixa do set point desejado.

Um outro trabalho de pesquisa desenvolvido no LEF/UFRRJ, também utilizando lógica *fuzzy*, foi apresentado por Mello em (2022). O autor realizou a modelagem e o controle simultâneo da densidade e da viscosidade aparente em fluidos de perfuração. Para avaliação do desempenho da técnica desenvolvida, o autor realizou testes do tipo servo e regulatório frente a um controlador PID multivariável. Para a variável controlada densidade, as correções foram realizadas por meio da manipulação da adição de calcita (CaCO_3) e barita (BaSO_4) no sistema, aditivos estes utilizados como materiais adensantes, e pela adição de água. Já para os testes de viscosidade, foram realizadas correções por meio da adição de carboximetilcelulose e ajustes com a dosagem de água. Os resultados obtidos demonstraram que o controlador *fuzzy* alcançou resultados superiores em relação ao controlador PID multivariável, apresentando ser uma estratégia menos oscilatória e revelando-se uma fermenta baseada em uma técnica de inteligência artificial com grande potencialidade para o controle multivariável envolvendo processos de correção automatizada de fluidos de perfuração.

Tendo em vista a importância da manutenção das propriedades dos fluidos de perfuração, torna-se evidente o quão crucial é o monitoramento e o controle das inúmeras propriedades que esses fluidos devem apresentar durante o processo de perfuração. No entanto, até o presente momento, embora a estratégia *fuzzy* tenha sido adotada em diversificadas aplicações, poucos foram os trabalhos realizados com o foco no desenvolvimento de controladores multivariáveis para a correção das propriedades dos fluidos de perfuração. Também vale ressaltar que nada ou pouco consta na literatura sobre o potencial do monitoramento e controle da variável condutividade elétrica em fluidos de perfuração.

2.6.3 Patentes e Inovação

Foram conduzidas buscas por patentes relacionadas aos termos “*Fuzzy Control*” e “*Drilling Fluids Control*” aplicados à indústria do petróleo, com foco nas áreas de controle de propriedades físico-químicas em fluidos de perfuração. As buscas foram realizadas nos bancos de dados do INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial), Latipat (base de dados de patentes publicadas por entidades da Espanha e América Latina) e Espacenet (depósito de patentes e pedidos de patentes Europeias). Contudo, até o presente momento, observou-se que nada é retornado desses bancos de dados sobre patentes que usam técnicas de controle aplicadas a fluidos de perfuração em tempo real por meio de controladores *fuzzy* multivariáveis.

CAPÍTULO 3

Resumo: Neste capítulo, apresenta-se a metodologia experimental utilizada para a determinação e o controle da condutividade, densidade e viscosidade aparente em fluidos de perfuração. São detalhadas a unidade experimental, seus equipamentos e sua instrumentação, os materiais utilizados, os métodos de caracterização e, por último, o planejamento experimental abordado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Unidade Experimental

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi realizado no Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani, LEF/UFRRJ. Para a avaliação da técnica de controle desenvolvida neste trabalho, foram utilizadas as plantas experimentais que realizam o preparo e o monitoramento de fluidos de perfuração de forma automática.

Apresentando um breve histórico, a Unidade Experimental de Preparo de Fluidos de Perfuração (UNIPAF) do Laboratório de Escoamento de Fluidos da UFRRJ foi montada e tem sido adaptada e aprimorada na medida das necessidades impostas pelos trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do LEF/UFRRJ.

O trabalho pioneiro no uso do controle fuzzy foi o de Radich, em (2018), que realizou modificações na UNIPAF para adaptá-la a estudos sobre o controle da densidade em fluidos de perfuração de maneira automática. Foram adicionados um tanque de mistura, uma moega vibratória (dosadora de sólidos), uma bomba dosadora de água e um sensor de nível.

Em 2019, Ferraz adaptou a UNIPAF para que houvesse a possibilidade do controle fuzzy da viscosidade aparente em fluidos de perfuração, por meio da adição de CMC (carboximetilcelulose) pela moega vibratória como material viscosificante, e como diluente, a adição de água. Vale destacar que este trabalho também contribuiu para o desenvolvimento de um viscosímetro tubular, a instalação de um medidor de vazão, além da inclusão de um circuito de tubulações para a circulação de fluido a fim de operacionalizar e viabilizar a instalação do viscosímetro.

Na sequência, Mello (2022), instalou mais uma moega vibratória e revisou toda parte elétrica, mecânica e hidropneumática da unidade para desenvolver outra aplicação de controle para de fluidos de perfuração. Para este trabalho, foram revisados o funcionamento de toda a instrumentação das unidades. A Figura 3.1 apresenta o diagrama de processo P&ID, ilustrando os equipamentos e as instrumentação presente na UNIPAF. As siglas dos respectivos instrumentos estão descritas na Tabela 3-1.

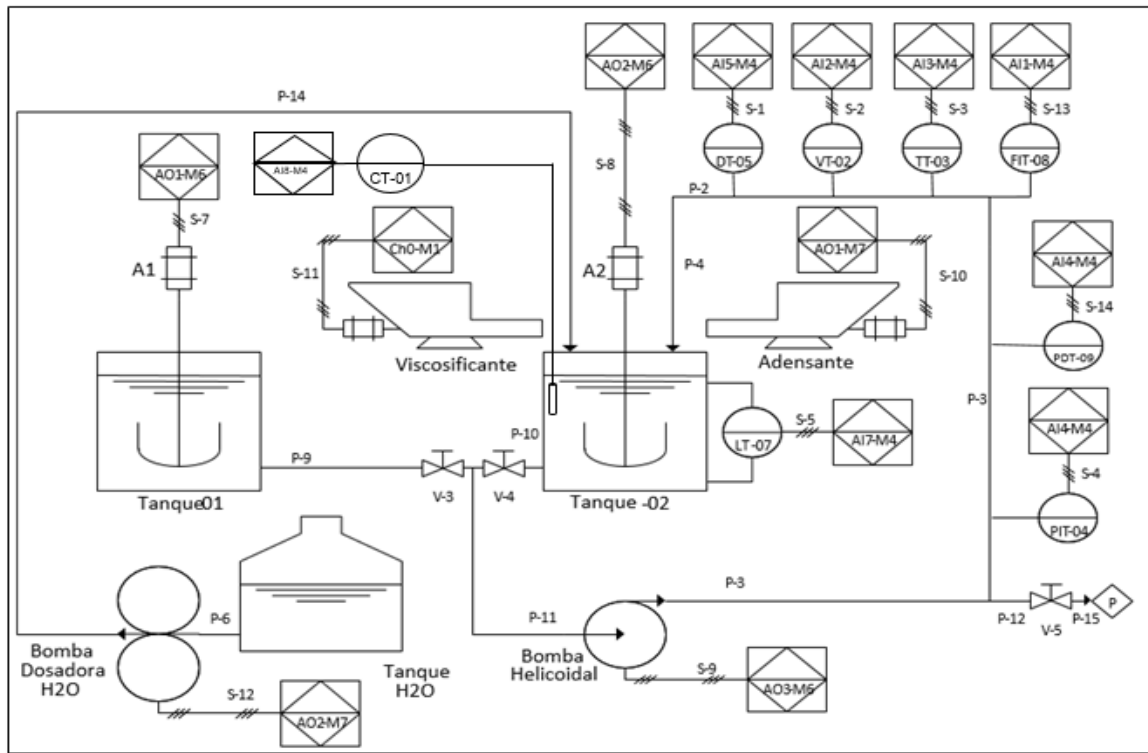


Figura 3.1. Diagrama P&ID- UNIPAF atualizada.

Fonte: Adaptado de Mello, 2022.

Tabela 3-1. Instrumentos da Unidade Experimental de Preparo de Fluidos. Fonte: Autor, 2024.

LISTA DE INSTRUMENTOS	
<i>Sigla</i>	<i>Descrição</i>
A1	Agitador do tanque pulmão
A2	Agitador do tanque de preparo de fluido
Adensante	Dosadora de sólidos
Viscosificante	Dosadora de sólidos
DT-05	Transmissor de densidade
LT-07	Transmissor de nível
SE-604	Sensor de condutividade
PIT-04	Transmissor de pressão
TT-03	Transmissor de temperatura
PT-02	Transmissor de pressão
FIT-08	Transmissor indicador de vazão
PDT-09	Transmissor diferencial de pressão
V-3	Válvula pneumática
V-4	Válvula pneumática
V-5	Válvula pneumática

A medição das propriedades condutividade elétrica, densidade e viscosidade aparente foram realizadas pela Unidade Móvel de Pesquisa Científica (UMPC), que contém os instrumentos que

realizam o monitoramento tempo de real das propriedades físico-químicas de fluidos de perfuração. A Figura 3.2 apresenta o diagrama P&ID da UMPC e a Tabela 3-2 a lista de sua instrumentação.

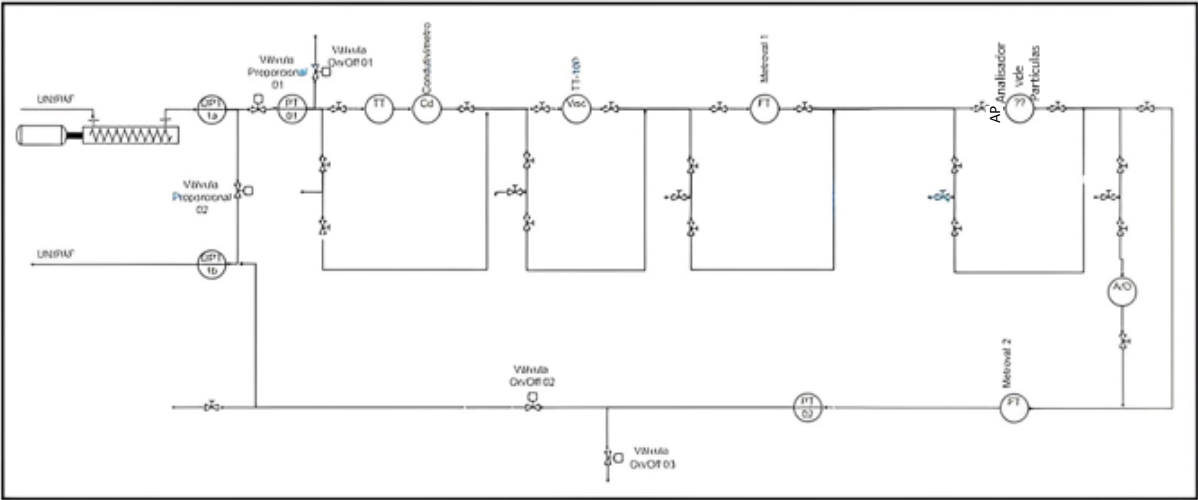


Figura 3.2. Diagrama P&ID- UMPC.
Fonte: Adaptado de Mello, 2022.

Tabela 3-2.Instrumentos da Unidade Móvel de Pesquisa Científica. Fonte: Autor, 2024.

LISTA DE INSTRUMENTOS	
<i>Sigla</i>	<i>Descrição</i>
PT	Transmissor de pressão
TT	Transmissor de temperatura
FT	Medidor de Vazão
PT-02	Transmissor de pressão
CT-01	Transmissor de condutividade
DPT	Transmissor de pressão diferencial
AP	Analisador de Partículas
TT-100	Viscosímetro coaxial
CT-01	Transmissor de condutividade
A/O	Medidor de razão água/óleo
V-1	Válvula proporcional
V-2	Válvula proporcional
V-3	Válvula pneumática

3.1.1 Instrumentação e Atuadores

Nesta seção, descrevem-se os instrumentos utilizados na unidade experimental, bem como os atuadores que foram empregados para o desenvolvimento deste estudo.

I. Tanque de mistura

A unidade experimental de preparo de fluidos, UNIPAF, possui um tanque misturador (Figura 3.3) com volume de 120 litros, utilizado para o preparar e homogeneizar os fluidos de perfuração formulados e/ou corrigidos. Este tanque misturador possui, na parte superior, duas entradas com ¾ de polegada, uma destinada para o retorno do fluido que circula a unidade de medição e outra para a

alimentação de água no sistema. Na parte inferior do tanque, também estão presentes duas saídas de 1 polegada, uma para sucção do fluido por ação de uma bomba helicoidal e outra para a purga ou descarte do fluido.



Figura 3.3. Tanque Misturador.
Fonte: Autor, 2024.

II. Agitador

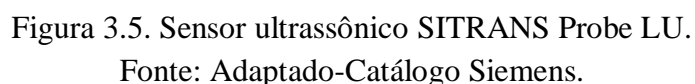
Para obter fluidos mais homogêneos e uniformes, o tanque de mistura mencionado anteriormente está equipado com um agitador mecânico (Figura 3.4) do fabricante MIXTURA Equipamentos Hidráulicos Ltda., modelo MIX159L, composto por um motor elétrico da fabricante WEG com uma potência 0,5 cavalos.



Figura 3.4. Agitador mecânico MIX159L.
Fonte: Adaptado-Catálogo MIXTURA Ltda.

III. Medidor de nível

O tanque de mistura também é equipado com um sensor ultrassônico para medir nível o nível de fluido no interior do tanque. O modelo utilizado foi o Sitrans Probe LU 7ML5221-28A11 (Figura 3.5) com saída analógica. O sensor está acoplado na parte superior do tanque através de uma conexão em rosca.



A UNIPAF possui uma bomba helicoidal de deslocamento positivo com uma rotação de 1700 rpm (Figura 3.6). Esta bomba é fabricada pela Weatherford e motor produzido pela Metalcorte, com potência de 1,5 cavalos. Essa bomba é responsável por circular o fluido em loop fechado com o objetivo de permitir a medição das propriedades condutividade, densidade e viscosidade aparente.



Para a leitura da densidade dos fluidos que circulam na linha de preparo e monitoramento, são utilizados medidores mássicos baseados no princípio de Coriolis fabricado pela empresa Metroval. O modelo utilizado é o RHM20 (Figura 3.7) e possui saída analógica. A unidade inclui duas unidades desses dispositivos: uma para medir a densidade, mencionada anteriormente, e outra para medir da vazão. Isso se deve ao fato de que, nos testes, a vazão de circulação do fluido é controlada.



VI. Viscosímetro

A medição da viscosidade aparente dos fluidos de perfuração foi realizada por meio de um viscosímetro coaxial Brookfield (Figura 3.8) presente na Unidade Móvel de Pesquisa Científica, UMPC. O viscosímetro foi modificado pelos pesquisadores do LEF/UFRRJ em 2017 para ampliar a faixa de medição. Essencialmente, o motor do viscosímetro foi substituído; no entanto, a geometria interna do instrumento (coaxial) não foi alterada, preservando assim seu princípio de funcionamento. O equipamento em linha fornece uma leitura em tempo real operando numa taxa de cisalhamento de 511s^{-1} sob um sistema de controle PID (Proporcional Integral Derivativo) para a vazão.



Figura 3.8. Viscosímetro tubular Brookfield modelo TT-100. Fonte: Autor, 2024.

VII. Transmissor e Sensor de Condutividade Elétrica

Para a medição da condutividade elétrica dos fluidos preparados é utilizado um sensor modelo SE 604 e um transmissor da linha Stratos, ambos fabricados pela empresa Knick (Figura 3.9). Estes estão conectados em conjunto ao sistema de aquisição de dados da unidade experimental. O sensor possui uma faixa de medição de 0 a 99 mS/cm e temperatura de trabalho em torno de -20 a 120 °C.



Figura 3.9. Transmissor Stratos PRO e Sensor SE 604. Fonte: Adaptado Catálogo Knick, 2020.

VIII. Dosadoras de sólidos

Para dosagem dos materiais sólidos nos fluidos produzidos no tanque de mistura da unidade de preparo de fluidos, são utilizadas duas moegas vibratórias modelo F 0.10 (Figura 3.10), fabricada pela MLV Vibradores, e um alimentador DR 100 (Figura 3.11) da RETSCH. Para este estudo, uma moega foi empregada para a dosagem de barita e a outra para a dosagem de cloreto de sódio, enquanto o alimentador DR100 para a dosagem de viscosificante.



Figura 3.10. Moega vibratória F 0.10.
Fonte: Adaptado-MLV Vibradores.



Figura 3.11. Alimentador DR100.
Fonte: Adaptado-Catálogo Retsch.

A moega utilizada para dosagem de cloreto de sódio é acionada por corrente elétrica, cuja faixa padrão de atuação é de 4 a 20 mA. Contudo, foi observado durante a etapa de calibração dos equipamentos que correntes com intensidades abaixo de 8 mA apresentam-se como uma região de banda morta, ou seja, a dosagem de sal somente é iniciada com sinais de corrente a partir de 8 mA.

Já a moega empregada para a dosagem de barita, a banda morta é localizada nas intensidades abaixo de 6 mA. Contudo, a massa de barita que é alimentada com correntes abaixo de 10 mA é desprezível quando comparada à vazão de alimentação em intensidades a partir de 10 mA. Dessa forma, a faixa operacional útil para a dosagem de barita foi considerada entre 10 e 20 mA.

No Apêndice D são apresentados gráficos contendo as curvas de calibração para quantificação de cloreto de sódio e barita em vazão mássica por intensidade de corrente e a curva de calibração para a dosagem de viscosificante em massa por tempo.

IX. Bomba dosadora

A dosagem de água para o preparo e a diluição dos fluidos produzidos, é realizada por meio de uma bomba dosadora (Figura 3.12) que introduz água no tanque de preparo por meio do bombeamento. A bomba dosadora é do tipo diafragmática, com uma potência de 0,5 cavalos e uma velocidade de rotação de 1670 rpm, adquirida pela GRABE equipamentos industriais.



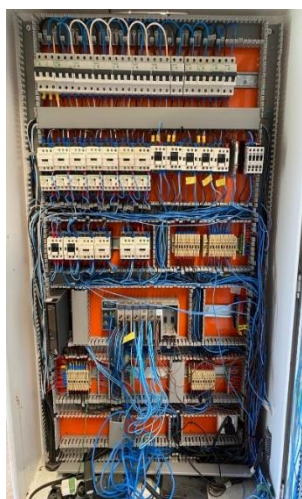
Figura 3.12 Bomba dosadora Grabe. Fonte: Autor, 2024.

3.1.2 Sistema Elétrico

A instalação elétrica dos equipamentos da instrumentação e dos sistemas de aquisição de dados das unidades de preparo e monitoramento de fluidos (UNIPAF e UMPC) foi realizada pela equipe de pesquisadores do LEF/UFRRJ (MAGALHÃES (2015), BARBOSA (2016), RADISH (2018), FERRAZ (2019) e MELLO (2022)).

Para a elaboração deste trabalho, não foi necessária a modificação do sistema elétrico, contudo, foram revisados os quadros do sistema de controle e de potência das unidades experimentais que contêm os disjuntores, os contatores, os relés térmicos, os inversores de frequência, as fontes de alimentação e os fusíveis. Ambos os quadros estão demonstrados nas Figura 3.13 e Figura 3.14.

Vale destacar que existe uma limitação física no quadro de comando elétrico para atuação das moegas vibratórias de forma simultânea, pois a unidade conta apenas com um quadro elétrico, assim o contator transporta a energia entre as duas moegas através de uma estrutura de chaveamento de corrente.



a) Quadro de Potência



b) Quadro de Comando

Figura 3.13. Quadros de Potência (a) e comando (b) da UNIPAF. Fonte: Autor, 2024.



a) Quadro de Potência



b) Quadro de Comando

Figura 3.14. Quadros de Potência (a) e comando (b) da UMPC. Fonte: Autor, 2024.

3.2 Sistema de Controle e Aquisição de Dados

O sistema de controle e aquisição de dados é composto por um CLP (Controlador Lógico Programável) de arquitetura modular, que consiste em um chassi equipado com módulos de acoplamento de entradas e saídas, tanto digitais quanto analógicas. A saída digital gera sinais do tipo on/off que acionam os contatores utilizados no controle do instrumento dosador, enquanto as entradas analógicas recebem sinais de 4 a 20 mA proveniente dos transdutores presentes na unidade. A Figura 3.15 ilustra o CLP utilizado na planta, cujo sistema foi projetado tendo como base o hardware da National Instruments. Na Figura 3.16, é apresentado o módulo de saída analógica utilizado no chassi, o qual o mesmo transmite/envia sinais de 4 a 20 mA para os atuadores presentes na unidade.



Figura 3.15. CLP- Chassis Modular de aquisição de dados e controle.
Fonte: Adaptado de National Instruments.



Figura 3.16. Módulo de saída de corrente série C. Fonte: Adaptado de National Instruments.

3.2.1 Sistema Supervisório

A unidade experimental de preparo e monitoramento de fluidos de perfuração possui um módulo principal já existente que faz comunicação direta com os chassis responsáveis pela coleta de dados oriundos das medições. A interface homem-máquina (IHM), apresentada na Figura 3.17, exibe ao operador a leitura das variáveis de interesse em tempo real durante a realização dos testes. Esse módulo principal é responsável por receber os novos módulos sem que sejam necessárias modificações em seu software.

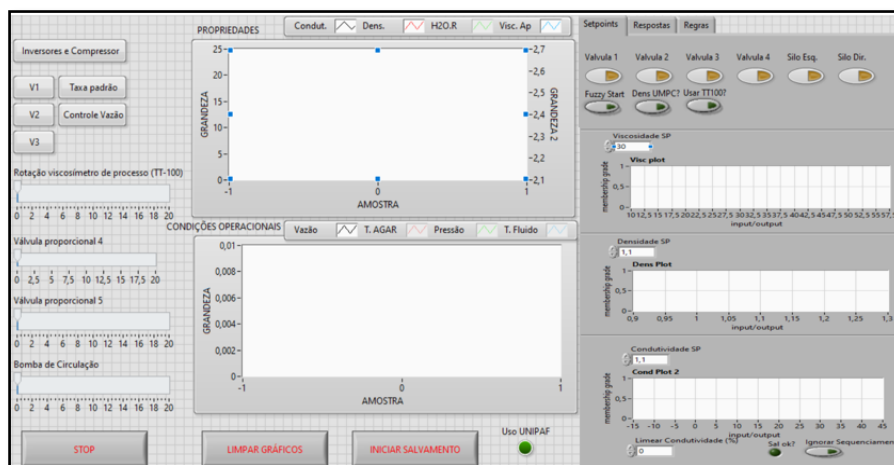


Figura 3.17. IHM Principal: Sistema supervisório da unidade experimental. Fonte: Autor, 2024.

Para o controlador *fuzzy* desenvolvido, foi realizada a construção de um módulo próprio para concentrar as informações referentes ao controlador, onde são expressas as funções de pertinência, as respostas do controlador, os seletores de setpoint e a base de regras, visando ao auxílio para visualização das ações de controle. O módulo desenvolvido é apresentado na Figura 3.18.

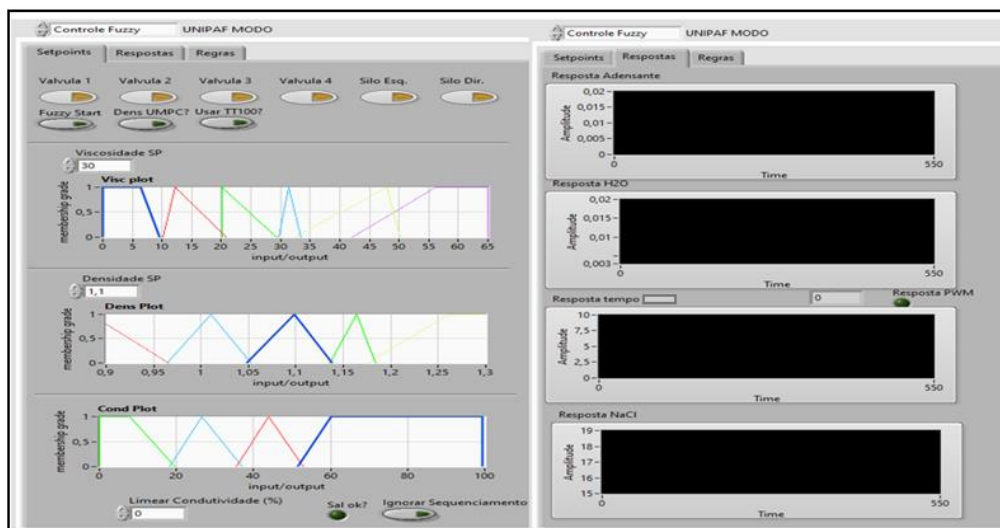


Figura 3.18. Módulo do Controlador Fuzzy. Fonte: Autor, 2024.

3.3 Materiais Utilizados

Normalmente, sabe-se que, os fluidos à base água selecionados pelas empresas de perfuração para explorar regiões onde ocorre a dissolução intensa de sais encontram-se sob condições de salmouras. Isso ocorre para minimizar possíveis alterações nas propriedades dos fluidos sob as interações fluido-rocha. Como um dos objetivos deste trabalho é controlar a condutividade em fluidos de perfuração, os testes experimentais e a construção do controlador *fuzzy* foram realizados com base nas informações referentes a estes tipos de fluidos.

Para realização dos testes experimentais foram selecionados os seguintes materiais para a formulação dos fluidos de perfuração:

- i) Fase contínua: Água Industrial (H_2O);
- ii) Adensante: Sulfato de Bário ($BaSO_4$) adquirido da Brasilminas;
- iii) Viscosificante: Goma Xantana ($C_{35}H_{49}O_{29}$) adquirido da QuantiQ;
- iv) Sal: Cloreto de Sódio ($NaCl$) adquirido da Sal Cisne.

3.3.1 Caracterização dos Materiais

I. Sulfato de Bário/ Baritina

Para caracterizar o lote do material adensante empregado nos experimentos, utilizou-se o analisador Malvern-Mastersizer 2000 (conforme ilustrado na Figura 3. 19), o qual fornece os diâmetros médios das faixas granulométricas do material adensante. Esse equipamento utiliza a técnica de difração a laser para determinar o ângulo de espalhamento em relação ao tamanho das partículas.

Durante o experimento, a amostra circulada continuamente através da janela de medição para garantir sua homogeneização. O equipamento é capaz de analisar uma faixa de 0,04 a 2000 μm , e os resultados são expressos em percentual relativo de volume de material distribuído.



Figura 3. 19 Granulômetro a Laser Mastersizer 2000.
Fonte: Catálogo MALVERN (2017).

II. Densidade dos Sólidos

Para aferição da densidade do sulfato de bário e da goma xantana, foi utilizada a técnica de picnometria, amplamente conhecida para medir a densidade de sólidos com rapidez e eficiência. Basicamente, um picnômetro consiste num balão de vidro graduado de fundo chato, e uma tampa de vidro, no qual possui um tubo capilar, conforme mostrado na Figura 3.20.

Para utilizar essa técnica é necessária uma balança com no mínimo duas casas decimais de precisão. Para assegurar que o procedimento de pesagem foi realizado corretamente, a determinação da densidade foi realizada em triplicata. As densidades relativas para o cloreto de sódio foram fornecidas pela ficha técnica dos fabricantes.



Figura 3.20. Picnômetro de 50 ml.
Fonte: Catálogo AZEHEB Laboratórios (2023).

$$\rho_s = \frac{(m_{ps} - m_p)}{(m_{pl} - m_p) - (m_{psl} - m_{ps})} * \rho_l \quad (3.1)$$

onde:

ρ_s : Densidade do Sólido.
 ρ_l : Densidade do líquido de referência.
 m_{ps} : Massa do picnômetro fechado mais o sólido.
 m_p : Massa do picnômetro vazio (com tampa).
 m_{pl} : Massa do picnômetro com líquido.
 m_{psl} : Massa do picnômetro com sólido e líquido.

III. Condutividade, Densidade e reologia dos Fluidos Formulados

Para a caracterização da condutividade elétrica, da densidade e da reologia dos fluidos formulados experimentalmente, empregamos os seguintes instrumentos de medição: para a aferição da condutividade elétrica, foi utilizado um conjunto composto por transmissor e sensor de condutividade elétrica, para a densidade, a balança de lama do modelo Fann 140 e para a obtenção das curvas reológicas e da viscosidade aparente, utilizou-se o viscosímetro Fann do modelo 35

3.4 Planejamento Experimental

Para avaliar estatisticamente a interação da composição/formulação do fluido nas propriedades a serem controladas: condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade, foram realizados testes experimentais em bancada para avaliar as respostas da dessas variáveis em diferentes situações. Para formulação dos experimentos, utilizou-se a técnica do planejamento experimental fatorial (Tabela 3-3), com três níveis e três fatores, configurando um planejamento com um total de 27 combinações de experimentos, sendo a goma xantana, a barita e o cloreto de sódio as substâncias moduladas entre os níveis para o estudo experimental, conforme apresentado na (Tabela 3-4).

Tabela 3-3 Variáveis e níveis experimentais. Fonte: Autor, 2024.

Níveis	-	0	+
Goma Xanatana (g/L)	2,85	5,70	8,55
Barita (%m/m)	5	10	15
Cloreto de Sódio (g/L)	80	160	320

A metodologia aplicada na preparação dos fluidos foi escolhida de acordo com a norma PE-5EM-00480-H (Petrobras, 2012), que estabelece diretrizes para a realização de testes piloto visando o tratamento ou a fabricação de fluidos. No entanto, a preparação foi adaptada para a realização de ensaios de menor escala, conforme descrito a seguir.

Com o auxílio de uma balança analítica SHIMADZU (modelo BL3200H), foram pesadas a goma xantana em uma placa de petri e a barita em um béquer. Para preparar fluido, adicionou-se água em QSP para produção de 1 litro de fluido, juntamente com a goma xantana. Utilizando um agitador Hamilton, a mistura foi mantida em agitação por 30 minutos. Após aguardar a hidratação da goma xantana, adicionou-se ao fluido o NaCl previamente pesado e agitou-se por 5 minutos. Após a dissolução do NaCl, incorporou-se a barita e, sob agitação, o fluido foi mantido por um período de 10 minutos. Em seguida, foram realizadas as caracterizações e medições das propriedades condutividade, densidade e viscosidade aparente. Para minimizar os erros, todos os testes foram realizados em triplicata. Destaca-se, ainda, que todos os ensaios reológicos foram realizados a uma temperatura de aproximadamente 25° C.

Tabela 3-4. Numeração e Formulação dos experimentos. Fonte: Autor, 2024.

Experimento	Goma xantana	Barita	NaCl
1	-1	-1	-1
2	-1	0	0
3	-1	+1	+1
4	-1	-1	0
5	-1	-1	+1
6	-1	0	-1
7	-1	0	+1
8	-1	+1	-1
9	-1	+1	0
10	0	-1	-1
11	0	0	0
12	0	+1	+1
13	0	-1	0
14	0	-1	+1
15	0	0	-1
16	0	0	+1
17	0	+1	-1
18	0	+1	0
19	+1	+1	+1
20	+1	-1	-1
21	+1	0	0
22	+1	+1	-1
23	+1	+1	0
24	+1	0	-1
25	+1	0	+1
26	+1	-1	0
27	+1	-1	+1

No apêndice A estão os resultados obtidos separadamente para cada teste experimental.

3.4.1 Testes na Unidade Experimental

Para avaliar de forma abrangente o desempenho do controlador *fuzzy* na correção dos fluidos de perfuração, foram realizados uma série de testes do tipo servo e regulatório. Todos os testes realizados na planta piloto foram operados a uma vazão de circulação controlada de 1 m³/h e sob agitação 1000 rpm.

Para garantir uma abordagem consistente, foi elaborado um Procedimento Operacional Padrão (POP), que serviu como guia para a execução dos testes na unidade experimental estabelecendo um protocolo base para os testes utilizando o controlador *fuzzy*. Abaixo é apresentado o POP.

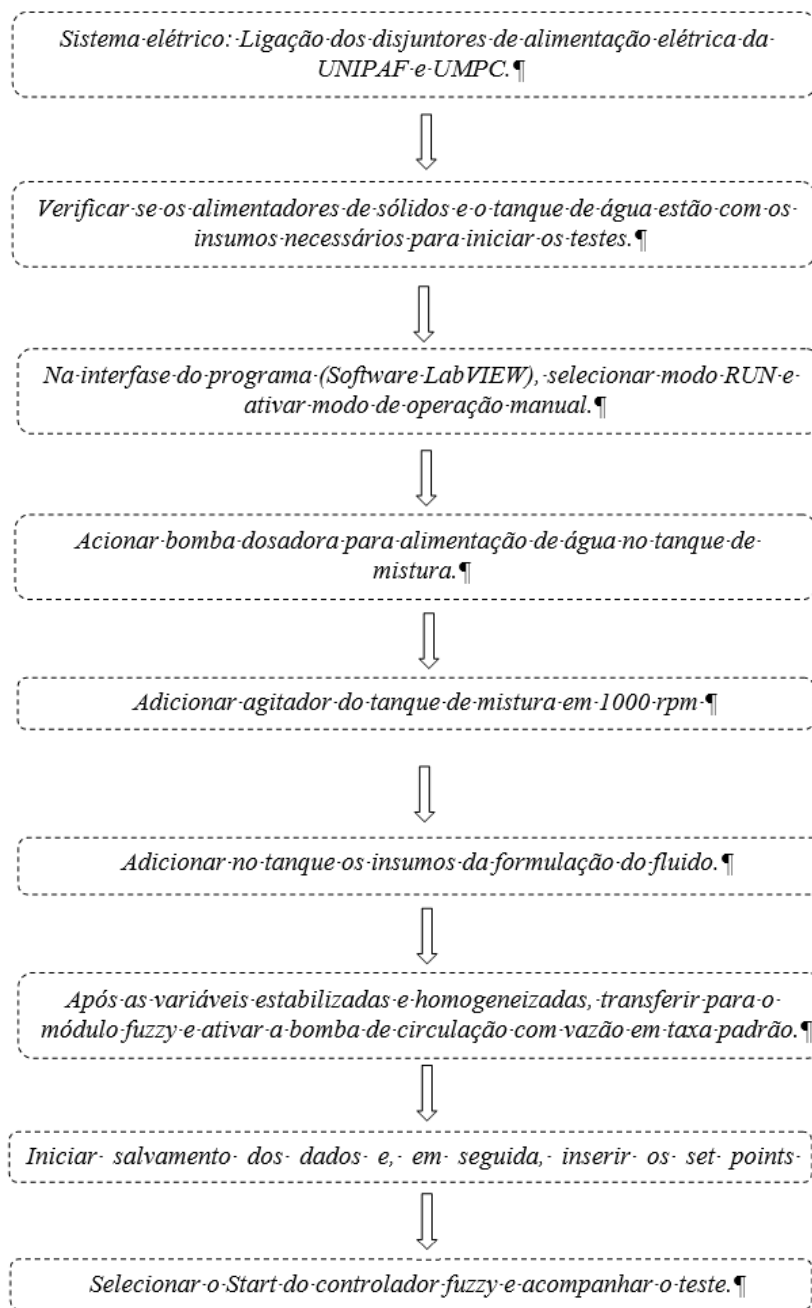


Figura 3.21 Procedimento operacional padrão da condução dos testes.

Fonte: Autor, 2024.

CAPÍTULO 4

Resumo: Neste capítulo apresenta-se a modelagem realizada para a estratégia de controle fuzzy empregada neste estudo. São apresentados os passos gerais envolvidos na modelagem das funções de pertinência de entrada e saída e as bases de regras empregadas na programação do algoritmo *fuzzy*.

4. PROJETO DO CONTROLADOR MULTIVARIÁVEL

Para a construção do algoritmo de controle *fuzzy*, é necessário identificar as relações entre as entradas e as saídas do processo, definir a base de regras e os mecanismos de defuzzificação, de validação e de ajuste. Este é um processo iterativo que requer um entendimento profundo do sistema a ser controlado para o alcance de resultados satisfatórios.

4.1 Base de Regras

Conhecida como inferência de Mamdani, esta é uma técnica utilizada em sistemas de lógica difusa para determinar a saída do sistema com base nas regras *fuzzy* estabelecidas. Nesse tipo de inferência, a saída *fuzzy* é obtida combinando-se as contribuições de várias regras *fuzzy* de acordo com a lógica desejada. Cada regra contribui parcialmente para a saída, e essas contribuições são agregadas para gerar a resposta final do sistema.

A inferência do tipo Mamdani é amplamente utilizada em controladores *fuzzy* devido à sua simplicidade e eficácia. Podem-se mencionar algumas razões pelas quais ela é tão utilizada:

- i. Facilidade de Implementação: O método é relativamente simples de entender e implementar, o que facilita sua aplicação em uma variedade de sistemas;
- ii. Interpretação Intuitiva: A lógica *fuzzy*, em geral, permite uma representação mais intuitiva do conhecimento humano, e o método de inferência de Mamdani é especialmente adequado para isso. As regras *fuzzy* são expressas de forma clara e compreensível, tornando-as facilmente interpretáveis pelos especialistas do domínio;
- iii. Simplicidade: A inferência de Mamdani é robusta o suficiente para lidar com uma ampla gama de problemas de controle. Além disso, em muitos casos, ela oferece desempenho satisfatório e eficiente;
- iv. O método é altamente flexível e pode ser facilmente adaptado para lidar com diferentes tipos de sistemas e variáveis de entrada e saída;
- v. Ampla Aceitação na Comunidade Científica: Devido à sua longa história e inúmeras aplicações bem-sucedidas, a inferência de Mamdani é amplamente aceita e bem compreendida na comunidade acadêmica, o que a torna uma escolha popular para muitos projetos de controladores *fuzzy*.

4.1.1. Desenvolvimento de Regras Linguísticas para o Controlador Fuzzy Multivariável

Os resultados obtidos a partir da análise estatística dos resultados do planejamento de experimentos foram fundamentais para o desenvolvimento das regras linguísticas a serem utilizadas no controlador fuzzy multivariável. Neste contexto, as taxas de adição de goma xantana, barita, cloreto de sódio e água são as variáveis manipuladas pelo controlador, enquanto a densidade, condutividade elétrica e viscosidade aparente do fluido são as variáveis controladas.

Para analisar influência da composição dos fluidos nas variáveis controladas utilizou-se a

técnica de análise estatística MANOVA. A MANOVA (*Multivariate Analysis of Variance*, ou Análise de Variância Multivariada) é uma extensão da ANOVA (Análise de Variância) que permite examinar múltiplas variáveis dependentes simultaneamente. Enquanto a ANOVA é utilizada para comparar médias de uma variável dependente entre grupos, a MANOVA compara grupos em várias variáveis dependentes ao mesmo tempo, considerando as correlações entre elas (Rencher & Christensen, 2012). Com isso, a técnica permite avaliar a hipótese de que diferentes formulações do fluido afetam simultaneamente múltiplas propriedades físico-químicas, como condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade, proporcionando uma análise mais abrangente das interações entre essas propriedades e analisando a sua significância estatística.

A técnica MANOVA foi implementada utilizando o pacote *statsmodels.multivariate.manova*, que é um submódulo da ferramenta *statsmodels*, dedicado à execução da MANOVA. Esta ferramenta permite aos usuários aplicar a técnica de MANOVA a conjuntos de dados multivariados, onde várias variáveis dependentes são analisadas simultaneamente. O pacote utilizado tem as estatísticas de Wilks' Lambda, Pillai's Trace, Hotelling's Trace e Roy's. A estatística Wilks' Lambda é frequentemente a escolha padrão por ser amplamente aceita e aplicável em muitas situações sendo uma boa escolha especialmente em estudos exploratórios. A estatística Pillai's Trace é recomendada quando há preocupações com a robustez das suposições da MANOVA, sendo uma escolha segura em muitos contextos, especialmente quando as amostras são pequenas. A estatística Hotelling's Trace é útil em situações com amostras pequenas e quando se espera que haja diferenças significativas entre os grupos e, finalmente, a estatística Roy's é a escolha quando se espera que uma única diferença dominante esteja presente entre os grupos.

Embora os resultados estatísticos obtidos pela aplicação da técnica MANOVA tenham sido todos calculados e apresentados neste trabalho, o traço de Pillai foi a estatística considerada pelo fato de que este método não requer distribuição normal dos dados, além de que é frequentemente empregada para modelos mais robustos e apresenta ótima representatividade estatística.

A Figura 4.1 apresenta os resultados obtidos por meio da MANOVA para os dados experimentais, onde:

- Num DF (Graus de Liberdade Numerador) representa os graus de liberdade associados às diferenças entre os grupos formados pelas variáveis independentes. Ele quantifica a variação nas variáveis dependentes que é explicada pelos efeitos das variáveis independentes;
- Den DF (Graus de Liberdade Denominador) refere-se aos graus de liberdade associados à variabilidade dentro dos grupos formados pelas variáveis independentes. Esses graus de liberdade medem a variação não explicada pelo modelo estatístico, representando a variabilidade que ocorre naturalmente dentro dos grupos.
- F Value (Valor F) é a estatística de teste usada para comparar a variabilidade entre os grupos com a variabilidade dentro dos grupos. Ele quantifica a magnitude da diferença entre as médias dos grupos, ajudando a determinar se essas diferenças são estatisticamente significativas.
- O P-valor ($Pr > F$) é usado para avaliar a significância estatística dos resultados, indicando a probabilidade de observar uma diferença tão grande ou maior entre os grupos se a hipótese nula fosse verdadeira.

Intercept	Value	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
Wilks' lambda	0.0125	3.0000	21.0000	552.0529	0.0000
Pillai's trace	0.9875	3.0000	21.0000	552.0529	0.0000
Hotelling-Lawley trace	78.8647	3.0000	21.0000	552.0529	0.0000
Roy's greatest root	78.8647	3.0000	21.0000	552.0529	0.0000

GX	Value	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
Wilks' lambda	0.0493	3.0000	21.0000	135.0757	0.0000
Pillai's trace	0.9507	3.0000	21.0000	135.0757	0.0000
Hotelling-Lawley trace	19.2965	3.0000	21.0000	135.0757	0.0000
Roy's greatest root	19.2965	3.0000	21.0000	135.0757	0.0000

Barita	Value	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
Wilks' lambda	0.4711	3.0000	21.0000	7.8603	0.0011
Pillai's trace	0.5289	3.0000	21.0000	7.8603	0.0011
Hotelling-Lawley trace	1.1229	3.0000	21.0000	7.8603	0.0011
Roy's greatest root	1.1229	3.0000	21.0000	7.8603	0.0011

Sal	Value	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
Wilks' lambda	0.3093	3.0000	21.0000	15.6334	0.0000
Pillai's trace	0.6907	3.0000	21.0000	15.6334	0.0000
Hotelling-Lawley trace	2.2333	3.0000	21.0000	15.6334	0.0000
Roy's greatest root	2.2333	3.0000	21.0000	15.6334	0.0000

Figura 4.1. Análise MANOVA. Fonte: Autor, 2024.

Como abordagem inicial, a análise dos resultados da Figura 4.1 permitiu determinar a influência dos componentes constituintes dos fluidos sobre suas propriedades físico-químicas, onde a análise da MANOVA mostrou que diferentes formulações de fluido influenciam significativamente a condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade.

O valor de p ($Pr > F$) é usado para avaliar a significância estatística dos resultados, indicando a probabilidade de observar uma diferença tão grande ou maior entre os grupos se a hipótese nula fosse verdadeira. Neste estudo, considerou-se uma diferença estatística significativa se o valor de p ($Pr > F$) fosse inferior a 0,05 para o traço de Pillai pois, conforme ressaltado anteriormente, este método não requer distribuição normal dos dados e é frequentemente empregado para modelos mais robustos e apresenta ótima representatividade estatística.

Através dessa técnica de análise estatística, foi possível verificar que todos os aditivos demonstraram significância estatística em relação às propriedades estudadas, destacando que a adição de goma xantana, barita e cloreto de sódio possuem significância estatística para todas as propriedades controladas.

Dessa forma, para a construção inicial da base de regras do controlador fuzzy multivariável, considerou-se que, embora a barita seja conhecida por aumentar a densidade, a goma xantana por seu efeito viscosificante e o cloreto de sódio por influenciar a condutividade elétrica dos fluidos de perfuração, a concentração de todos esses aditivos também contribui para o aumento das propriedades controladas em maiores concentrações. Esses resultados indicam que a formulação do fluido pode ser ajustada utilizando diferentes proporções de barita, cloreto de sódio e goma xantana para alcançar as propriedades desejadas.

Com isso, a análise dos resultados MANOVA permitiu observar influência estatística dos

componentes constituintes dos fluidos sobre as suas propriedades físico-químicas, como segue:

- **Densidade:** A análise multivariada de variância revelou que, embora a barita seja conhecida por aumentar a densidade dos fluidos de perfuração, a concentração de cloreto de sódio e goma xantana também contribui significativamente do ponto de vista estatístico para o aumento da densidade quando presente em maiores concentrações. Esses resultados indicam que a formulação do fluido pode ser ajustada utilizando.
- **Viscosidade Aparente:** Os resultados mostraram que todos os três componentes, goma xantana, barita e cloreto de sódio, influenciam diretamente a reologia dos fluidos à base de água. Com isso, pode-se observar que é possível modificar a viscosidade aparente dos fluidos por meio da adição de barita, cloreto de sódio e goma xantana.
- **Condutividade Elétrica:** Teoricamente, o cloreto de sódio é o principal constituinte dos empregado na formulação dos fluidos que influencia a condutividade elétrica. Contudo, observa-se que a barita e a goma xantana também podem ser utilizadas como aditivos moduladores dessa variável.

4.2 Construção das Funções de Pertinência

A forma das funções de pertinência em sistemas *fuzzy* é crucial, pois influencia diretamente como os dados são interpretados e processados dentro do modelo. A construção das funções de pertinência teve como base as informações obtidas do estudo do efeito dos constituintes do fluido sobre suas propriedades, conforme relatado no item anterior.

O Software *LabVIEW*® possui uma ferramenta auxiliar para construção de algoritmos de controle *fuzzy* chamada de *Fuzzy System Designer*, com auxílio da qual foi possível criar as variáveis linguísticas, as funções de pertinência e a base de regras do controlador. A Figura 4.2 apresenta a interface dessa ferramenta.

Sistemas *fuzzy* são utilizados para modelar incertezas e imprecisões e as funções de pertinência são o coração desses sistemas, definindo o grau em que certos inputs pertencem a conjuntos *fuzzy*. Vários aspectos são afetados/influenciados pela escolha da forma da função de pertinência:

- Overlap entre Conjuntos Fuzzy:** A forma da função de pertinência também determina o quanto os conjuntos fuzzy se sobrepõem. Uma maior sobreposição pode ser útil para capturar incertezas, mas também pode tornar o sistema menos discriminatório;
- Granularidade:** A forma da função de pertinência determina a granularidade com que os dados são representados. Funções mais amplas podem resultar em uma modelagem mais grossa, enquanto formas mais estreitas ou pontiagudas podem capturar detalhes mais finos;
- Facilidade de Implementação e Computação:** Algumas formas de funções de pertinência são mais fáceis de implementar e calcular do que outras. Por exemplo, funções triangulares e trapezoidais são geralmente mais simples e computacionalmente menos intensivas do que funções gaussianas ou sigmoidais.

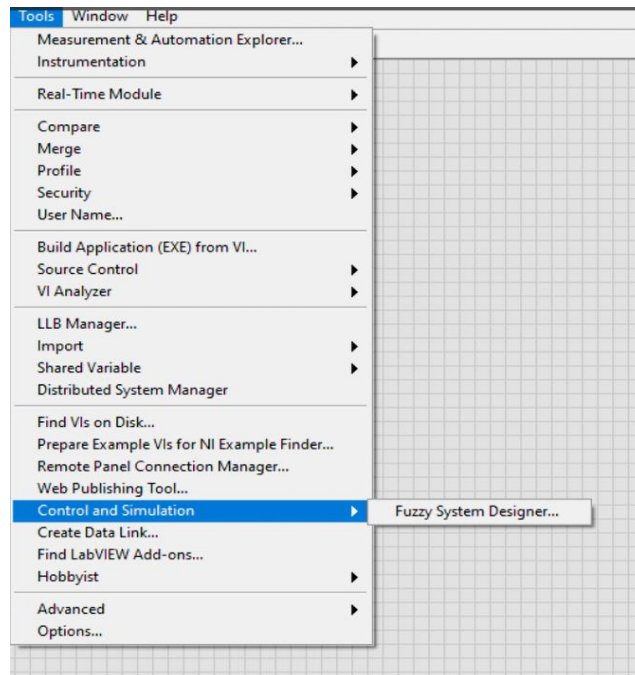


Figura 4.2. Interface de programação da ferramenta Fuzzy System Designer. Fonte: Autor, 2024

Portanto, a seleção da forma da função de pertinência deve ser feita com cuidado, considerando o contexto específico e os requisitos do sistema *fuzzy* que está sendo modelado. Em muitos casos, a escolha é baseada em conhecimento empírico, experimentação e ajustes durante o processo de desenvolvimento do sistema.

4.2.1 Funções de Pertinência de Entrada

As funções de pertinência de entrada carregam consigo os dados de entrada do controlador, ou seja, representam a leitura dos valores possíveis das variáveis controladas condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade.

A Figura 4.3 apresenta as funções de pertinência para a variável condutividade elétrica. Foram construídas quatro funções de pertinência com a escala variando de 0 a 60 mS/cm, onde o eixo x contempla os valores em miliSiemens por centímetro (mS/cm). Essas funções são categorizadas como **Muito alta** (30 a 60 mS/cm), em torno do setpoint **SP** (28 a 31,5 mS/cm), **Baixa** (12,5 a 28 mS/cm) e **Muito baixa** (0 a 14 mS/cm). O setpoint para a condutividade elétrica foi definido sob os valores de obtidos com fluidos preparados sob saturação de NaCl na unidade experimental, onde o para o fluido saturado o valor médio da condutividade elétrica obtida no sensor foi de 30 mS/cm.

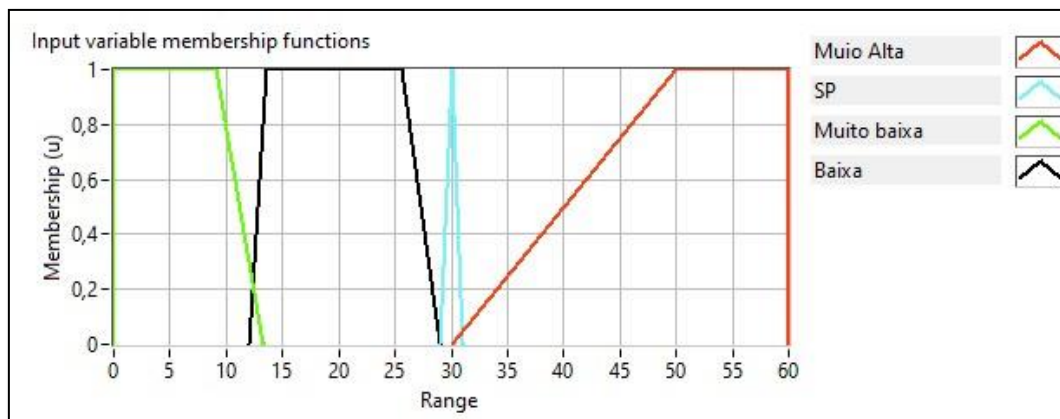


Figura 4.3. Funções de pertinência para Condutividade elétrica. Fonte: Autor, 2024.

A Figura 4.4 mostra as funções de pertinência para a viscosidade aparente, com os valores no eixo x expressos em centiPoise (cP). Para a escolha do setpoint, considerou-se a necessidade de evitar danos ao equipamento de bombeamento e o não entupimento das tubulações por onde o fluido circula. As funções desse conjunto de entrada foram baseadas no conhecimento adquirido de operação de fluidos sob a unidade experimental.

Para a viscosidade aparente, o sistema foi construído com seis funções representando os valores de entrada para essa variável, sendo elas categorizadas como **Muito alta** (28,5 a 45 cP), **Pouco Alta** (17,4 a 30 cP), **SP** (17,5 a 18 cP), **Pouco Baixa** (11,5 a 17,2 cP), **Baixa** (6 a 12,4 cP) e **Muito Baixa** (0 a 7,4 cP). Vale ressaltar o pequeno intervalo entre os valores da função do setpoint (SP), pois quanto mais ajustado, menor será o *offset*.

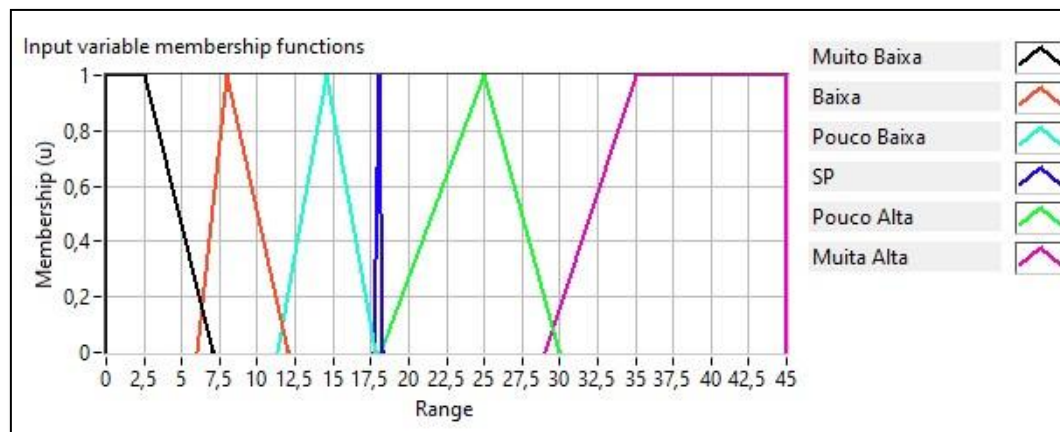


Figura 4.4. Funções de pertinência da viscosidade aparente. Fonte: Autor, 2024.

Na Figura 4.5, estão distribuídas as funções de pertinência para a densidade, apresentadas em um intervalo 0,95 a 1,3 g/cm³, onde, a partir do conhecimento adquirido nos testes realizados na unidade, intervalos superiores as 1,3 g/cm³ conduzem a uma alta taxa de alimentação de adensante na linha, podendo haver o entupimento ou danificação dos sensores. Com isso, para a densidade, foram construídas cinco funções de pertinência sendo elas: **Muito alta** (1,145 a 1,3 g/cm³), **Pouco Alta** (1,085 a 1,15 g/cm³), **SP** (1,085 a 1,09 g/cm³), **Pouco Baixa** (1,05 a 1,084 g/cm³) e **Muito Baixa** (0,98 a 1,059 cP g/cm³). Vale mencionar que a função trapezoidal com o intervalo iniciando em

0,98 g/cm³ foi levando em consideração para considerar valores de densidade em uma eventual condição de total diluição do fluido, aproximando-se assim a valores próximos aos da água em temperaturas entre 20 a 25°C.

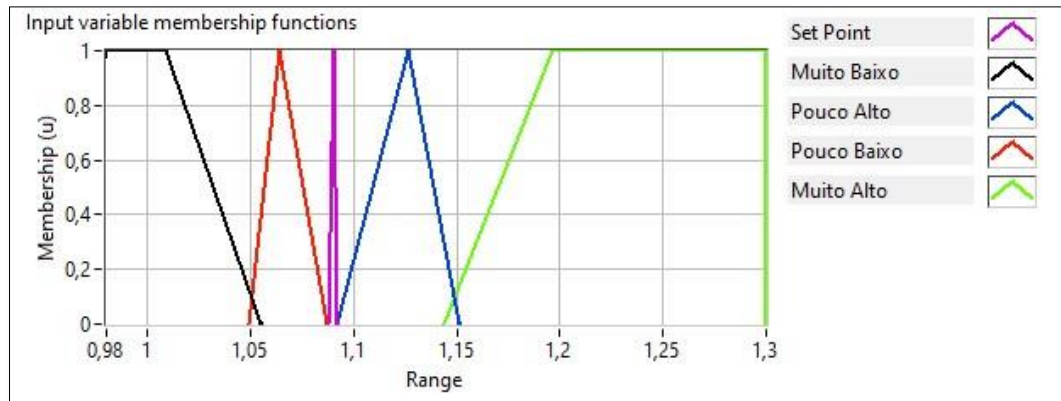


Figura 4.5. Funções de pertinência para a densidade. Fonte: Autor, 2024.

4.2.2 Funções de Pertinência de Saída

As funções de pertinência de saída em controladores *fuzzy* representam a relação entre as variáveis de entrada (variáveis controladas) e as ações de controle. Essas funções traduzem a intensidade com que cada ação de controle é aplicada com base nas condições do sistema.

A Figura 4.6 apresenta as funções de pertinência onde a manipulação da intensidade elétrica da moega vibratória é realizada pela alternância de corrente elétrica. Para a dosagem de cloreto de sódio foram implementadas cinco funções de pertinência, sendo elas: **Dosar Extremo** (0,013 a 0,02 A), **Dosar Muito** (0,0108 a 0,0135 A), **Dosar pouco** (0,0095 a 0,0115 A), **Dosar Muito Pouco** (0,004 a 0,00951 A), **Não dosar** (0 A).

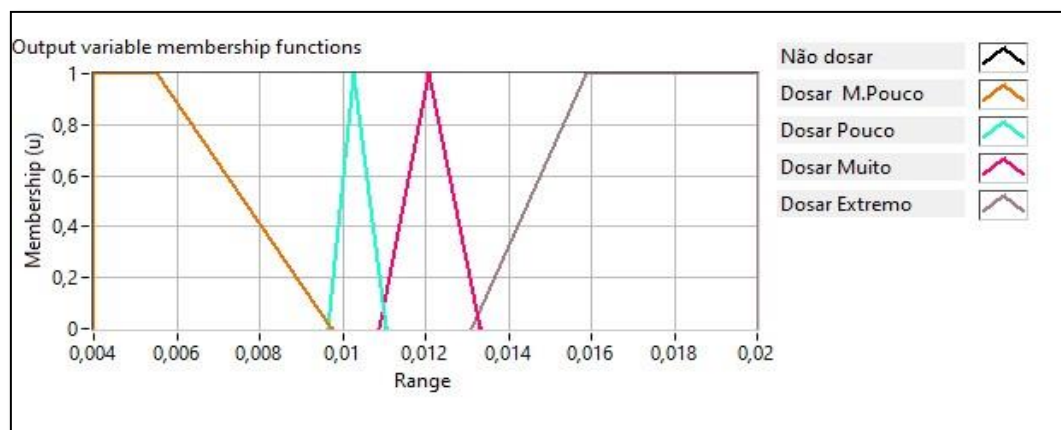


Figura 4.6. Funções de pertinência para a dosagem de NaCl. Fonte: Autor, 2024.

Na Figura 4.7 são apresentadas as funções de pertinência para manipulação da dosadora vibratória utilizada para dosar goma xantana, onde a alternância de corrente elétrica (*on/off*) foi empregada. Para a dosagem do viscosificante, foram implementadas seis funções de pertinência, baseadas no tempo que a dosadora deve permanecer atuando no sistema, com durações de 10, 8, 6, 4 e 2 segundos, além de uma função que carrega a ação de não dosar material (*off*).

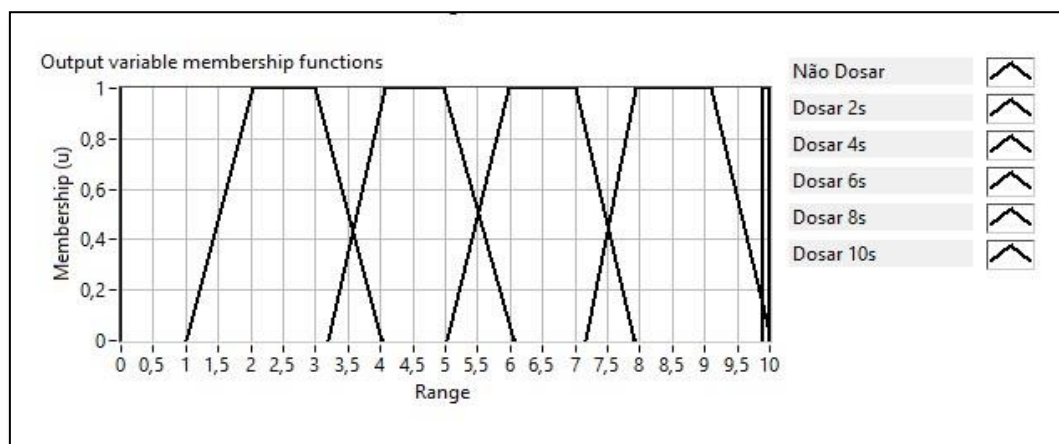


Figura 4.7. Funções de pertinência para a dosagem de Goma Xantana. Fonte: Autor, 2024.

Na Figura 4.8, são apresentadas as funções de pertinência para a manipulação da segunda moega vibratória utilizada para dosar a barita, seguindo o mesmo princípio das anteriores. Para a dosagem do adensante, foram implementadas seis funções de pertinência: **Dosar Muito** (0,015 a 0,02 A), **Dosar Pouco** (0,012 a 0,0151 A), **Manter SP** (0,0095 a 0,012 A) e **Não dosar** (0,005 a 0,0099 A). É importante destacar que para faixas menores que 0,006 A, o equipamento apresenta um banda morta, ou seja, mesmo com intensidade sendo chaveada para a moega, o material não consegue ser transportado. Portanto, a função “Não dosar” se inicia em 0,005 A.

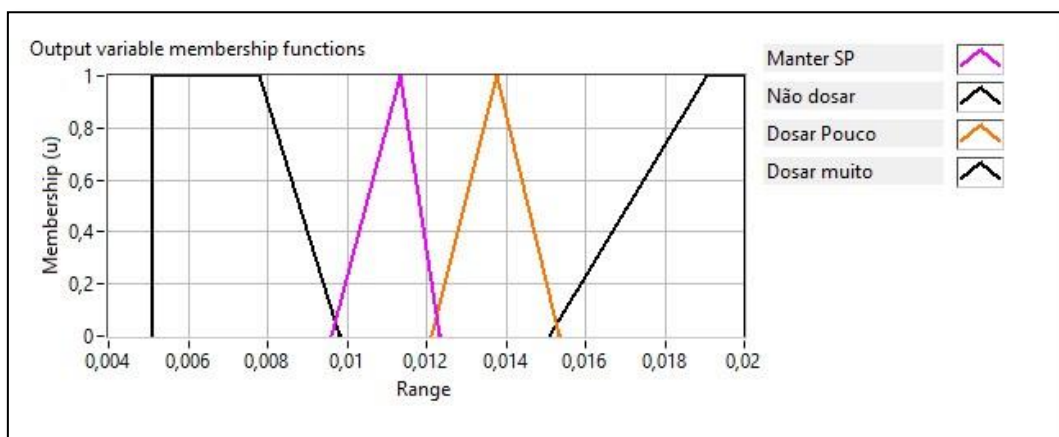


Figura 4.8. Funções de pertinência para a dosagem de Barita. Fonte: Autor, 2024.

Por último, a Figura 4.9 apresenta as funções de pertinência para a injeção de água no sistema, onde a manipulação bomba dosadora é realizada pela alternância de corrente elétrica de 0 a 0,02 A. Para esse atuador foram implementadas quatro funções de pertinência, sendo elas: **Dosar Muito** (0,0167 a 0,02 A), **Dosar Pouco** (0,0129 a 0,017 A), **Manter SP** (0,008 a 0,013 A) e **Não dosar** (0,004 a 0,0082 A).

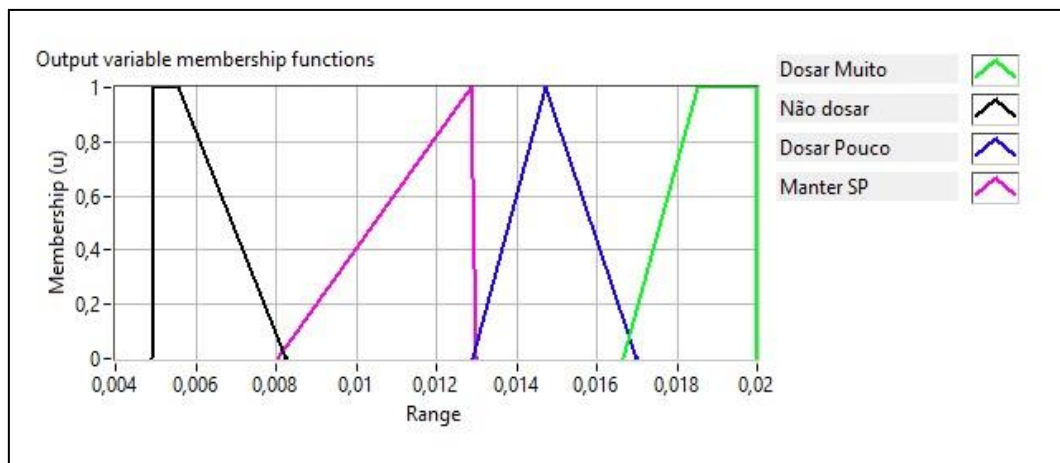


Figura 4.9. Funções de pertinência para a injeção de água. Fonte: Autor, 2024.

CAPÍTULO 5

Resumo: No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos testes experimentais realizados para a análise de interação entre as propriedades de condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade. Além disso, são apresentados os resultados obtidos na unidade experimental, onde a técnica de controle desenvolvida foi avaliada por meio de testes do tipo servo e regulatório considerando todas as variáveis controladas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos Materiais

A densidade média do cloreto de sódio foi fornecida pelo fabricante como sendo $2,17 \text{ g.cm}^{-3}$. As densidades do lote de barita (BaSO_4) e da goma xantana utilizados para os testes experimentais foram obtidas pela técnica de picnometria, apresentando um valor médio de $3,11 \text{ g.cm}^{-3}$ para a barita e $1,63 \text{ g.cm}^{-3}$ para a goma xantana. A análise granulométrica é apresentada na tabela abaixo e mais detalhada no Apêndice B, onde estão expressos os valores dos diâmetros referentes a 10%, 50% e 90 % e o diâmetro de Sauter da amostra.

Tabela 5-1. Diâmetro das partículas. Fonte: Autor, 2024.

-	<i>Diâmetro das partículas (μm)</i>
D(0,1)	2,252
D(0,5)	12,406
D(0,9)	33,322
D _{Sauter}	5,149

5.2 Análise da Composição do Fluido e Base de Regras

Os experimentos e a análise estatística MANOVA, apresentada no capítulo 4, proporcionaram insights valiosos sobre como diferentes concentrações de goma xantana, barita e cloreto de sódio afetam as propriedades físico-químicas dos fluidos de perfuração. A capacidade de ajustar a densidade e a viscosidade aparente do fluido através da modulação desses componentes oferece uma ferramenta poderosa para o controle e a otimização da manutenção das propriedades físicas dos fluidos.

Estes experimentos destacam a importância da aplicação da metodologia MANOVA para a obtenção de uma análise robusta das interações entre os componentes, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento das regras linguísticas do controlador fuzzy multivariável, o que permitirá a otimização contínua e precisa das propriedades dos fluidos de perfuração.

Os resultados demonstraram resumidamente que:

- A goma xantana é crucial para controlar a viscosidade aparente, possuindo significância estatística para as demais variáveis controladas;
- O cloreto de sódio, além de ser fundamental para a condutividade elétrica, também afeta significativamente a densidade e a viscosidade aparente;

- A barita, enquanto tradicionalmente utilizada para aumentar a densidade, também interage com os outros componentes para influenciar a reologia e condutividade elétrica do fluido.

A partir deste estudo estatístico e análise dinâmica na unidade experimental, foi possível inferir algumas relações muito importantes que serviram como fundamento para a obtenção da base de regras linguísticas para o controlador fuzzy multivariável. As principais relações entre as variáveis que foram usadas para produzir as regras linguísticas foram:

Para Densidade:

- Se a densidade está baixa, então deve-se aumentar a adição de barita.
- Se a densidade está alta, então deve-se reduzir a adição de barita e cloreto de sódio.

Para Viscosidade Aparente:

- Se a viscosidade aparente está baixa, então deve-se aumentar a adição de goma xantana.
- Se a viscosidade aparente está alta, então deve-se reduzir a adição de goma xantana e cloreto de sódio.

Para Condutividade Elétrica:

- Se a condutividade elétrica está baixa, então deve-se aumentar a adição de cloreto de sódio.
- Se a condutividade elétrica está alta, então deve-se reduzir a adição de cloreto de sódio.

Estes resultados destacam a importância de um controle preciso da formulação dos fluidos de perfuração para melhorar a eficiência operacional e reduzir os riscos associados ao processo de perfuração. A metodologia MANOVA proporcionou uma análise robusta das interações entre os componentes, fornecendo uma base sólida para futuras melhorias e inovações na formulação de fluidos de perfuração. A partir dessas relações e após os ajustes finos realizados na unidade experimental, foi possível determinar o conjunto de regras linguísticas utilizadas no controlador. Essa base de regras se encontra descrita na Tabela 5-2.

Tabela 5-2. Base de regras linguísticas implementadas para o controlador. Fonte: Autor, 2024.

Regras	Ações
1	IF 'Densidade' IS 'Muito Alto' THEN 'Adensante' IS 'Não dosar' ALSO 'Água' IS 'Dosar Muito'.
2	IF 'Densidade' IS 'Pouco Alto' THEN 'Adensante' IS 'Não dosar' ALSO 'Água' IS 'Dosar Pouco'.
3	IF 'Densidade' IS 'Setpoint' THEN 'Adensante' IS 'Não dosar' ALSO 'Água' IS 'Não dosar'.
4	IF 'Densidade' IS 'Pouco baixo' THEN 'Adensante' IS 'Dosar pouco' ALSO 'Água' IS 'Não dosar'.
5	IF 'Densidade' IS 'Muito baixo' THEN 'Adensante' IS 'Dosar muito' ALSO 'Água' IS 'Não dosar'.
6	IF 'Viscosidade' IS 'Muito baixo' THEN 'Viscosificante' IS 'Dosar 8s' ALSO 'Água' IS 'Não dosar'.
7	IF 'Viscosidade' IS 'Pouco baixo' THEN 'Viscosificante' IS 'Dosar 6s' ALSO 'Água' IS 'Não dosar'.
8	IF 'Viscosidade' IS 'Setpoint' THEN 'Viscosificante' IS 'Não Dosar' ALSO 'Água' IS 'Não dosar'.
9	IF 'Viscosidade' IS 'Pouco Alta' THEN 'Viscosificante' IS 'Não Dosar' ALSO 'Água' IS 'Dosar Pouco'.
10	IF 'Viscosidade' IS 'Muito alta' THEN 'Viscosificante' IS 'Não Dosar' ALSO 'Água' IS 'Dosar Pouco'.

11	IF 'Viscosidade' IS 'Baixa' THEN 'Viscosificante' IS 'Dosar 8s' ALSO 'Água' IS 'Não Dosar'.
12	IF 'Condutividade' IS 'Muito Alta' THEN 'Dosar Sal' IS 'Não dosar' ALSO 'Água' IS 'Dosar Muito'.
13	IF 'Condutividade' IS 'Setpoint' THEN 'Dosar Sal' IS 'Não dosar' ALSO 'Água' IS 'Não Dosar'.
14	IF 'Condutividade' IS 'Baixa' THEN 'Dosar Sal' IS 'Dosar muito' ALSO 'Água' IS 'Não Dosar'.
15	IF 'Condutividade' IS 'Muito baixa' THEN 'Dosar Sal' IS 'Dosar Extremo' ALSO 'Água' IS 'Não

Vale ressaltar que as regras utilizadas para o controlador foram construídas respeitando a capacidade de medição, atuação e desempenho dos instrumentos das unidades UNIPAF e UMPC. Além disso, o controlador tem por objetivo manter a condutividade elétrica como a variável de maior prioridade, seguida pela viscosidade aparente e a densidade do fluido, configurando-o como um sistema de controle fuzzy multivariável por sequenciamento. Os resultados dos 81 experimentos estão detalhados no Apêndice A.

5.3 Análise Reológica dos Fluidos Formulados

A Figura 5.1 (a), (b) e (c) apresentam as curvas de fluxo e o ajuste do modelo Herschel-Buckley obtidos para os fluidos formulados. Observa-se que, para todas as concentrações de goma xantana, barita e cloreto de sódio, todos os fluidos manifestaram pseudoplasticidade, caracterizando-os como fluidos não-newtonianos.

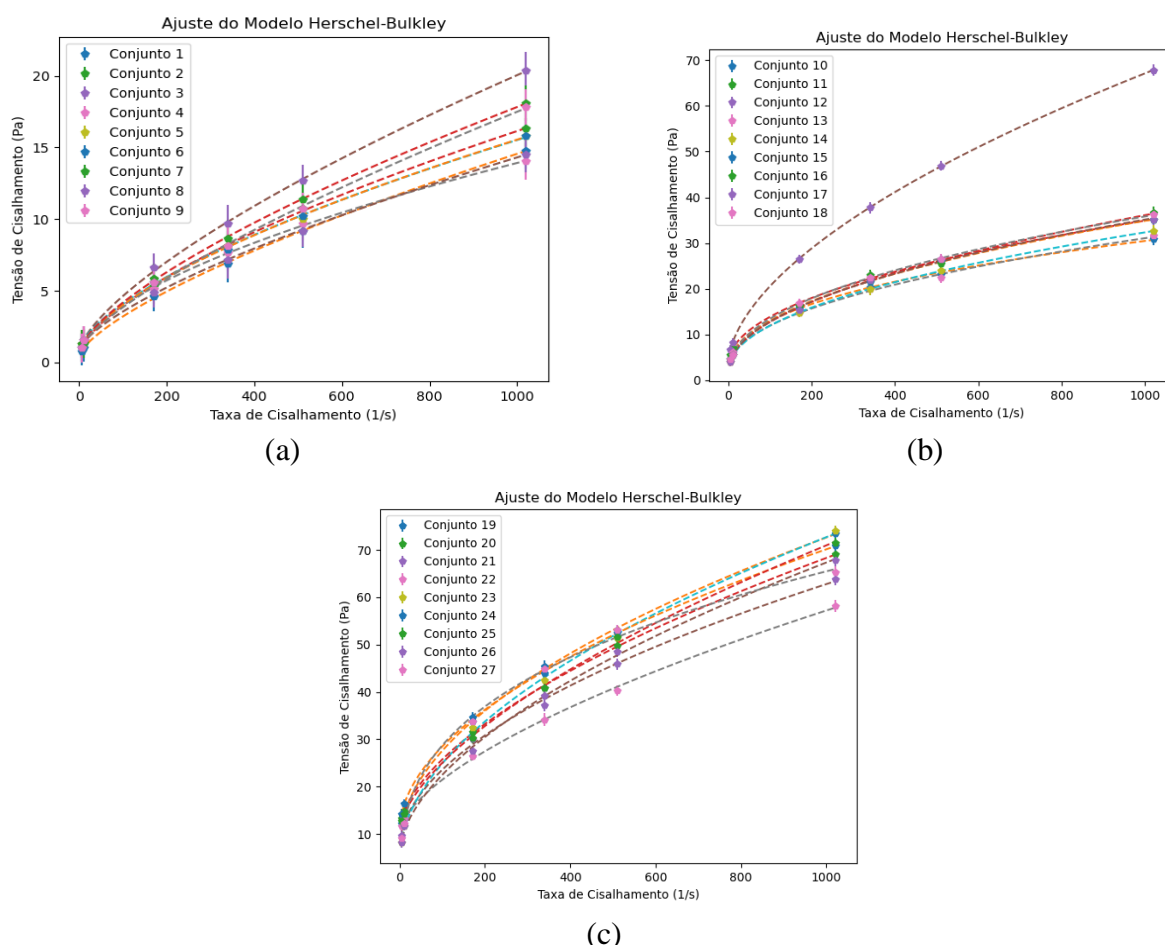


Figura 5.1. (a), (b) e (c) - Curvas reológicas e modelo Herschel-Bulkley ajustado para as 27 combinações dos formulados. Fonte: Autor, 2024.

Tendo em vista que os fluidos de perfuração são projetados para possuírem propriedades pseudoplásticas, ou seja, reduzir sua viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento e gelificar gradualmente quando não há cisalhamento aplicado sobre eles, é possível afirmar que a presença de diferentes concentrações de barita e cloreto de sódio utilizadas nas formulações deste estudo não descaracteriza a característica de pseudoplasticidade desejada para esses fluidos.

Na literatura, existem alguns modelos que correlacionam a tensão de cisalhamento com a taxa de deformação. Neste estudo, o modelo ajustado para os fluidos formulados, conforme apresentados na Figura 5.1, foi o modelo de Herschel-Buckley (Equação 10), um exemplo fundamentado na lei da potência. A Tabela 5-3 apresenta os parâmetros ajustados para o modelo com intervalo de confiança de aproximadamente 95%.

Tabela 5-3. Parâmetros do modelo reológico- Herschel-Buckley. Fonte: Autor, 2024.

Fluido	τ_0 (Pa)	K (Pa · sⁿ)	n
1	0,48	0,10	0,71
2	0,51	0,17	0,65
3	0,83	0,15	0,70
4	0,49	0,24	0,59
5	0,84	0,16	0,65
6	0,67	0,17	0,65
7	0,77	0,13	0,70
8	0,84	0,41	0,70
9	0,88	0,09	0,75
10	1,16	1,90	0,40
11	3,23	1,19	0,48
12	3,55	1,21	0,57
13	2,29	1,08	0,48
14	2,02	1,06	0,49
15	1,85	1,26	0,47
16	2,48	0,95	0,52
17	1,45	1,28	0,47
18	1,52	1,43	0,46
19	8,28	1,74	0,52
20	10,76	1,02	0,58
21	7,34	1,39	0,53
22	10,40	0,62	0,63
23	5,02	1,71	0,53
24	10,83	1,56	0,53

25	10,52	0,83	0,62
26	6,06	1,18	0,57
27	0,96	4,35	0,40

O modelo descreveu bem o comportamento dos fluidos, sendo que as curvas ajustadas apresentaram comportamento pseudoplástico ($0 < n < 1$). A equação do modelo de Herschel-Buckley utilizado para descrever o comportamento dos fluidos é apresenta abaixo.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (10)$$

Onde τ é a tensão de deformação (Pa), $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento (s^{-1}), K é o índice de consistência (Pa.s), n é o índice de comportamento do escoamento (adimensional), τ_0 é a tensão de deformação inicial (Pa).

Os fluidos F19, F20, F21, F22 e F24 apresentaram os maiores limites de escoamento (τ_0), e todos eles possuem um fator em comum: o maior nível de NaCl em suas formulações. Assim, pode-se sustentar a premissa de que maiores concentrações de NaCl na composição dos fluidos de perfuração à base água aumentam seu limite de escoamento, indicando que será necessário aplicar mais força para iniciar sua circulação durante a perfuração.

5.4 Desempenho do Controlador Fuzzy

Nos tópicos a seguir, são apresentados os testes realizados para avaliar o desempenho do controlador e as considerações sobre a eficiência da estratégia desenvolvida por meio na análise de tempo morto, tempos de estabilização e a ocorrência de *overshoots* e *offsets*.

Para a avaliação do desempenho do controlador fuzzy multivariável, foi utilizada uma métrica amplamente reconhecida: o cálculo do Percentual de Tempo Dentro da Banda de Erro (PTDBE). Esta métrica mede a fração do tempo durante a qual a variável controlada permanece dentro de uma faixa predefinida ao redor do valor de referência (setpoint). Para os testes de controle multivariável apresentados, foram utilizadas bandas de erro de 5% e 10% para as variáveis condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade.

5.4.1 Análise do Controle Fuzzy Monovariável da Condutividade Elétrica

Inicialmente, para analisar o comportamento das variáveis densidade e viscosidade aparente, que são as propriedades mais relevantes a serem controladas durante as etapas de perfuração, avaliou-se suas respostas frente à correção apenas da variável condutividade elétrica. Isso foi realizado com intuito de compreender a dinâmica dos efeitos corretivos exclusivamente na condutividade elétrica. Foram conduzidos dois testes do tipo servo, com alterações no setpoint para cima e para baixo.

A Figura 5.2 apresenta a resposta da dinâmica do processo a um teste do tipo servo, no qual um degrau negativo foi aplicado no setpoint da condutividade elétrica.

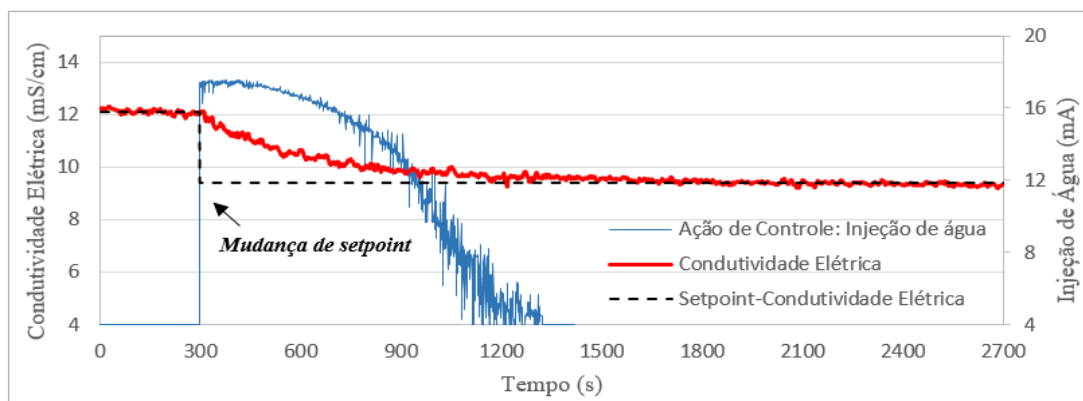


Figura 5.2. Controle Fuzzy Monovariável: Mudança de setpoint na condutividade elétrica de 12,1 mS/cm para 9,5 mS/cm. Ações da variável manipulada (curva azul) e resposta da variável controlada (curva vermelha). Fonte: Autor, 2024.

Inicialmente, o valor da condutividade era de aproximadamente 12,1 mS/cm, quando o valor inserido no seletor de setpoint foi alterado para 9,5 mS/cm. Após a definição do novo setpoint, acionou-se o controlador em 300 segundos e o efeito corretivo começou imediatamente com a dosagem de água no sistema. Graficamente, é possível observar que a variável condutividade elétrica apresenta uma resposta rápida após o início da ação de controle, o que indica que o tempo necessário para que o sistema responda a uma variação da sua entrada é curta. Observou-se o comportamento típico da resposta de um sistema de primeira ordem ao degrau, e o tempo necessário para atingir o novo setpoint foi de 1260 segundos.

Com base nessas informações, é possível concluir que o controlador fuzzy monovariável mostrou-se eficaz em corrigir a condutividade elétrica do fluido, reduzindo-a de 12,1 mS/cm para 9,5 mS/cm em 1260 segundos.

Para atingir o valor desejado de condutividade elétrica, foi necessária a injeção de aproximadamente 76 litros de água. Este dado é crucial, pois evidencia a quantidade significativa de água necessária para corrigir pequenos desvios na condutividade elétrica. Isso aponta para a complexidade do ajuste da condutividade e a importância de um controle preciso e eficiente para minimizar o impacto no volume de água utilizado.

A correção da condutividade elétrica impactou diretamente as propriedades densidade e viscosidade aparente do fluido, apresentados na Figura 5.3. O ajuste da condutividade, ao adicionar água para diluir a concentração de sal, naturalmente alterou a densidade e a viscosidade aparente, destacando a interdependência dessas variáveis. Isso ressalta a necessidade de um controle multivariável mais sofisticado para gerenciar simultaneamente todas as propriedades críticas do fluido de perfuração.

A Figura 5.3 apresenta os efeitos das ações de controle para alterar o setpoint da condutividade elétrica sobre as propriedades densidade e viscosidade aparente. Inicialmente, a densidade e a viscosidade aparente apresentavam valores de aproximadamente 1,12 g/cm³ e 8,06 cP, respectivamente. Após o acionamento do controlador fuzzy para ajustar a condutividade elétrica, ambas as propriedades apresentaram uma redução significativa devido ao volume de água necessário para a correção da propriedade. Inicialmente, o volume de fluido no tanque era de aproximadamente 40 litros, e o volume final foi de 116,3 litros.

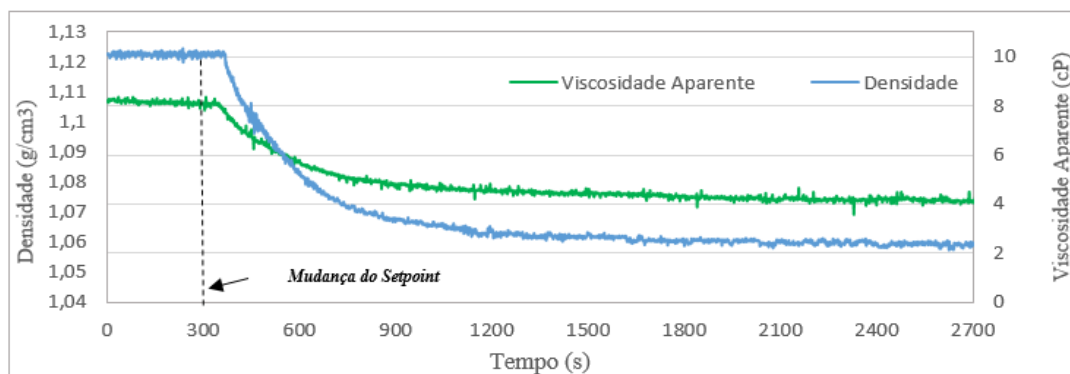


Figura 5.3. Respostas dinâmicas da densidade (curva azul) e da viscosidade aparente do fluido (curva verde) às ações corretivas para controlar a condutividade elétrica. Fonte: Autor, 2024.

O tempo necessário para as propriedades viscosidade aparente e densidade responderem a ação corretiva foi de 48 e 64 segundos, respetivamente. A correção da condutividade elétrica de 12,1 mS/cm para 9,5 mS/cm resultou na descaracterização das propriedades do fluido devido ao volume de água adicionado.

A densidade atingiu valores próximos 1,058 g/cm³, apresentando uma redução de 5,86%. Esta variação significativa indica que a adição de água para corrigir a condutividade impacta diretamente na densidade do fluido, alterando bastante as características do fluido durante a perfuração.

A viscosidade aparente apresentou uma redução ainda mais drástica, caindo de 8,06 cP para 4,09 cP, uma diminuição de aproximadamente 49%. Essa grande redução pode afetar a capacidade do fluido de transportar cascalhos e de manter as partículas em suspensão, o que é crítico para a eficiência da perfuração.

O segundo teste de controle na mudança do setpoint é ilustrado na Figura 5.4, que mostra um degrau na condutividade elétrica de 10 mS/cm para 20 mS/cm. Após o acionamento do controlador em 294 segundos, é possível visualizar a ação de controle (dosagem de cloreto de sódio) atuando instantaneamente. Houve um tempo morto de 36 segundos para a condutividade elétrica e um tempo de subida de cerca de 126 segundos até a acomodação. A transição entre os setpoints apresenta similaridade com a resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem com tempo morto.

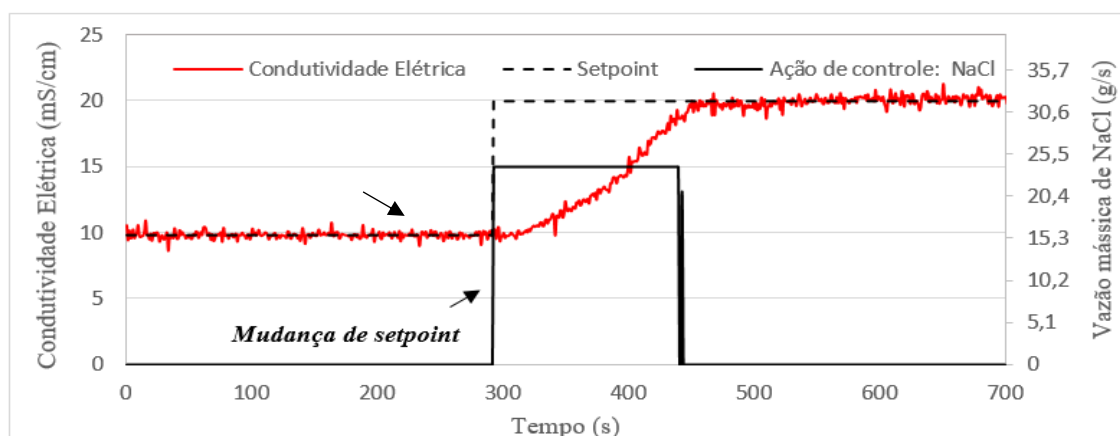


Figura 5.4. Controle Fuzzy Monovariável: Mudança de setpoint na condutividade elétrica de 10 mS/cm para 20 mS/cm- Ações da variável manipulada (cinza) e resposta da variável controlada (curva vermelha). Fonte: Autor, 2024.

É possível verificar que as funções de pertinência para o controle fuzzy monovariável dessa propriedade estão bem ajustadas, pois, durante a mudança do setpoint, as ações de controle na dosagem do cloreto de sódio foram suficientes para atingir o novo valor de referência sem ocasionar *overshoot* nem apresentar *offset*. A massa total de NaCl necessária para a correção da propriedade foi de aproximadamente 4,05 kg.

Na Figura 5.5, são observados os efeitos da ação corretiva na condutividade elétrica nas variáveis densidade e viscosidade aparente. Inicialmente, a densidade do fluido tinha um valor de aproximadamente 1,01 g/cm³ e a viscosidade aparente era de 2,10 cP. Após o acionamento do controlador *fuzzy*, as medidas de ambas as propriedades apresentaram um aumento, resultando em um acréscimo de aproximado de 2% para a densidade, que atingiu o valor de 1,03 g/cm³, e cerca de 16 % para a viscosidade aparente, que alcançou o valor de 2,51 cP.

Observa-se também que a densidade apresentou uma resposta à ação corretiva da condutividade elétrica com tempo morto de 88 segundos e tempo de ascensão de 116 segundos, ambos os parâmetros significativamente maiores do que a reposta da viscosidade aparente, que apresentou os respectivos tempos iguais a 9 e 10 segundos.

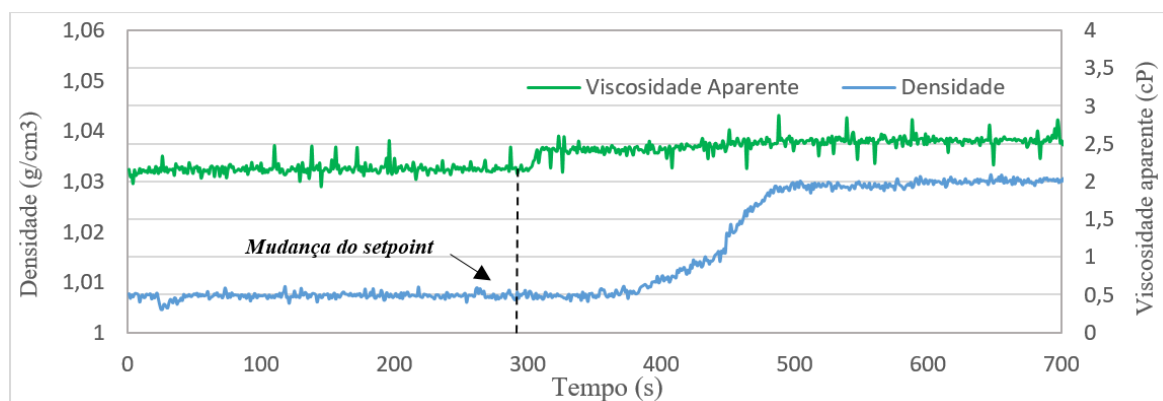


Figura 5.5. Respostas da densidade (curva azul) e da viscosidade aparente do fluido (curva verde) às ações corretivas para controlar a condutividade elétrica. Fonte: Autor, 2024.

Os resultados obtidos demonstram que o controlador fuzzy monovariável foi eficaz na correção da condutividade elétrica do fluido de perfuração. No entanto, a correção da condutividade elétrica causou um impacto significativo nas propriedades de densidade e viscosidade aparente do fluido. A adição de um grande volume de água necessária para ajustar a condutividade elétrica resultou em uma descaracterização das propriedades do fluido.

Estes resultados indicam a necessidade de um controlador multivariável que possa simultaneamente ajustar a condutividade elétrica, densidade e viscosidade aparente do fluido de perfuração. Um sistema de controle multivariável possibilitaria o controle mais adequado das propriedades do fluido, minimizando os impactos adversos causados ao se corrigir uma única propriedade, a estabilidade elétrica. A implementação do sistema de controle fuzzy multivariável pode otimizar a eficiência do processo de perfuração, reduzir a quantidade de água necessária para ajustes e melhorar a estabilidade das operações, visto que as outras propriedades, densidade e viscosidade aparente, permaneceriam em seus respectivos setpoints.

Finalmente, enquanto o controlador fuzzy monovariável mostrou-se eficaz para realizar o controle da condutividade elétrica, a necessidade de um sistema de controle mais abrangente e sofisticado mostrou-se fundamental. Um controlador multivariável pode proporcionar o melhor controle das propriedades inter-relacionadas do fluido de perfuração, resultando em operações mais eficientes e seguras.

5.4.2 Desempenho do Controlador Multivariável: Testes do Tipo Servo

5.4.2.1 Teste Servo Para a Condutividade Elétrica

Os experimentos relacionados à aplicação de um controlador fuzzy multivariável focaram no controle simultâneo das propriedades físico-químicas dos fluidos de perfuração: densidade, condutividade elétrica e viscosidade aparente. Neste contexto, a taxa de adição de goma xantana, barita, cloreto de sódio e água foram as variáveis manipuladas pelo controlador, enquanto a densidade, condutividade elétrica e viscosidade aparente do fluido foram as variáveis controladas.

Na Figura 5.6, apresentam-se as dinâmicas em malha fechada das variáveis controladas condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade do fluido de perfuração. O setpoint da condutividade elétrica foi alterado de 11 mS/cm para 14 mS/cm no instante de tempo correspondente a 339 segundos, enquanto os valores dos setpoints da viscosidade aparente e da densidade foram mantidos fixos em 7,1 cP e 1,05 g/cm³, respectivamente.

Graficamente, é possível observar que a adição de sal necessária para atingir o novo setpoint da condutividade elétrica resultou tanto no aumento da viscosidade aparente quanto na densidade do fluido, o que provocou ações de controle para corrigi-las mediante a adição de água e goma xantana. Após a correção da viscosidade aparente, que ocorreu entre 572 e 598 segundos, é possível observar que esta variável apresentou um pequeno *offset* negativo devido ao volume de água adicionado ao sistema. No entanto, o setpoint da viscosidade aparente foi reestabelecido com a adição do viscosificante. O efeito dessa ação de controle causou a aparição de *overshoots* devido ao efeito de hidratação tardia do material viscosificante. Entretanto, a manipulação adequada na adição de água foi suficiente para compensar esse efeito e retornar a viscosidade aparente ao valor desejado por volta de 1100 segundos.

Este resultado destaca a capacidade do controlador fuzzy multivariável de ajustar com precisão as propriedades do fluido de perfuração, mesmo diante de interações complexas entre as variáveis.

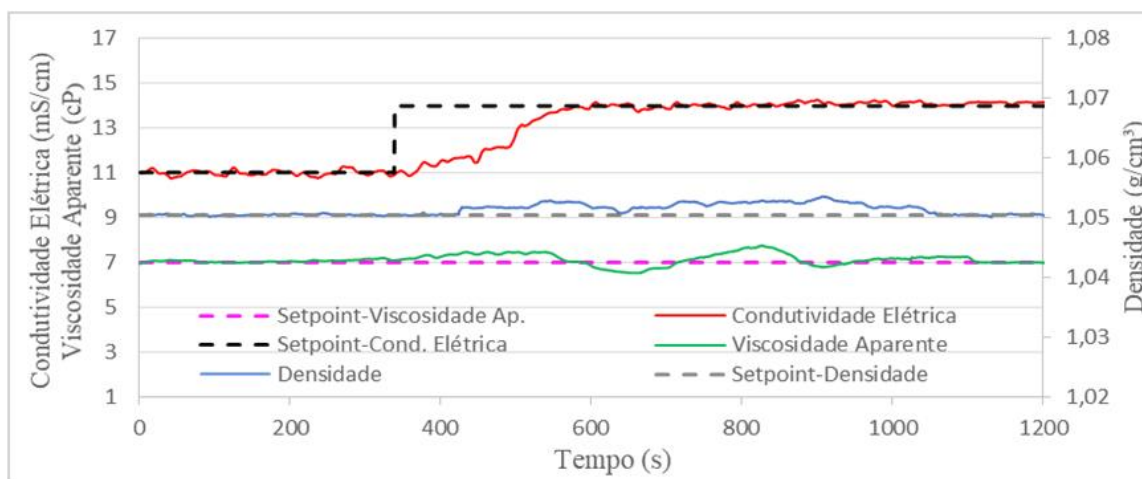


Figura 5.6. Controle fuzzy multivariável: Testes do tipo servo para a condutividade elétrica (curva vermelha) e regulador para densidade (curva azul) e viscosidade aparente (curva verde). Fonte: Autor, 2024.

Ações de controle referentes à taxa de adição de sal e a resposta dinâmica da condutividade elétrica são ilustradas na Figura 5.7. A massa total de NaCl necessária para realizar a mudança do setpoint da condutividade elétrica foi de aproximadamente 4,12 kg.

A mudança do setpoint de 11 mS/cm para 14 mS/cm foi alcançada de forma eficiente, demonstrando a capacidade do controlador em ajustar rapidamente a condutividade elétrica do fluido ao novo setpoint.

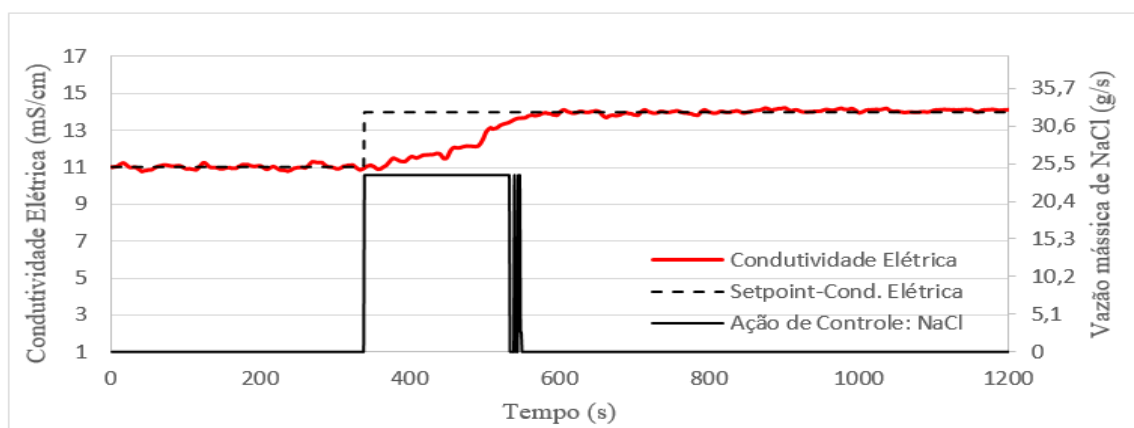


Figura 5.7. Controle fuzzy multivariável: Teste servo para a condutividade elétrica. Ações de controle e resposta dinâmica da condutividade elétrica. Fonte: Autor, 2024.

Ações de controle referentes à vazão mássica de goma xantana e a resposta dinâmica da viscosidade aparente são ilustradas na Figura 5.8. A massa total de goma xantana para manter fixo o setpoint da viscosidade aparente do fluido foi 0,09 kg.

A viscosidade aparente inicialmente aumentou devido à mudança no setpoint da condutividade elétrica, o que acionou a regra para adição de água para corrigir esse efeito. Por volta de 600 segundos, foi necessário corrigir a diluição causada pela diluição excessiva com a adição controlada de goma xantana. Manipulações adicionais e alternadas nas vazões de água e goma xantana foram necessárias para controlar adequadamente a viscosidade aparente. O controle desta variável mostrou-se especialmente complexo devido à dinâmica adicional causada pelo efeito de hidratação tardio apresentado pela goma xantana.

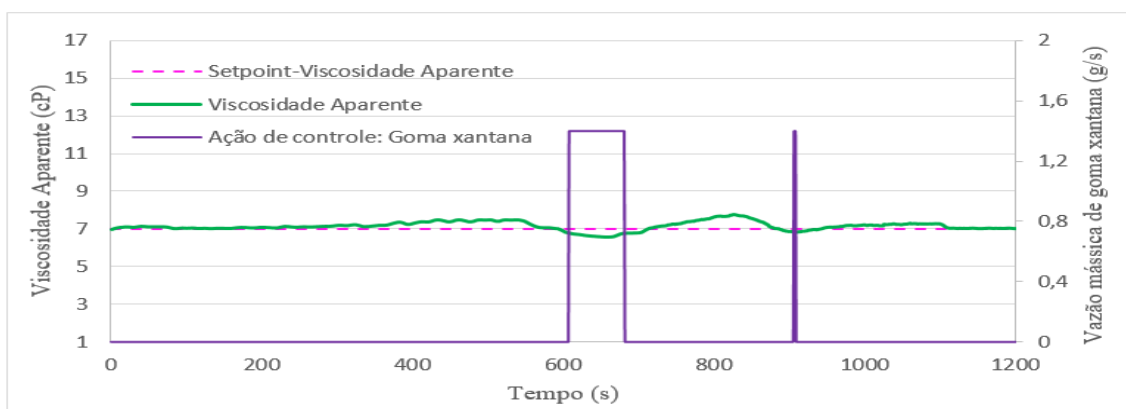


Figura 5.8. Controle fuzzy multivariável: Teste servo para a condutividade elétrica. Ações de controle para rejeitar as perturbações na viscosidade aparente e a resposta dinâmica dessa variável. Fonte: Autor, 2024.

As ações de controle referentes à injeção de água no sistema são ilustradas na Figura 5.9. O volume fluído ao final do experimento saltou de 40 para 67,2 litros por conta da injeção de água necessária para corrigir os setpoints das variáveis controladas densidade e viscosidade aparente.

A densidade do fluído foi inicialmente alterada pela adição de sal necessária para ajustar a condutividade elétrica, mas também foi impactada pela adição de goma xantana por volta dos 600 segundos para corrigir a viscosidade aparente. No entanto, a adição de água permitiu reestabelecer a densidade ao seu setpoint desejado.

Os resultados obtidos destacam a eficácia do controlador fuzzy multivariável na gestão simultânea das propriedades físico-químicas dos fluídos de perfuração. A capacidade do controlador de ajustar rapidamente a condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade demonstra sua robustez e precisão, mesmo diante das interações fortes e complexas entre as variáveis manipuladas e controladas.

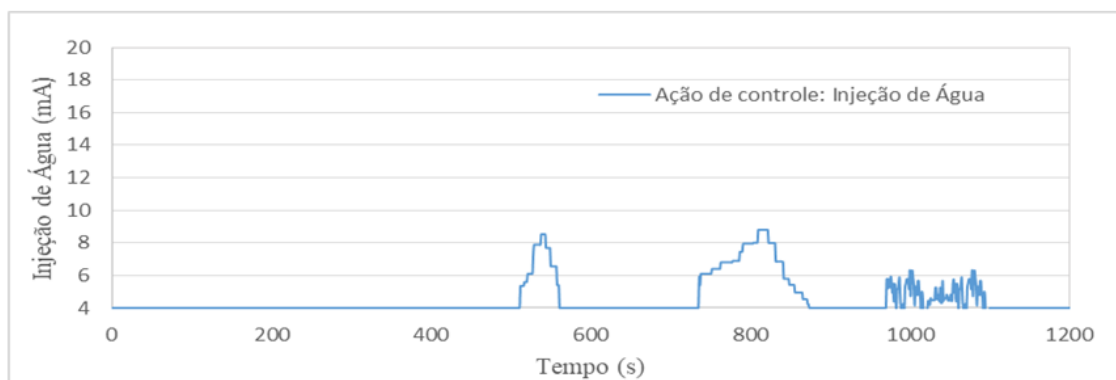


Figura 5.9. Controle fuzzy multivariável: Teste servo para a condutividade elétrica. Ações de controle correspondente à injeção de água no sistema para rejeitar as perturbações na viscosidade aparente e na densidade do fluído. Fonte: Autor, 2024.

Para fornecer uma análise mais objetiva acerca do desempenho em malha fechada do controlador fuzzy multivariável, apresentam-se na Tabela 5-4 os resultados da porcentagem do tempo dentro da banda de erro (PTDBE) para as variáveis controladas condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade. A métrica PTDBE é essencial para avaliar a eficácia dos controladores, pois indica a fração de tempo em que as variáveis permanecem dentro de uma faixa de erro aceitável, oferecendo uma medida clara e intuitiva de estabilidade e conformidade do sistema.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5-2, pode-se inferir algumas considerações:

- Condutividade Elétrica

Os resultados mostram que o controlador demonstrou um desempenho moderado para a condutividade elétrica com uma banda de erro de 5%, mantendo a variável dentro da faixa desejada por aproximadamente 23,16% do tempo. Quando a banda de erro foi ampliada para 10%, houve uma melhoria significativa no desempenho, com a variável dentro da faixa aceitável por 37,91% do tempo. Embora isso represente uma melhoria, a porcentagem ainda é relativamente baixa, sugerindo que o controlador tem dificuldades em lidar com variações rápidas ou significativas na condutividade elétrica. Esses resultados indicam a necessidade de uma possível reconfiguração do controlador para melhorar o seu desempenho em relação a esta variável.

- Viscosidade Aparente

Para a viscosidade aparente, o controlador apresentou um desempenho semelhante. Com uma banda de erro de 5%, a variável permaneceu dentro da faixa desejada por 18,73% do tempo, aumentando para 24,97% com uma banda de erro de 10%. Estes resultados indicam que, embora o controlador consiga manter a viscosidade aparente dentro de uma faixa aceitável, ele ainda apresenta limitações. A melhoria com a banda de erro mais ampla sugere que o controlador pode estar ajustado para uma resposta mais lenta ou menos agressiva, o que pode ser revisado para melhorar o desempenho sem comprometer a estabilidade do sistema.

- Densidade

No caso da densidade, o controlador apresentou um desempenho excelente, com o PTDBE atingindo 100% tanto para a banda de erro de 5% quanto para a de 10%. Este resultado indica que o controlador é altamente eficaz em manter a densidade dentro da faixa especificada, demonstrando um alto grau de precisão e estabilidade. No entanto, é importante considerar se este nível de desempenho pode ser mantido em condições operacionais mais variáveis ou exigentes.

Os resultados mostram que a ampliação da banda de erro resulta em um aumento do tempo em que as variáveis controladas permanecem dentro da faixa aceitável, destacando a relação entre precisão e tolerância aceitável. Embora a densidade tenha apresentado um excelente desempenho, a condutividade elétrica e a viscosidade aparente mostraram que há espaço para melhorias nos controladores utilizados.

Em resumo, a análise do PTDBE fornece insights valiosos sobre a eficácia dos controladores. Enquanto a densidade demonstrou um desempenho ideal, as outras variáveis indicam a necessidade de ajustes para melhorar a precisão e a estabilidade, garantindo assim um controle mais eficaz e robusto para todas as condições operacionais.

Tabela 5-4. Cálculo do PTDBE para o teste servo para a condutividade elétrica e regulatório para a viscosidade aparente e densidade. Fonte: Autor, 2024.

Teste servo para a condutividade elétrica e regulatório para a viscosidade aparente e densidade		
Variável controlada	PTDBE (5%)	PTDBE (10%)
Condutividade elétrica	23,16	37,91
Viscosidade Aparente	18,73	24,97
Densidade	100,0	100,0

5.4.2.2. Teste Servo Para a Viscosidade Aparente

A Figura 5.10 apresenta as dinâmicas das variáveis condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade diante da mudança de setpoint na variável viscosidade aparente. Os valores dos setpoints foram de 8mS/cm para a condutividade elétrica e 1,025 g/cm³ para a densidade. Quanto à viscosidade aparente, em 258 segundos houve a mudança do setpoint de 5 para 8 cP.

Por meio da análise das respostas dinâmicas das variáveis controladas, é possível visualizar que a mudança no setpoint da viscosidade aparente foi obtida com sucesso, embora a densidade e a condutividade elétrica tenham sido perturbadas pelas atuações do controlador fuzzy multivariável nas variáveis manipuladas de adição de goma xantana e injeção de água.

O efeito da interação entre as variáveis manipuladas e controladas pode ser mais bem explicado com auxílio das Figuras a seguir.

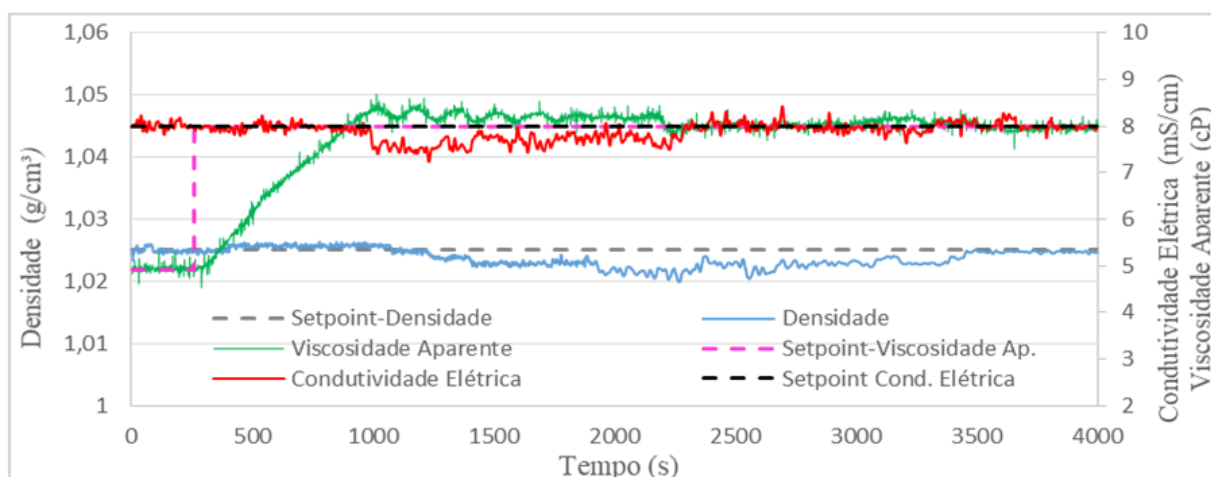


Figura 5.10. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a viscosidade aparente (curva verde) e regulador para a condutividade elétrica (curva vermelha) e densidade (curva azul). Fonte: Autor, 2024.

A Figura 5.11 apresenta a atuação do controlador fuzzy para realizar a mudança de setpoint por meio da adição de goma xantana, assim como a resposta dinâmica da viscosidade aparente. Percebe-se que a resposta dessa variável apresentou um pequeno *overshoot*.

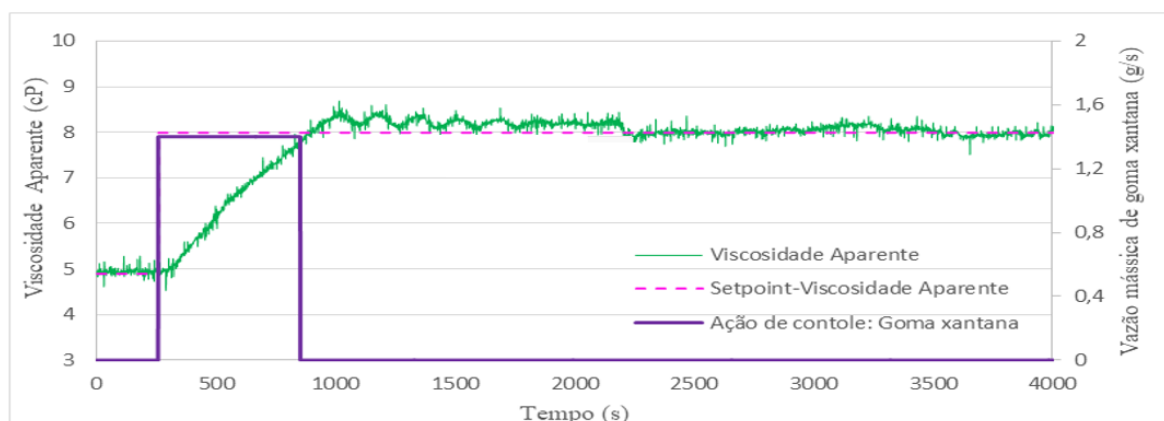


Figura 5.11. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a viscosidade aparente. Ação de controle e resposta dinâmica relacionadas à mudança de setpoint da viscosidade aparente. Fonte: Autor, 2024.

No entanto, a adição de água manipulada pelo controlador fuzzy multivariável, ilustrada na Figura 5.12, foi capaz de minimizar o *overshoot*, bem como suavizar o efeito da hidratação da goma xantana. O controlador multivariável levou a viscosidade aparente ao novo setpoint em aproximadamente 2000 segundos.

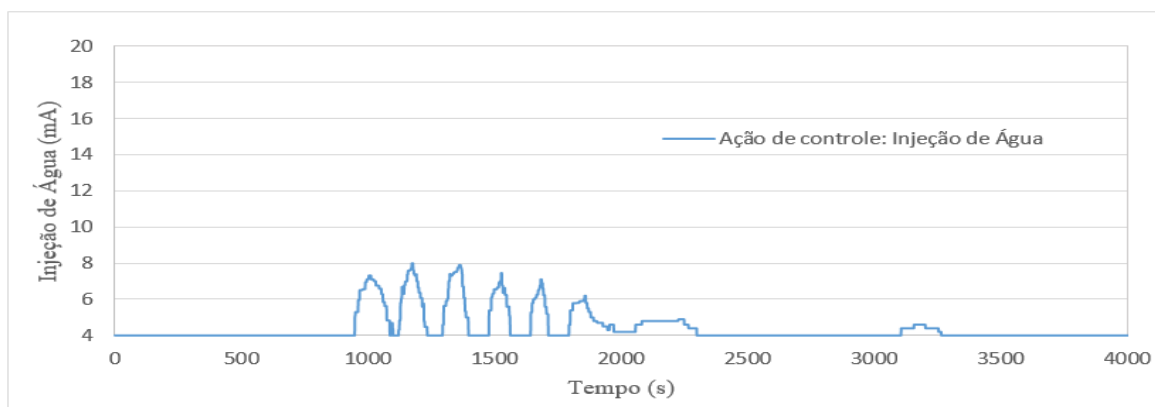


Figura 5.12. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a viscosidade aparente. Ações de controle na taxa de injeção de água para corrigir o efeito de hidratação do viscosificante. Fonte: Autor, 2024.

Devido à água adicionada para corrigir o overshoot da viscosidade aparente (Figura 5.12), a condutividade elétrica foi afetada, causando um *offset* negativo nessa variável controlada. Contudo, o controlador fuzzy multivariável foi capaz de rejeitar o efeito dessa perturbação e trazer a condutividade elétrica de volta ao seu setpoint por meio de ações de controle na taxa de adição de sal. O comportamento dinâmico desta variável manipulada e da condutividade elétrica podem ser observados na Figura 5.13.

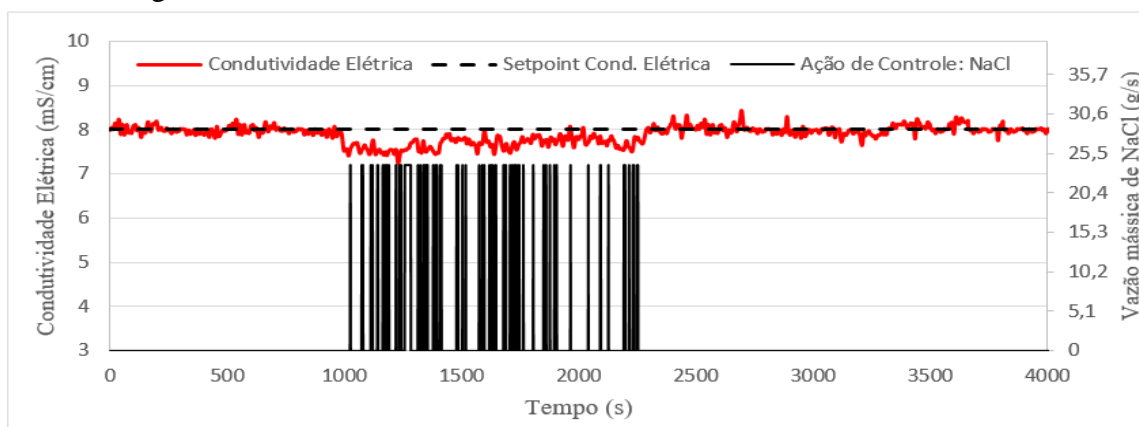


Figura 5.13. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a viscosidade aparente. Ações de controle na taxa de adição de sal para rejeitar as perturbações na condutividade elétrica e resposta da dinâmica dessa variável controlada. Fonte: Autor, 2024.

A densidade do fluido de perfuração também apresentou uma queda, contudo, a adição de sal contribuiu para o adensamento do fluido como efeito indireto, reduzindo a necessidade, mas não eliminando, a atuação do controlador na adição de barita para a correção dessa variável controlada. As ações de controle na taxa de adição de barita e o comportamento dinâmico da viscosidade aparente podem ser observados na Figura 5.14.

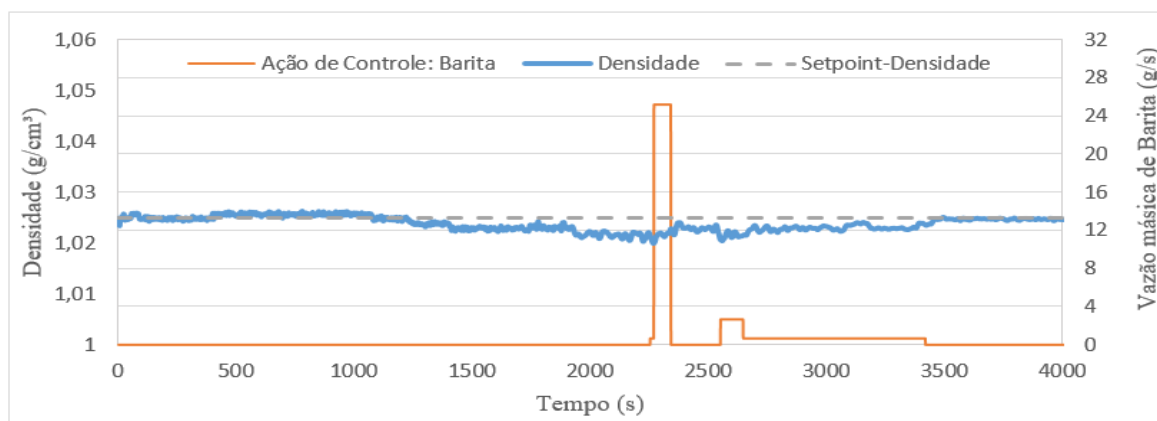


Figura 5.14. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a viscosidade aparente. Ações de controle na taxa de adição de barita para rejeitar as perturbações na viscosidade e resposta da dinâmica dessa variável controlada. Fonte: Autor, 2024.

Ao término desse experimento de controle, a massa de NaCl necessária para realizar a mudança no setpoint da condutividade elétrica foi de aproximadamente 2,1 kg. Para manter a viscosidade aparente e a densidade do fluido de perfuração em seus valores de referência, foram necessários aproximadamente 0,79 kg de goma xantana e 2,8 kg de barita. Já o volume fluido ao final do fluido de perfuração saltou de 40 para 71 litros.

Os resultados demonstram que o controlador fuzzy multivariável manteve de forma robusta e eficaz as propriedades dos fluidos de perfuração dentro dos setpoints desejados, mesmo na presença de efeitos de interação entre as variáveis manipuladas e controladas. O controlador fuzzy ajustou a condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade com precisão em seus setpoints, mostrando potencial para atuar em condições de operações reais de perfuração.

Dando continuidade à análise mais objetiva acerca do desempenho em malha fechada do controlador fuzzy multivariável, a Tabela 5-5 apresenta os resultados da porcentagem do tempo dentro da banda de erro (PTDBE) para as variáveis controladas neste teste, onde:

Os resultados indicam que o controlador teve um desempenho moderado para a condutividade elétrica, mantendo a variável dentro da banda de erro de 5% por 31,90% do tempo e dentro da banda de erro de 10% por 49,13% do tempo. Embora o aumento da banda de erro de 5% para 10% tenha resultado em uma melhoria significativa no desempenho, a porcentagem de tempo dentro da faixa desejada ainda revela limitações na precisão do controle. Isso sugere que o controlador pode se beneficiar de ajustes nos parâmetros ou de uma reavaliação das estratégias de controle para melhorar a resposta em condições mais restritivas.

Para a viscosidade aparente, o controlador apresentou 22,01% do tempo dentro da banda de erro de 5% e 40,85% do tempo dentro da banda de erro de 10%. Assim como na condutividade elétrica, o desempenho melhorou com o aumento da banda de erro, mas os resultados ainda indicam que há espaço para melhorias. A performance moderada pode ser um indicativo de que o controlador fuzzy, embora eficaz, precisa de refinamentos adicionais para lidar melhor com as variações na viscosidade aparente, especialmente em faixas de erro mais estreitas.

O desempenho do controlador para a densidade foi excelente, com PTDBE de 100% tanto para a banda de erro de 5% quanto para a de 10%. Isso indica que o controlador conseguiu manter a densidade constantemente dentro das faixas de erro especificadas, demonstrando uma alta precisão e estabilidade. No entanto, é importante considerar que a densidade, por ser uma variável menos

suscetível a rápidas mudanças, pode ser mais fácil de controlar, o que pode não refletir completamente a eficácia do controlador em situações mais dinâmicas.

Tabela 5-5. Cálculo do PTDBE para o teste servo para a viscosidade aparente e regulatório para a condutividade elétrica e densidade. Fonte: Autor, 2024.

Teste servo para a viscosidade aparente e regulatório para a condutividade elétrica e densidade		
Variável controlada	Variável controlada	Variável controlada
Condutividade elétrica	Condutividade elétrica	Condutividade elétrica
Viscosidade Aparente	Viscosidade Aparente	Viscosidade Aparente
Densidade	Densidade	Densidade

A análise dos resultados aponta para um bom desempenho do controlador, com excelentes resultados para a densidade, mas com espaço para melhorias significativas na condutividade elétrica e na viscosidade aparente. A revisão e otimização dos parâmetros de controle podem ajudar a alcançar uma maior precisão e estabilidade, beneficiando o desempenho geral do sistema de controle.

5.4.2.3. Teste Servo Para a Densidade

Na Figura 5.15 são apresentadas as dinâmicas das variáveis condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade em resposta a mudança de setpoint para a densidade. Para esse teste, foram fixados os setpoints de 7,7 mS/cm para condutividade elétrica e 5 cP para a viscosidade aparente. A mudança do setpoint da densidade ocorreu em 191 segundos, sendo alterado de 1,029 para 1,04 g/cm³.

A análise dessa figura mostra que essa mudança de setpoint resultou na alteração da condutividade elétrica e da viscosidade aparente do fluido, o que promoveu ações de controle para reestabelecer os setpoints das variáveis controladas.

Além disso, é possível afirmar que a mudança de setpoint realizada na densidade foi alcançada com sucesso pelo controlador fuzzy multivariável, mesmo frente o forte acoplamento entre as variáveis manipuladas e controladas.

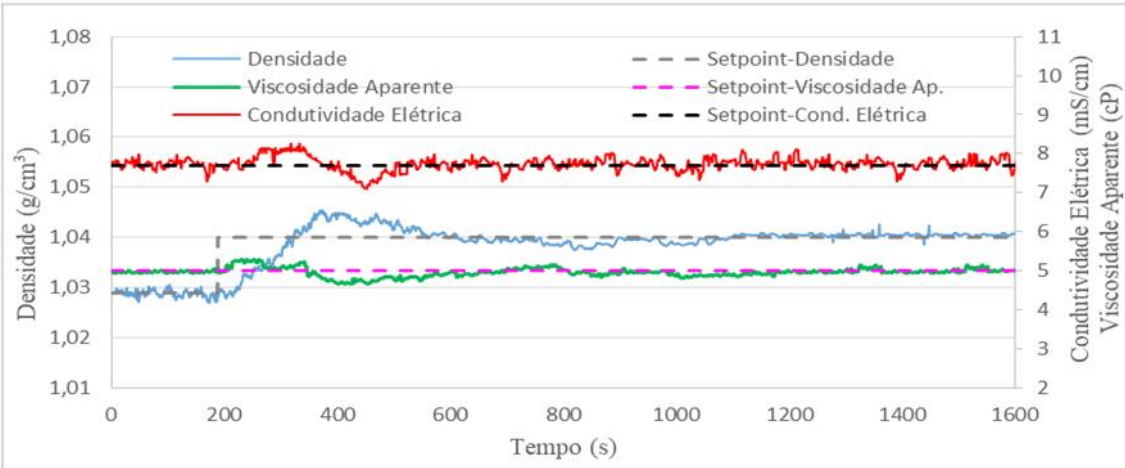


Figura 5 15. Controle Fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a densidade (curva azul) e regulador para a condutividade elétrica (curva vermelha) e viscosidade aparente (curva verde). Fonte: Autor, 2024.

A análise da Figura 5.16 permite verificar que a regra fuzzy correspondente à ação de controle associada à adição de barita foi acionada logo após a mudança do setpoint, em torno de 195 segundos, e foi mantida ativa até o tempo de 280 segundos, aproximadamente. Essa ação de controle impôs uma dinâmica rápida na resposta da densidade, mas que resultou em um overshoot de aproximadamente 1,045 g/cm³ em torno dos 350 segundos.

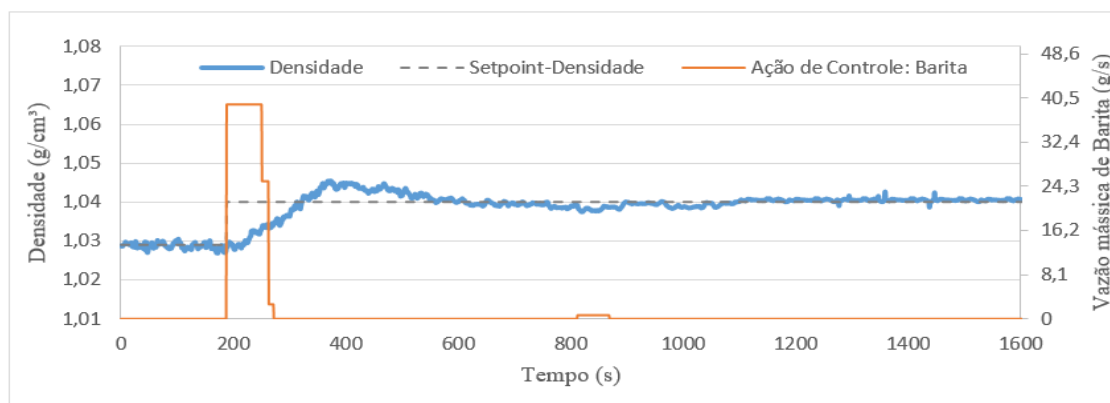


Figura 5.16. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a densidade. Ação de controle e resposta dinâmica relacionadas à mudança de setpoint da densidade. Fonte: Autor, 2024.

Como efeito secundário da adição de barita para mudar o setpoint da viscosidade, a condutividade elétrica do fluido também foi alterada, sendo possível verificar o aumento dessa propriedade por volta dos 250 segundos na Figura 5.15 (ou na Figura 5.18).

Para mitigar tanto o overshoot na densidade, quanto corrigir o aumento na condutividade elétrica do fluido, a malha de controle relacionada à adição de água foi ativada em torno dos 250 segundos, conforme ilustrado na Figura 5.17.

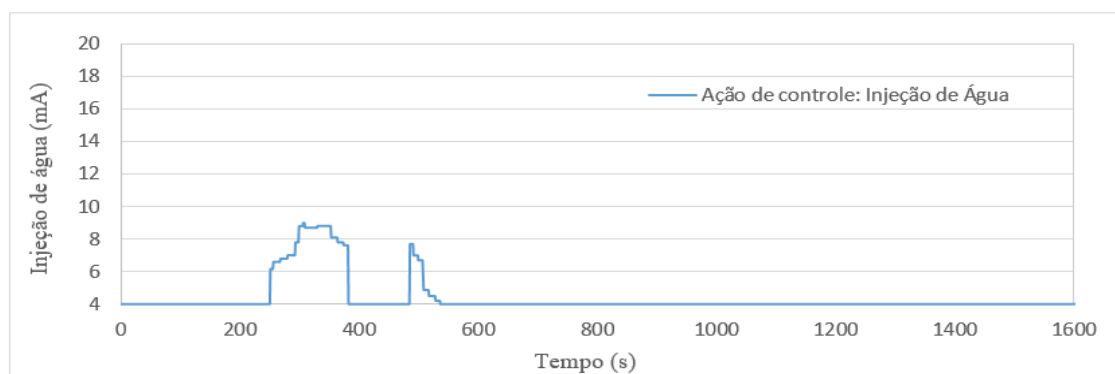


Figura 5.17 Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a densidade. Ações de controle na taxa de injeção de água para corrigir o overshoot da densidade e a condutividade elétrica. Fonte: Autor, 2024.

Contudo, as ações de controle que resultaram na adição de água no sistema para mitigar o efeito do overshoot na densidade e o aumento na condutividade elétrica, impactaram demasiadamente essa última propriedade, levando-a a valores abaixo do setpoint por volta dos 400 segundos, conforme pode ser verificado na Figura 5.18. Além disso, a adição de água também perturbou a viscosidade

aparente do fluido, cujo valor sofreu uma diminuição devido à diluição do sistema, como pode ser observado na Figura 5.19.

Para compensar esses efeitos, o controlador fuzzy multivariável acionou as malhas de controle da condutividade elétrica e da viscosidade aparente do fluido por meio da manipulação das taxas de adição de sal (Figura 5.18) e de goma xantana (Figura 5.19), respectivamente.

A adição de cloreto de sódio para a correção da condutividade elétrica teve início por volta de 420 segundos, como pode ser visto na Figura 5.18, e se fez necessária para compensar o volume de água adicionado ao sistema, que resultou na queda desta propriedade conforme já destacado anteriormente.

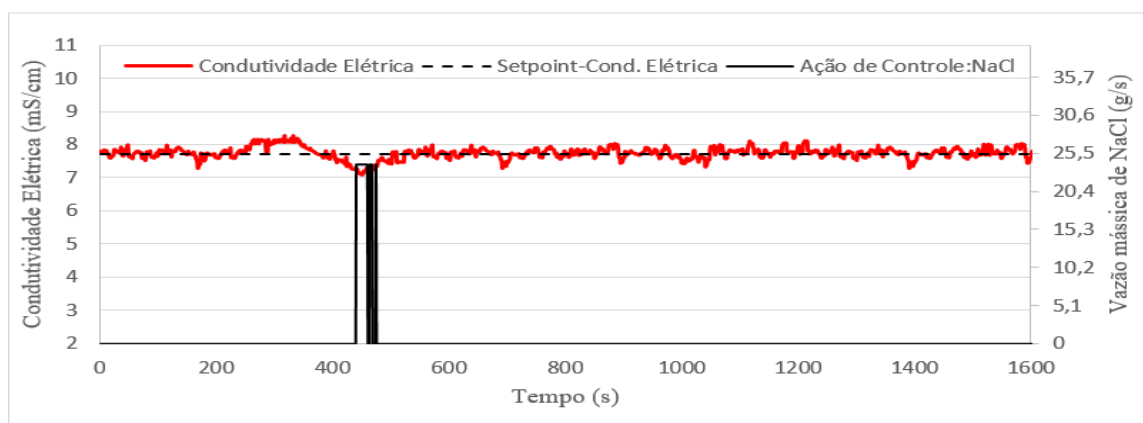


Figura 5.18 Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a densidade. Ações de controle na taxa de adição de sal para rejeitar as perturbações da condutividade e resposta da dinâmica dessa variável controlada. Fonte: Autor, 2024

A variável controlada viscosidade aparente sofreu uma leve perturbação já no início do teste de controle servo para a densidade, apresentando um pequeno aumento por volta dos 200 segundos, como pode ser visto na Figura 5.19. Este desvio foi causado pela massa de barita adicionada ao sistema para propiciar a mudança no setpoint da densidade. No entanto, esse desvio foi logo atenuado pela adição de água para mitigar o overshoot na resposta da densidade, conforme discutido anteriormente. No entanto, como também já foi destacado, a adição de água resultou em uma queda acentuada na concentração da viscosidade aparente a partir de aproximadamente 390 segundos. Por este motivo, a regra fuzzy associada ao controle dessa propriedade acionou a manipulação da goma xantana para reestabelecer o setpoint da viscosidade aparente, o que ocorreu a partir dos 600 segundos, aproximadamente.

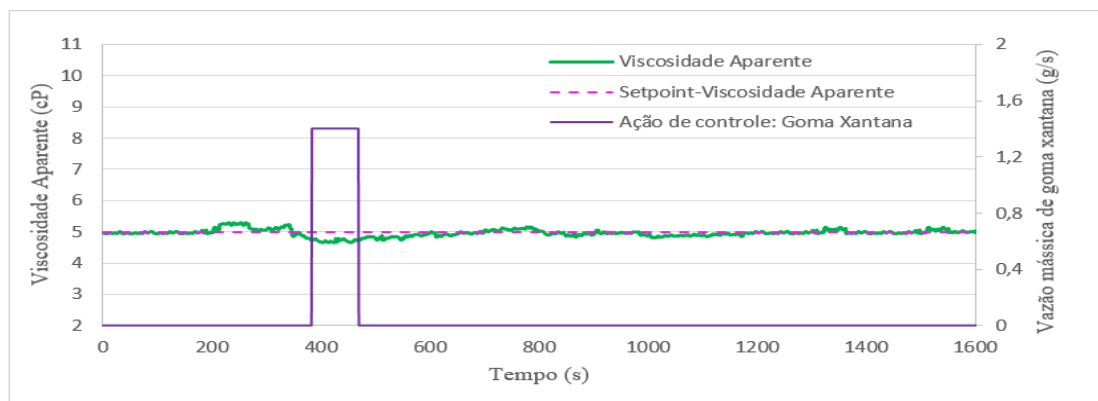


Figura 5.19. Controle fuzzy multivariável: Teste do tipo servo para a densidade. Ação de controle para rejeitar as perturbações na viscosidade aparente e a resposta dinâmica dessa variável Fonte: Autor, 2024.

O balanço final do teste de controle para a alterar a densidade do fluido resultou em um consumo de aproximadamente 6,7 kg de barita. A massa de insumo necessária para manter a condutividade elétrica e viscosidade aparente em seus respectivos setpoints foi de 0,57 kg de NaCl e 0,12 kg de goma xantana. Além disso, ao final do teste, o volume fluido total do sistema saltou de 40 para 63,7 litros.

Com base nos dados apresentados na Tabela 5-6 para o Percentual de Tempo Dentro da Banda de Erro (PTDBE), observam-se os seguintes resultados:

Para a condutividade elétrica, o controlador teve um desempenho moderado, com 22,73% do tempo dentro da banda de erro de 5% e 50,85% do tempo dentro da banda de erro de 10%. Como esperado, o aumento da banda de erro de 5% para 10% resultou em uma melhoria significativa no desempenho, indicando que uma maior margem de erro permite ao controlador manter melhor a variável dentro da faixa desejada. No entanto, mesmo com a banda de erro ampliada, o controlador não conseguiu manter a condutividade elétrica dentro da faixa aceitável por mais da metade do tempo, o que sugere que melhorias adicionais no ajuste do controlador podem aumentar o desempenho do controlador.

Para a variável viscosidade aparente, o controlador apresentou um desempenho razoável, com 36,40% do tempo dentro da banda de erro de 5% e 63,39% do tempo dentro da banda de erro de 10%. Assim como na condutividade elétrica, o aumento da banda de erro resultou em uma melhoria significativa no desempenho. Embora o desempenho seja melhor do que o observado para a condutividade elétrica, a porcentagem de tempo dentro da faixa de erro de 5% ainda é relativamente baixa, indicando que o controlador pode ser otimizado para lidar melhor com variações na viscosidade aparente.

A variável densidade continua sendo a de melhor desempenho do ponto de vista da amplitude das bandas para a análise do desempenho, com 100% do tempo dentro da faixa aceitável. Para a condutividade elétrica e a viscosidade aparente, o aumento da banda de erro melhorou significativamente o desempenho do controlador, sugerindo que uma maior margem de tolerância pode ser benéfica nessas situações. No entanto, o desempenho moderado dessas variáveis indica a necessidade de ajustes finos e possíveis melhorias no algoritmo de controle para garantir que todas as variáveis possam ser mantidas dentro das faixas desejadas com maior consistência.

Tabela 5-6. Cálculo do PTDBE para o Teste servo para a densidade e regulatório para a condutividade elétrica e viscosidade aparente. Fonte: Autor, 2024.

Teste servo para a densidade e regulatório para a condutividade elétrica e viscosidade aparente		
Variável controlada	PTDBE (5%)	PTDBE (10%)
Condutividade elétrica	22,73	50,85
Viscosidade Aparente	36,40	63,39
Densidade	100,0	100,0

Enquanto o controlador fuzzy multivariável mostra-se altamente eficaz para a densidade, há espaço para melhorias no controle da condutividade elétrica e da viscosidade aparente. A revisão dos parâmetros de controle pode ajudar a alcançar um desempenho mais uniforme e robusto para todas as variáveis analisadas.

5.4.3 Desempenho do Controlador Fuzzy Multivariável: Testes do Tipo Regulador

Para verificar o desempenho do controlador fuzzy multivariável em problemas do tipo regulador e avaliar sua capacidade de rejeitar perturbações severas, foram realizados dois testes. Em um deles, realizou-se a adição abrupta de água no sistema, simulando um kick de água durante a perfuração de um poço de petróleo, enquanto no outro teste houve a adição instantânea de 500 gramas de cloreto de sódio ao sistema. O objetivo desses testes foi avaliar a capacidade do controlador fuzzy multivariável de manter as propriedades físico-químicas do fluido de perfuração, condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade, dentro dos valores desejados.

5.4.3.1 Simulação de uma perturbação do tipo kick de água

O primeiro teste do tipo regulador ao qual o controlador fuzzy multivariável foi submetido foi a adição abrupta de 10 litros de água ao sistema por volta dos 530 segundos. O comportamento dinâmico em malha fechada das variáveis controladas, condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade, é ilustrado na Figura 5.20. É possível visualizar que as três variáveis controladas retornaram aos respectivos setpoints após um período de aproximadamente 1350 segundos. Para este teste, os valores dos setpoints foram definidos como sendo 8 mS/cm para a condutividade elétrica, 8,1 cP para a viscosidade aparente e 1,024 g/cm³ para a densidade.

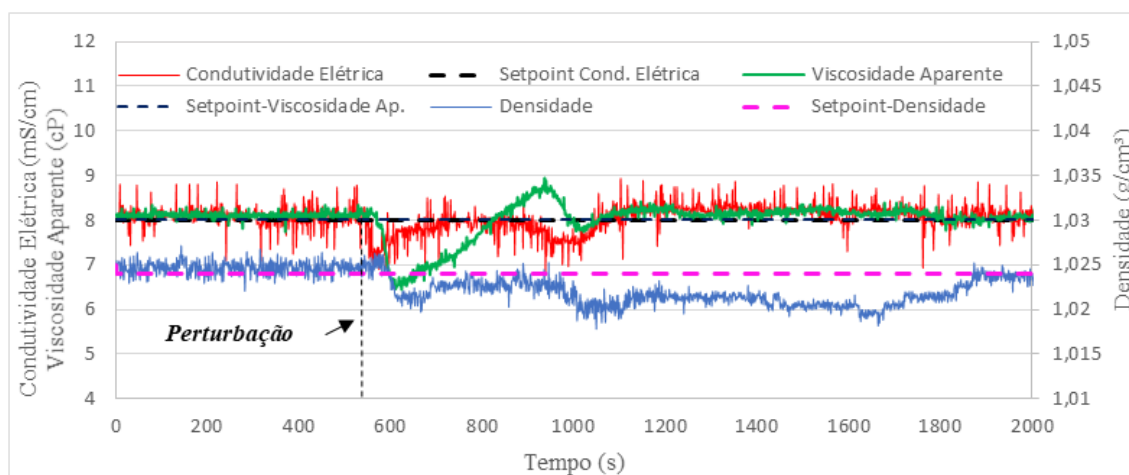


Figura 5.20. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Respostas em malha fechada das variáveis controladas condutividade elétrica (curva vermelha), viscosidade aparente (curva verde) e densidade (curva azul) após perturbação com a adição de 10 litros de água. Fonte: Autor, 2024.

Por meio da análise do comportamento dinâmico das variáveis apresentadas na Figura 5.20, é possível observar a queda nos valores das três propriedades após a perturbação, que começaram por volta dos 530 segundos e permaneceram até o início das ações de controle, que ocorreram logo em seguida, com o início da adição de sal, conforme ilustrado na Figura 5.21.

Ainda com relação ao comportamento dinâmico das variáveis controladas, foi possível verificar que a condutividade elétrica tem grande potencial para ser utilizada como a propriedade ideal para o monitoramento e detecção de kicks de água no sistema. Isto decorre do fato de que o tempo morto da condutividade elétrica é de 29 segundos e, portanto, esta propriedade responde mais rapidamente aos kicks de água do que a viscosidade aparente e densidade, que apresentaram tempos de resposta iguais a 47 e 71 segundos, respectivamente.

Na Figura 5.21 é possível observar as ações de controle necessárias para a correção da condutividade elétrica, sendo possível verificar que o controlador fuzzy atuou na adição de sal em dois momentos distintos.

A primeira atuação do controlador foi na variável manipulada vazão mássica de sal e ocorreu por volta dos 530 segundos para rejeitar o impacto da perturbação inicial (kick de água). Essa ação de controle resultou na recuperação do setpoint da condutividade elétrica por volta dos 700 segundos, que apresentou uma dinâmica suave e sem overshoot.

Já a segunda atuação do controlador na dosagem de sal, ocorreu em torno dos 1000 segundos (Figura 5.21). Dessa vez, o controlador atuou para mitigar o efeito de diluição causado pela manipulação da injeção de água no sistema, usada para controlar o aumento indesejado na viscosidade aparente do fluido de perfuração. A resposta indesejada dessa variável controlada pode ser visualizada a partir dos 800 segundos com auxílio da Figura 5.22. O overshoot observado na viscosidade aparente, responsável pela dosagem adicional de água, foi causado pela adição de goma xantana e potencializado pelo efeito retardado da hidratação desse viscosificante.

Para garantir o estabelecimento do setpoint da condutividade elétrica, a massa de cloreto de sódio utilizada foi de aproximadamente 3,8 kg.

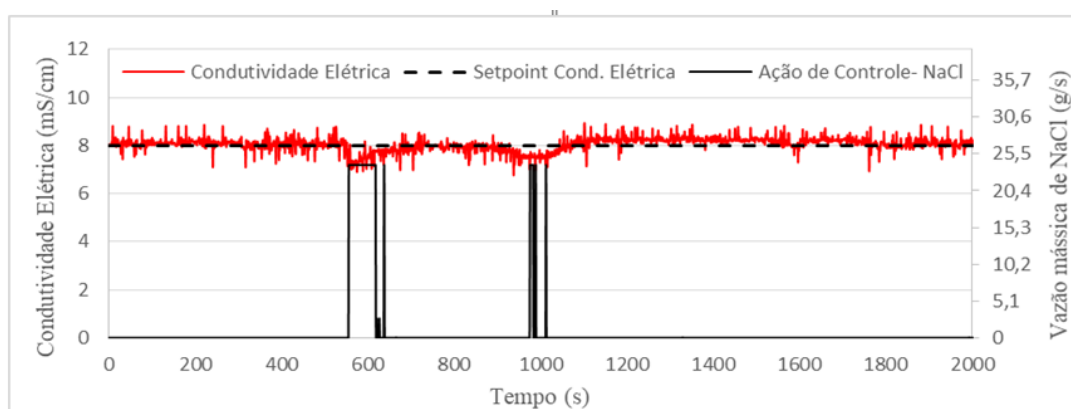


Figura 5.21. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ações de controle na taxa de adição de sal para rejeitar as perturbações da condutividade elétrica e resposta da dinâmica dessa variável controlada para recuperar frente a adição de 10 litros de água. Fonte: Autor, 2024.

É possível verificar a partir da análise da Figura 5.22, que a viscosidade aparente sofreu uma considerável redução no seu valor devido à diluição do sistema causada pela perturbação inicial, o kick de água. Contudo, a ação de controle fuzzy atuando na dosagem de goma xantana foi capaz de reverter a tendência de queda na viscosidade aparente do sistema. No entanto, devido ao mecanismo complexo de hidratação desse viscosificante, a resposta dessa variável apresentou um overshoot significativo por volta de 950 segundos.

Além disso, também é possível verificar a partir da análise da Figura 5.22, que a resposta da viscosidade aparente apresentou um comportamento levemente oscilatório, fruto da interação com as outras propriedades do fluido e do acoplamento entre as variáveis manipuladas e controladas desse sistema. Tal comportamento resultou em pequenos offsets por um longo tempo e na demora para atingir o tempo de assentamento, que ocorreu apenas por volta de 1900 segundos.

Outra características apresentada para esta variável controlada foi que a magnitude dos overshoots diminuiu na medida em que a ação de controle na injeção de água no sistema mitigava o efeito da hidratação do biopolímero.

Para a recuperação do setpoint da viscosidade aparente, a massa total de goma xantana utilizada foi de 0,27 kg.

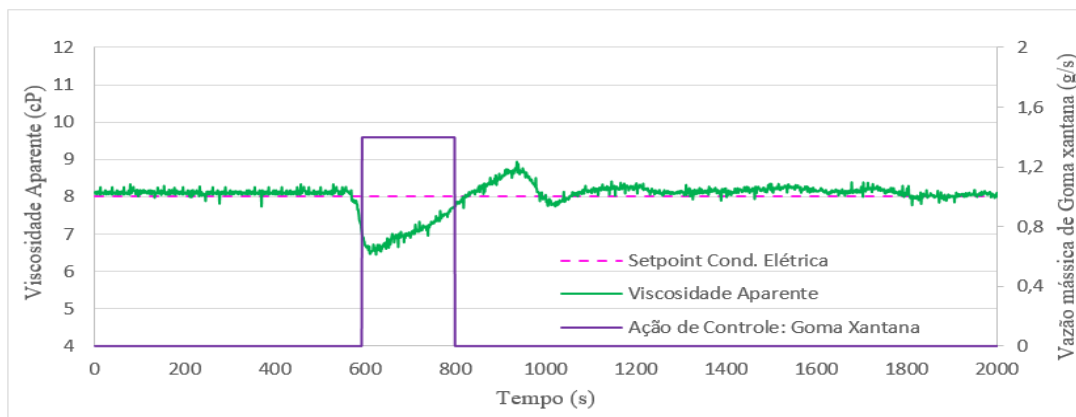


Figura 5.22. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ação de controle para rejeitar as perturbações na viscosidade aparente e a resposta dinâmica dessa variável frente a adição de 10 litros de água. Fonte: Autor, 2024.

Com relação à densidade do fluido de perfuração, observou-se que o volume de água utilizado na perturbação inicial do sistema promoveu um decaimento no valor dessa variável logo após a perturbação ter ocorrido, como pode ser verificado na Figura 5.23. Contudo, a tendência de queda na densidade do fluido de perfuração foi interrompida por volta dos 530 segundos como consequência indireta da dosagem de cloreto de sódio para controlar a condutividade elétrica (Figura 5.21). No entanto, esse efeito de adensamento causado pela adição de NaCl não foi suficiente para reestabelecer o setpoint da densidade, por isso a regra fuzzy associada à adição de barita foi ativada por volta dos 700 segundos, como também pode ser verificado na Figura 5.23.

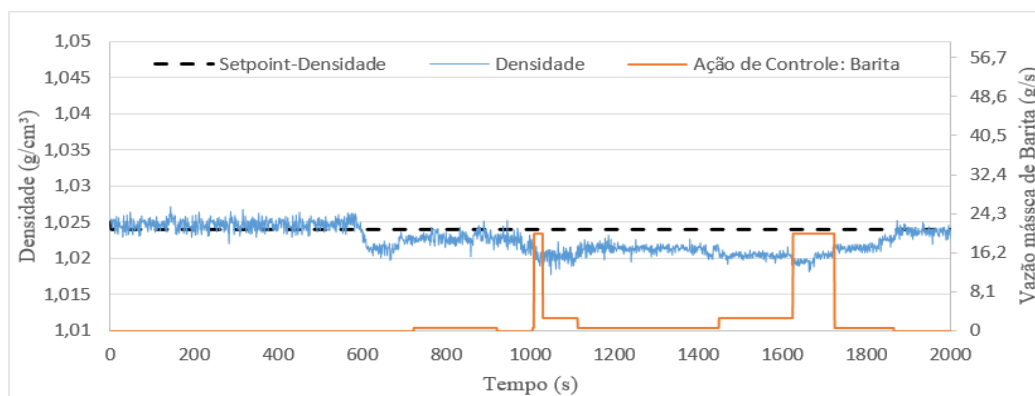


Figura 5.23. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ação de controle e resposta dinâmica para rejeitar as perturbações na densidade e a resposta dinâmica dessa variável frente a adição de 10 litros de água. Fonte: Autor, 2024.

Embora a manipulação da vazão mássica para adição de barita tenha sido mantida entre o intervalo aproximado de 700 a 900 segundos, a dosagem adicional de água em torno dos 900 segundos (Figura 5.24) com o objetivo de mitigar o overshoot da viscosidade aparente, resultou em uma nova queda na densidade do fluido de perfuração. Em resposta a esse revés nessa propriedade, o controlador fuzzy voltou a atuar na vazão mássica de barita por volta dos 1000 segundos, adicionando mais adensante ao sistema, conforme indicado na Figura 5.23.

É importante destacar que a atuação do controlador fuzzy na correção da densidade apresentou ações de controle mais conservativas porque a da densidade do fluido foi definida como sendo a última prioridade na hierarquia das variáveis controladas. Como resultado, o offset da densidade somente foi eliminado ao final do experimento, por volta dos 1900 segundos.

A massa total de barita utilizada para a correção da densidade do fluido de perfuração foi de aproximadamente 3,5 kg.

As ações de controle referentes à injeção de água no sistema são ilustradas na Figura 5.24. A atuação do controlador nessa variável manipulada deveu-se quase que exclusivamente para controlar a viscosidade aparente do fluido de perfuração, cuja complexidade da dinâmica de viscosificação, oriunda das propriedades moleculares e do mecanismo de hidratação da goma xantana, já foi relatada anteriormente.

Tendo em vista a injeção adicional de água necessária para reestabelecer o setpoint da viscosidade aparente, o volume total do fluido de perfuração ao final do experimento saltou de 40 para aproximadamente 70 litros.

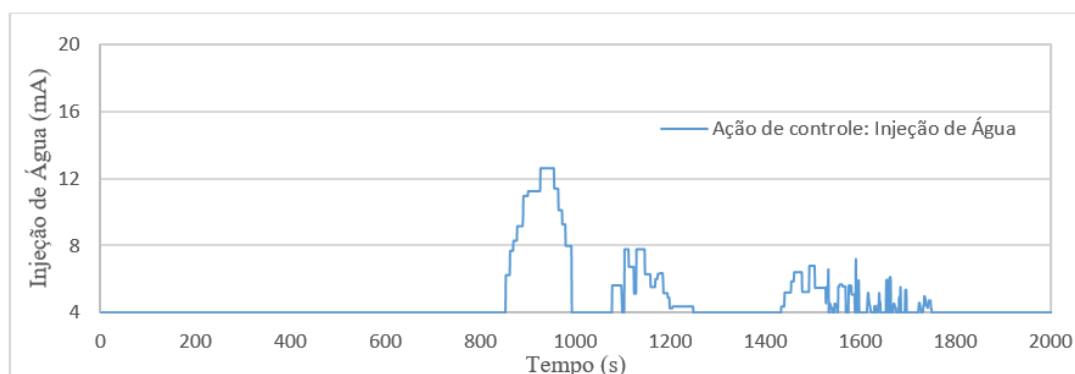


Figura 5.24. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ações de controle na taxa de injeção de água para corrigir o overshoot da viscosidade aparente promovido pela dosagem de viscosificante. Fonte: Autor, 2024.

Com base nos resultados do Percentual de Tempo Dentro da Banda de Erro (PTDBE) apresentados na Tabela 5-7, algumas considerações sobre o desempenho do controlador fuzzy multivariável para este teste regulatório são destacadas a seguir:

Para a variável condutividade elétrica, o controlador conseguiu manter a variável dentro da faixa de erro de 5% por apenas 15,80% do tempo. Quando a banda de erro foi aumentada para 10%, conforme esperado o desempenho melhorou, com a condutividade elétrica permanecendo dentro da faixa desejada por 26,64% do tempo. Embora essa melhoria seja notável, os resultados ainda indicam que o controlador enfrenta dificuldades para manter a condutividade elétrica dentro das faixas aceitáveis, especialmente em condições mais restritivas. Isso sugere que há uma necessidade

significativa de ajustes finos nos parâmetros do controlador por meio da redefinição da base de regras fuzzy para essa variável.

Para a variável viscosidade aparente, o controlador manteve a variável dentro da faixa de erro de 5% por 25,49% do tempo. Quando a banda de erro foi ampliada para 10%, o desempenho do controlador melhorou consideravelmente, com a viscosidade aparente dentro da faixa aceitável por 46,66% do tempo. Esta melhoria significativa com uma margem de erro maior indica que a viscosidade aparente é uma variável que pode necessitar de uma abordagem mais tolerante para alcançar um controle eficaz. No entanto, de modo análogo ao observado para a condutividade elétrica, a porcentagem de tempo dentro da faixa de 5% ainda é relativamente baixa, indicando espaço para melhorias na resposta do controlador.

Para a variável densidade, o controlador demonstrou um desempenho excelente, mantendo a densidade dentro da faixa desejada 100% do tempo. Isso sugere que o controlador é extremamente eficaz no controle da densidade, mantendo-a consistentemente dentro das faixas especificadas independentemente das condições de erro. Este resultado destaca a robustez do controlador para a variável densidade, mesmo com a presença de perturbações e mudanças de setpoint.

Tabela 5-7. Cálculo do PTDBE para o teste regulatório perturbação com água. Fonte: Autor, 2024.

Teste regulatório (perturbação com água)		
Variável controlada	PTDBE (5%)	PTDBE (10%)
Condutividade elétrica	15,80	26,64
Viscosidade Aparente	25,49	46,66
Densidade	100,0	100,0

O controlador fuzzy multivariável mostrou um desempenho excepcional no controle da densidade, mantendo-a dentro da faixa desejada o tempo todo. No entanto, os resultados para a condutividade elétrica e a viscosidade aparente indicam que essas variáveis apresentam maior dificuldade de controle. O aumento da banda de erro melhorou significativamente o desempenho para essas variáveis, sugerindo que uma maior margem de tolerância pode ser benéfica para alcançar um controle mais eficaz e robusto.

5.4.3.2 Simulação de uma perturbação na condutividade elétrica do fluido de perfuração

Para simular uma perturbação na condutividade elétrica do sistema, foram adicionados abruptamente 500 gramas de cloreto de sódio no tanque de fluido de perfuração em torno de 310 segundos, conforme ilustrado na Figura 5.25.

Neste teste de controle regulatório, os valores dos setpoints foram estabelecidos em 8,4 mS/cm para condutividade elétrica, 4 cP para a viscosidade aparente e 1,029 g/cm³ para a densidade. O comportamento dinâmico em malha fechada das variáveis controladas, condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade, frente à perturbação com a adição de cloreto de sódio no sistema é apresentado na Figura 5.25.

É possível verificar, com auxílio da Figura 5.25, que após a perturbação houve um rápido aumento da condutividade elétrica do fluido, confirmando, como esperado, a alta sensibilidade dessa variável à essa perturbação. Além disso, tendo em vista o conhecido efeito indireto da adição de sal sobre a densidade do fluido de perfuração, também é possível verificar um discreto aumento no valor dessa propriedade por volta dos 350 segundos.

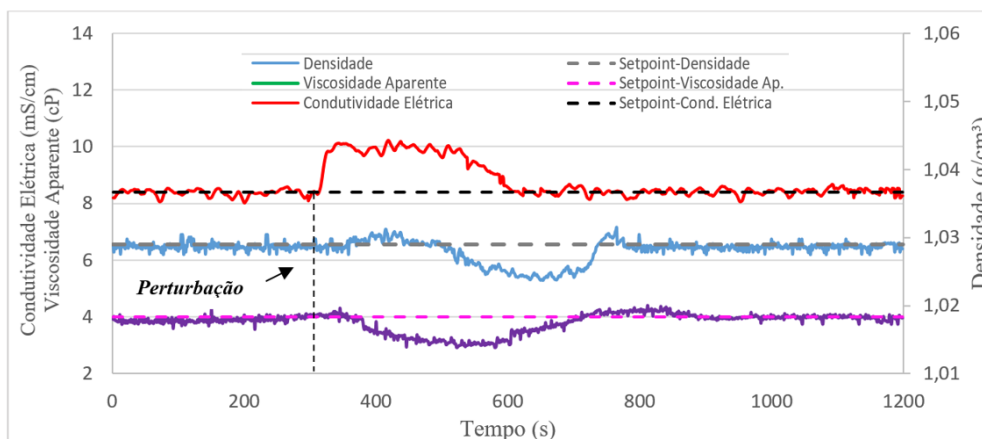


Figura 5.25. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Respostas em malha fechada das variáveis controladas condutividade elétrica (curva vermelha), viscosidade aparente (curva verde) e densidade (curva azul) após perturbação com a adição de 500 gramas de NaCl. Fonte: Autor, 2024.

Imediatamente após a perturbação com a adição de NaCl, por volta dos 350 segundos, o controlador fuzzy multivariável atuou na vazão de injeção de água no sistema para cancelar o efeito causado pela adição de sal sobre a condutividade elétrica do fluido, como pode ser verificado na Figura 5.26. A rápida ação do controlador resultou na restauração do setpoint da condutividade elétrica do fluido em torno dos 600 segundos, conforme ilustrado na Figura 5.25.

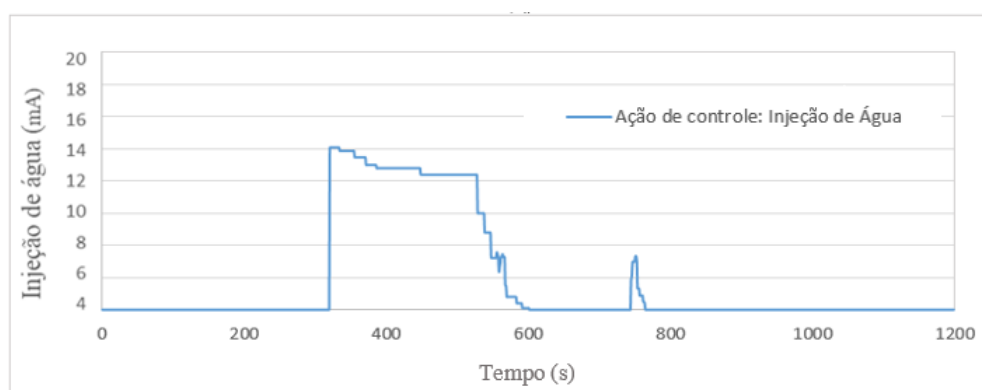


Figura 5.26. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ações de controle na taxa de injeção de água para restaurar o setpoint da condutividade elétrica. Fonte: Autor, 2024.

Por outro lado, a adição de água promovida pelo controlador fuzzy para cancelar, com sucesso, o efeito da perturbação de sal sobre a condutividade elétrica, resultou na diluição do sistema e, consequentemente, na redução da viscosidade aparente e da densidade do fluido por volta dos 350 e 500 segundos, respectivamente.

Para restaurar o setpoint da viscosidade aparente do fluido, o controlador fuzzy ativou a regra referente à adição de goma xantana em torno dos 595 segundos, conforme ilustrado na Figura 5.27, resultando no início da recuperação do setpoint dessa variável controlada. Contudo, mais uma vez foi observado o efeito da hidratação da goma xantana, que contribuiu para o aparecimento de um pequeno overshoot por volta dos 750 segundos. Nesse instante, como pode ser verificado na Figura 5.26, o controlador fuzzy atuou novamente na vazão de injeção de água no sistema para cancelar o overshoot

e restaurar o setpoint da viscosidade aparente do fluido de perfuração, que ocorreu a partir dos 900 segundos, aproximadamente.

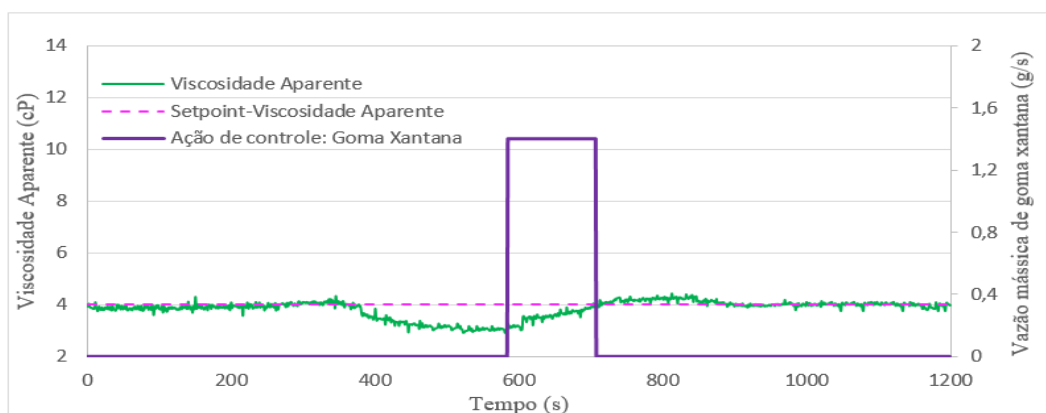


Figura 5.27. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ação de controle para rejeitar as perturbações na viscosidade aparente do fluido e a resposta dinâmica dessa variável controlada.

A densidade do fluido de perfuração também apresentou uma queda devido ao volume de água de utilizado pelo controlador para corrigir o setpoint da viscosidade elétrica. Para compensar esse efeito deletério sobre a densidade do fluido, o controlador fuzzy atuou sobre a taxa de adição de barita a partir dos 600 segundos, aproximadamente, o que permitiu eliminar o offset dessa variável controlada a partir dos 900 segundos. As ações de controle para rejeitar as perturbações na densidade do fluido e a resposta dinâmica dessa variável controlada podem visualizados na Figura 5.28.

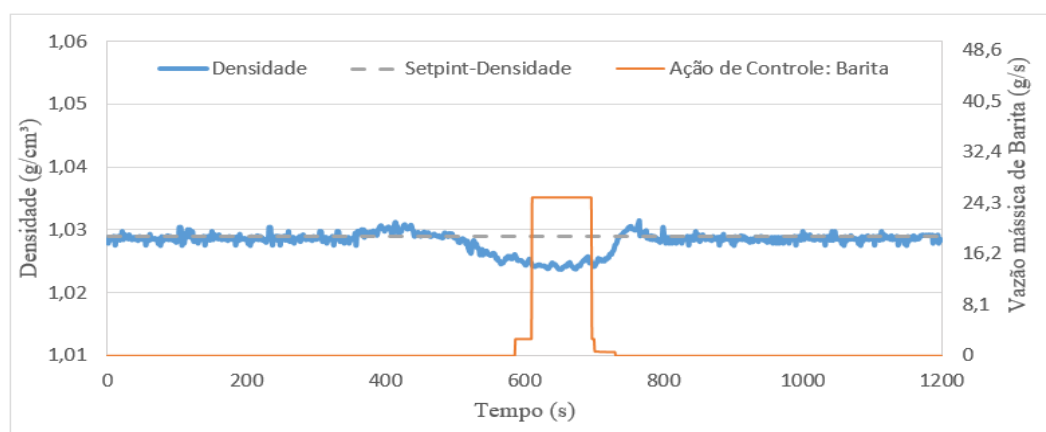


Figura 5.28. Controle fuzzy multivariável: Teste regulatório. Ações de controle para rejeitar as perturbações na densidade do fluido e a resposta dinâmica dessa variável controlada.

Apesar dos efeitos de correção da condutividade elétrica terem ocasionado a alteração das propriedades de viscosidade aparente e densidade, o controlador foi capaz de contornar o problema, reestabelecendo com sucesso os setpoints das três variáveis controladas. Assim, foi possível demonstrar que o controlador fuzzy multivariável foi capaz de rejeitar os fortes efeitos deletérios causados pela adição de sal ao fluido de perfuração.

Com base nos resultados do PTDBE para este teste regulatório com perturbação de NaCl apresentados na Tabela 5-8, podemos destacar que:

Para a variável condutividade elétrica, o controlador conseguiu manter a variável dentro da faixa de erro de 5% por 22,98% do tempo. Quando a banda de erro foi aumentada para 10%, o desempenho melhorou para 41,59% do tempo dentro da faixa aceitável. Embora essa melhoria seja significativa, o desempenho geral ainda é apenas regular. Isso sugere que o controlador fuzzy multivariável necessita de ajustes finos, particularmente na redefinição da base de regras fuzzy e nos parâmetros do controlador, para melhorar a precisão e a estabilidade na manutenção da condutividade elétrica dentro da faixa desejada.

Para a variável viscosidade aparente, o controlador manteve a variável dentro da faixa de erro de 5% por 27,24% do tempo. Com a banda de erro aumentada para 10%, o desempenho melhorou para 43,27% do tempo dentro da faixa. Similarmente à condutividade elétrica, o desempenho foi apenas regular, indicando que há espaço para melhorias. Ajustes finos na base de regras fuzzy e nos parâmetros do controlador são necessários para aumentar a eficácia do controle da viscosidade aparente, especialmente em faixas de erro mais restritas.

Para a variável densidade, o controlador foi extremamente eficaz, mantendo a densidade dentro da faixa desejada 100% do tempo, independentemente de a banda de erro ser de 5% ou 10%. Esse resultado demonstra a alta eficácia do controlador fuzzy para esta variável, indicando que o sistema pode lidar com perturbações e mudanças de setpoint sem comprometer a precisão e a estabilidade da densidade.

Tabela 5-8. Cálculo do PTDBE para o teste regulatório perturbação com cloreto de sódio. Fonte: Autor, 2024.

Teste regulatório (perturbação com NaCl)		
PTDBE (5%)	PTDBE (5%)	PTDBE (5%)
22,98	22,98	22,98
27,24	27,24	27,24
100,0	100,0	100,0

O controlador fuzzy multivariável apresenta um desempenho moderado para a condutividade elétrica e viscosidade aparente, com um aumento razoável no desempenho ao permitir uma maior margem de erro. Este aumento no desempenho ao expandir a banda de erro indica que a precisão necessária para manter essas variáveis dentro de faixas mais restritas é desafiadora e que ajustes são necessários para melhorar a resposta do controlador.

5.5 Considerações Finais

O excelente desempenho no controle da densidade demonstra a eficácia do controlador fuzzy para essa variável, sugerindo que abordagens semelhantes podem ser exploradas para as outras variáveis. Em suma, enquanto o controlador fuzzy mostra-se altamente eficaz para a densidade, ajustes e melhorias são necessários para alcançar um controle mais robusto e preciso da condutividade elétrica e da viscosidade aparente.

Especificamente, para a condutividade elétrica e a viscosidade aparente, os resultados em malha fechada sugerem que se faz necessário:

- **Redefinição da Base de Regras Fuzzy:** Revisar e ajustar as regras fuzzy para melhor capturar a dinâmica dessas variáveis.
- **Ajuste Fino dos Parâmetros:** Refinar os parâmetros de controle para melhorar a precisão e a estabilidade, particularmente em faixas de erro mais estreitas.

6. CONCLUSÕES

Por meio dos experimentos na planta piloto do LEF/UFRRJ, foi possível testar o conceito da utilização da estratégia de controle fuzzy multivariável no controle de propriedades físico-químicas de fluidos de perfuração.

Foram realizados experimentos prévios de bancada, seguidos da análise estatística dos resultados, para determinar a interação entre as variáveis manipuladas e controladas avaliadas neste trabalho.

Como principais resultados, destacam-se:

1. Observou-se que o aumento da concentração de cloreto de sódio na formulação do fluido de perfuração, além do efeito óbvio sobre a condutividade do fluido de perfuração, contribui para o aumento da densidade e da viscosidade aparente. Este resultado, além de ressaltar a característica de interação entre as variáveis, tem especial importância para o projeto de controladores para essas propriedades, sobretudo em se tratando de fluidos à base água.
2. Para o ajuste do modelo Herschel-Bulkley, todos os fluidos apresentaram um índice de comportamento menor que um, configurando-os como pseudoplásticos. Assim, é possível afirmar que o aumento de cloreto de sódio não compromete a pseudoplasticidade desejada para esses fluidos. No entanto, notou-se que o aumento na concentração desse insumo resultou em um aumento na tensão de escoamento inicial dos fluidos, tornando-os mais resistentes ao início da recirculação, o que pode representar um problema em casos de paradas na circulação dos fluidos, manobras ou intervenções durante as etapas da perfuração, evidenciando a necessidade do monitoramento da concentração de cloreto de sódio na composição do fluido.
3. A análise da interação e do efeito de sinergismo entre a composição e as propriedades alvo das propriedades físico-químicas dos fluidos de perfuração, indica que os fatores e suas interações têm um efeito significativo nas variáveis dependentes, onde as propriedades condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade são afetadas pelo aumento da composição de goma xantana, barita e cloreto de sódio.
4. A correção isolada da condutividade elétrica com o aumento na dosagem de cloreto de sódio comprova os resultados obtidos a partir da análise estatística feita pela técnica MANOVA, onde os dados estatísticos revelam que o aumento da concentração de cloreto de sódio possui uma considerável influência no aumento da densidade e da viscosidade aparente dos fluidos de perfuração. Este resultado estatístico foi evidenciado no primeiro teste de controle fuzzy monovariável. Além disso, é possível sustentar a hipótese da inviabilidade da estratégia de controle monovariável para a manutenção da condutividade elétrica, devido ao elevado volume de água necessário para controlar essa variável. Além disso, o elevado consumo de água, no caso do controle monovariável, resulta na diluição excessiva do fluido, causando um impacto significativo na diminuição da densidade e da viscosidade aparente, o que representa na completa descaracterização das propriedades do fluido de perfuração.
5. Os resultados dos testes de controle fuzzy multivariável foram muito positivos e indicaram o grande de aplicação dessa estratégia de controle em ambientes industriais. Em ambos os testes

de controle, servo e regulador, o controlador fuzzy multivariável foi capaz de manter as características físico-químicas do fluido, condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade, dentro dos respectivos setpoints. Dessa forma, a estratégia de controle fuzzy multivariável proposta neste trabalho apresenta grande potencial de aplicação industrial. Vale ressaltar que a condutividade elétrica apresentou, dentre as três variáveis controladas, a propriedade com maior sensibilidade a perturbações com água, apresentando, portanto, a característica adequada para ser utilizada como ferramenta de monitoramento de kicks de água durante a perfuração.

6. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do controlador fuzzy multivariável em gerenciar simultaneamente as propriedades de condutividade elétrica, viscosidade aparente e densidade dos fluidos de perfuração. A capacidade de ajustar rapidamente e com precisão essas variáveis, mesmo diante de interações complexas e mudanças nos setpoints, evidencia a robustez e eficiência deste sistema de controle.
7. O desempenho do controlador por meio da técnica de porcentagem de tempo dentro da banda de erro permitiu observar que, para as bandas analisadas, o controlador fuzzy multivariável foi capaz de manter as variáveis controladas dentro das faixas desejadas, comprovando sua robustez e a capacidade do sistema em obter um bom desempenho nos cenários operacionais diversos apresentados neste estudo.
8. Os resultados experimentais também sugerem que a implementação de um controlador fuzzy multivariável pode otimizar a eficiência do processo de perfuração, reduzindo a quantidade de insumos necessários para o controle das propriedades do fluido e melhorando a estabilidade das operações. A gestão equilibrada das propriedades físico-químicas dos fluidos de perfuração contribui para operações mais seguras, eficientes e econômicas, destacando o potencial desta tecnologia na indústria de petróleo e gás.
9. Em suma, o controlador fuzzy multivariável mostrou-se altamente robusto e eficaz para o controle integrado das propriedades físico-químicas avaliadas dos fluidos de perfuração, proporcionando uma operação mais estável e eficiente. Contudo, uma análise mais crítica do desempenho do controlador por meio de métricas mais objetivas, como a porcentagem de tempo dentro da banda de erro (PTDBE), indica que os resultados em malha fechada podem ser melhorados a partir de uma nova sintonia na base de regras fuzzy, sobretudo para as variáveis condutividade elétrica e viscosidade aparente.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se:

- O aprimoramento do sistema de controle desenvolvido, ampliando o número de funções de pertinência para as variáveis controladas e manipuladas, tornando-o ainda mais refinado e preciso;
- Realizar estudos de interação entre novas propriedades de interesse a serem controladas e, conseqüentemente, explorar a viabilidade do desenvolvimento de um sistema de controle capaz de controlar variáveis adicionais simultaneamente.
- Utilizar a técnica como um novo meio de identificação para o monitoramento prematuro e controle do influxo de água por meio da aferição da redução da condutividade elétrica em fluidos a base água durante a perfuração.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIMBOLA, M., KHAN, F. & KHAKZAD, N., 2014. **Dynamic Safety Risk Analysis of Offshore Drilling**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 30, p.74–85.
- AGUIAR, H.; JUNIOR, O. **Lógica Difusa: Aspectos práticos e aplicações**. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda., 1999.
- AHAMED, N. U.; YUSOF, Z.; HAMEDON, Z.; FAZLE, R. M.; SIKANDAR T.; PALANIAPPAN, R. ALI, A.; RAHMAN, S. M.; SUNDARAJ, K. **Fuzzy Logic Controller Design for Intelligent Drilling System**. Published in: 2016. IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), Selangor, Malaysia.
- AMADO, J. A. D. **Projeto e Controle de um Sistema de Aquecimento no Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2011.
- APALEKE, A. S., AL-MAJED, A., HOSSAIN, M. E. **Drilling fluid: State of the art and future trend**, Society of Petroleum Engineers, Cairo, Egito, 2012.
- ARAGAO, A.F.L., TEIXEIRA, G.T., MARTINS, A.L., GANDELMAN, R.A., SILVA, R.A. **PWD Analysis in Deepwater Environments: Campos Basin Case Study, Deep Offshore Technology**. Vitória – Brasil, 8 a 10 de novembro, 2005.
- BARBOSA, T. S. **Ambiente para Avaliação de Controladores Fuzzy Aplicados ao Método de Elevação Artificial por Bombeio Centrífugo Submerso**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2011.
- BAROID LIMITED. **Baroid mud technology handbook**. Houston: 1985.
- BERENJI, H. R. **Fuzzy and Neural Control**, em ANTASAKLIS, P. e PASSINO, K. “**An Introduction to Intelligent and Autonomous Control**”, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- BORGES, R. F.O. **Análise e estimação das propriedades de tortas de filtração de fluidos de perfuração não-Newtonianos**. Dissertação (Mestrado), Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2019.
- BOURGOYNE, J.; A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young Jr., F. S. (1986). **Applied Drilling Engineering**. Richardson, Tx, USA: Society of Petroleum Engineering
- BRAGA, E. R. **Estudo do Escoamento de Fluidos de Perfuração em dutos e em Regiões Anulares**. Dissertação (Mestrado), Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2009.
- CAENN, R., CHILLINGAR, G. V., Drilling fluids: **State of the art**, **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v.14, 1996.
- CAENN, R.; DARLEY, H. CH.; GRAY, G, R. **Fluidos de perfuração e complementação**. 1. Ed. Rio de Janeiro. Elsevier, 2014.
- CAENN, R.; DARLEY, H. CH.; GRAY, G. R. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**. Seventh Edi. Elsevier, Cambridge, United States, 2017.
- CAMPOS, M. M.; SAITO, K. **Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2004.
- CENPES. **Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello**, 2023.

- CHIPALAVELA, A. F. **Análise e Discussão das Operações de Perfuração e Completação em Poços Petrolíferos**. 103p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Geológica e de Minas, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal, 2013.
- COSTA, C. M. **Caracterização Reológica De Fluidos Complexos**. Revista Brasileira de Iniciação Científica, v. 4, p. 3–28, 2017.
- COSTA, R. O. **Controle Aplicado a Poços com Método de Elevação e Bombeio Centrífugo Submerso**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2012.
- DARLEY, H. C.; GRAY, G. R. **Composition and properties of drilling and completion fluids**. Gulf Professional Publishing, Texas, 1988.
- FERRAZ, A. S. F. S. **Efeito da distribuição granulométrica de partículas sólidas e de polímeros aniônicos na formação da torta de filtração e no volume de filtrado**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, 2014.
- FERRAZ, R. S. C.; MELLO, T.P.; BORGES FILHO, M.N.; BORGES R.F.O.; CALÇADA, L.A.; SCHEID, C.M.; **An experimental and theoretical approach on real-time control and monitoring of the apparent viscosity by fuzzy-based control**. Journal of Petroleum Science and Engineering, V. 217, October 2022.
- GAJATE, A.; HABER, R.E.; VEGA, P. I.; ALIQUE, J. R. **A Transductive Neuro-Fuzzy Controller: Application to a Drilling Process**. Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Transactions on Neural Networks, Vol. 21, July 2010.
- GATLIN, C. Petroleum Engineering: **Drilling and well Completions**. Englewoodwood Cliffs, N.J., USA: Prentice-Hall, 1960.
- GONÇALVES, J. T. **Apostila: Fluidos Não Aquosos**, 2003.
- GOMES, J. S.; ALVES, F. B. **O Universo da Indústria Petrolífera**. 3º Edição. Fundação Calouste Gulbenkian, 2007.
- GUIMARAES, I. B., ROSSI, L. F. S. **Estudo dos constituintes dos fluidos de perfuração: Proposta de uma formulação otimizada e ambientalmente correta**, 4º PDPETRO, Campinas, São Paulo, Outubro, 2007.
- GUIMARAES, I. B., ROSSI, L. F. S. **Estudo dos constituintes dos fluidos de perfuração: Proposta de uma formulação otimizada e ambientalmente correta**, 4º PDPETRO, Campinas, São Paulo, Outubro, 2007.
- HAIR, J. F., BLACK, W. C., BABIN, B. J., & ANDERSON, R. E. **Multivariate Data Analysis** (8th ed.). Cengage Learning, (2019).
- JAN, B. M., RAE, G. R., NOOR, M. I., SUHADI, A. N., DEVADAAS, M. **Increasing production by maximizing underbalance during perforation using nontraditional lightweight completion fluid**, SPE 108423-PA, v.24,2009.
- KHANDAL, R. K., TADROS, T. F. **Application of viscoelastic measurements to the investigation of the swelling of sodium montmorillonite suspensions**. Journal of Colloid Interface Science, v.125, 1988.
- KOSYNKIN, D.V.;CERIOTTI, G.; WILSON, K. C.; LOMEDA, J.R.; SCORSONE, J.T.; PATEL, A.D.; FRIEDHEIM, J.;TOUR,J. **Graphene Oxide as a High-Performance Fluid-Loss-Control Additive in Water-Based Drilling Fluids**. Acs Appl. Mater. Interfaces, EUA, v.4, n.1. American Chemical Society (ACS), 2012.

- LAIB, A.; TALBI, B.; KRAMA, A.; GHARIB, M. **Hybrid Interval Type-2 Fuzzy PID+I Controller for a Multi-DOF Oilwell Drill-String System**. Publisher in: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2022.
- LOMBA, R. **Petroleum Engineering**. Petroleum Engineering Course Handout. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, PUC-SP, Brasil, 2007.
- MACHADO, J. C. V. **Reologia e Escoamento de fluidos- Indústria do petróleo**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2002.
- MADRUGA, L.Y.C. **Contaminação e remediação de Fluidos Hidroargilosos**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Química do Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, 2012.
- MAGALHÃES, S. C. **UMPC: Unidade Móvel de Pesquisa Científica: um sistema desenvolvido para aferições em tempo real das propriedades físico-químicas de fluidos de perfuração**. Dissertação de Mestrado, Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica-RJ, Brasil, 2015.
- MAGALHÃES, S.C.; BORGES, R.F.O.; CALÇADA, L.A.; SCHEID, C.M.; Folsta, M.; WALDMANN, A.; Martins, A.L. **Development of an expert system to remotely build and control drilling fluids**. JOURNAL OF PETROLEUM SCIENCE AND ENGINEERING, v. 181, p. 106033, 2019.
- MARRO, A. A.; SOUZA, A. M. C.; CAVALCANTE, E. R.; BEZERRA, G. S.; NUNES, R. O. **Lógica Fuzzy: Conceitos e aplicações**. Departamento de Informática e Matemática Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Rio grande do Norte, Brasil.
- MELLO, T.P. **Modelagem e Controle Fuzzy da Densidade e Viscosidade Aparente de Fluidos de Perfuração**. Dissertação de Mestrado, Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, 2022.
- MI-SWACO. **Engineering Drilling Fluids Manual**, Texas - USA, 2001.
- MITCHELL, R. F.; MISKA, S. Z. **Fundamentals of Drilling Engineering**. Volume 12. SPE - Society of Petroleum Engineers, 2011.
- MOGNON, J. L. **Mini-hidrociclones aplicados ao sistema de controle de sólidos na perfuração de poços de petróleo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais, 2015.
- MURPHY, Y. R.; BHASKAR, K. U. **Parametric CFD studies on hydrocyclone. Powder Technology**, 2012.
- NORONHA, V. E. **Avaliação de medidas reológicas em viscosímetro online**. Dissertação de Mestrado, Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- PEREIRA, M. S. **Aplicação de secagem por micro-ondas no tratamento de cascalho de perfuração**. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2013.
- PETRI, I. J.; MARTINS, A; L.; ATAIDE, C. H.; DUARTE, C. R. **Microwave Drying Remediation of Petroleum-Contaminated Drill Cuttings**. Journal of Environmental Management, v. 196, 2017.
- PETROBRAS. **Pré-sal: mergulhe nessa jornada ultra profunda**. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pre-sal>. Acesso em: 21 de Novembro de 2023.

- QI, L.; YUANDONG, D. **The Normal Cloud Model of Fuzzy Inference Prediction Method for Petroleum Drilling Accident**. Publisher in: International Conference on Electric Information and Control Engineering, Wuhan, China, 2011.
- QIANSHENG. Y.; BAOGUO. M. **Development and applications of solids-free oil-in-water drilling fluids**. Yangtze University, China, 2008.
- RADICH, A. S. **Modelagem e Controle Fuzzy da Densidade de Fluidos de Perfuração**. Dissertação de Mestrado, Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, 2018.
- RENCHE, A. C. & CHRISTENSEN, W.F. **Methods of Multivariate Analysis**. (3rd ed.). John Wiley & Sons (2012).
- SAASEN A., OMLAND T. H., Stat oil Hydro 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. **Automatic Measurement of Drilling Fluid and Drill Cuttings Properties**. IADC/SPE Drilling Conference, (2009).
- SHAW, I. S., SIMÕES, M. G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1ª edição, 1999.
- SHIROMA, P.H. **Estudo do comportamento reológico de suspensões de bentonita e CMC: influência da concentração do NaCl**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- SHUBERT, J. J. **Well Control**. Texas: B.S. Texas A&M University. 1995.
- SIMPSON, M. A. ABDREBALREDA, S. H., AL-KHAMEES, S. A., ZHOU, S., ANSARI, A. A., **Overbalanced Pre-Khuff Drilling of Horizontal Reservoir Sections With Potassium Formate Brines**, SPE, March, 2005.
- SIQUEIRA, V. S. M. **Sistema Especialista para Detecção Antecipada de Aprisionamento de Coluna de Perfuração de Poços de Petróleo**. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Controle e Automação, Instituto Federal do Espírito Santo Seropédica, Serra, 2022.
- TABACHNICK, B. G. & FIDELL, L. S. **Using Multivariate Statistics** (7th ed.). Pearson, (2019).
- TERZAGHI, C.; BUFFAGNI, M.; CANTELLI, D.; BONFANTI, P.; CAMATINI, M.; **Physical-chemical and Ecotoxicological Evaluation of Water Based Drilling Fluids Used in Italian Offshore**. Chemosphere, Vol. 37, Nos 14 15, pp. 2859-2871, 1998.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos da Engenharia de Petróleo**. Editora intercência, 2001.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos da Engenharia de Petróleo**. 2º Edição, Editora intercência, 2004.
- YUE, L.; JIAN, L.; BING, W.; CHUAN, L. **Research and Implementation of Rule-based Reasoning in Drilling Fluid Design**. Published in: Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), Shanghai, China, 2011.
- ZADEH, L. A., **Fuzzy sets**. Information and Control, v.8, p. 338-353, 1965.

APÊNDICE A-RESULTADOS EXPERIMENTAIS EM BANCADA.

Tabela A 1. Medições obtidas experimentalmente para os vinte e sete fluidos formulados em triplicata (densidade, viscosidade aparente e condutividade elétrica).

Goma Xantana	Barita	NaCl	Densidade (g.cm ⁻³)			Viscosidade Aparente (cP)			Condutividade Elétrica (mS/cm)		
			I	II	III	I	II	III	I	II	III
-1	-1	-1	1,09	1,11	1,10	18,99	17,99	18,99	54,01	53,31	53,92
-1	0	0	1,19	1,18	1,19	19,99	20,99	20,99	62,94	64,32	65,02
-1	1	1	1,30	1,27	1,29	24,99	23,99	24,99	73,51	75,00	72,81
-1	-1	0	1,10	1,10	1,10	18,99	19,99	18,99	50,09	51,77	51,88
-1	-1	1	1,20	1,21	1,21	18,99	17,99	18,99	73,99	73,85	73,01
-1	0	-1	1,13	1,10	1,12	19,99	19,99	20,99	51,09	49,89	50,01
-1	0	1	1,23	1,25	1,27	22,99	22,99	22,99	72,99	73,84	74,38
-1	1	-1	1,14	1,12	1,14	17,99	18,99	18,99	43,62	44,06	42,71
-1	1	0	1,22	1,22	1,22	20,99	21,99	21,99	50,21	51,03	50,12
0	-1	-1	1,12	1,11	1,12	44,97	42,97	44,97	48,41	47,75	47,07
0	0	0	1,14	1,15	1,14	50,97	49,97	50,97	49,98	48,09	50,01
0	1	1	1,40	1,39	1,39	91,95	89,95	92,95	60,99	59,87	58,72
0	-1	0	1,08	1,10	1,09	43,97	40,98	43,97	43,81	42,94	42,17
0	-1	1	1,12	1,14	1,14	63,96	62,96	60,96	63,88	63,79	62,02
0	0	-1	1,16	1,17	1,15	50,97	50,97	50,97	50,99	52,87	52,64
0	0	1	1,15	1,15	1,15	49,97	48,97	52,97	51,23	51,99	53,20
0	1	-1	1,15	1,14	1,14	50,97	51,97	53,97	67,81	66,64	66,52
0	1	0	1,18	1,19	1,18	51,97	51,97	51,97	49,36	50,05	50,78
1	1	1	1,26	1,27	1,27	103,9	103,9	101,9	60,86	59,87	59,04
1	-1	-1	1,09	1,11	1,10	84,95	85,95	83,95	40,99	41,13	43,27
1	0	0	1,13	1,14	1,12	89,95	90,95	88,95	50,75	51,02	49,52
1	1	-1	1,16	1,16	1,16	77,95	78,95	77,95	42,01	40,68	40,33
1	1	0	1,18	1,20	1,19	100,9	101,9	100,9	52,77	55,08	53,95
1	0	-1	1,12	1,10	1,11	102,9	101,9	103,9	42,20	43,62	42,95
1	0	1	1,24	1,22	1,23	122,9	120,9	119,9	71,46	68,01	69,32
1	-1	-1	1,11	1,09	1,10	103,9	105,9	105,9	57,13	57,84	58,01
1	-1	1	1,24	1,22	1,22	108,9	103,9	108,9	61,99	62,85	67,63

APÊNDICE B – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA BARITA

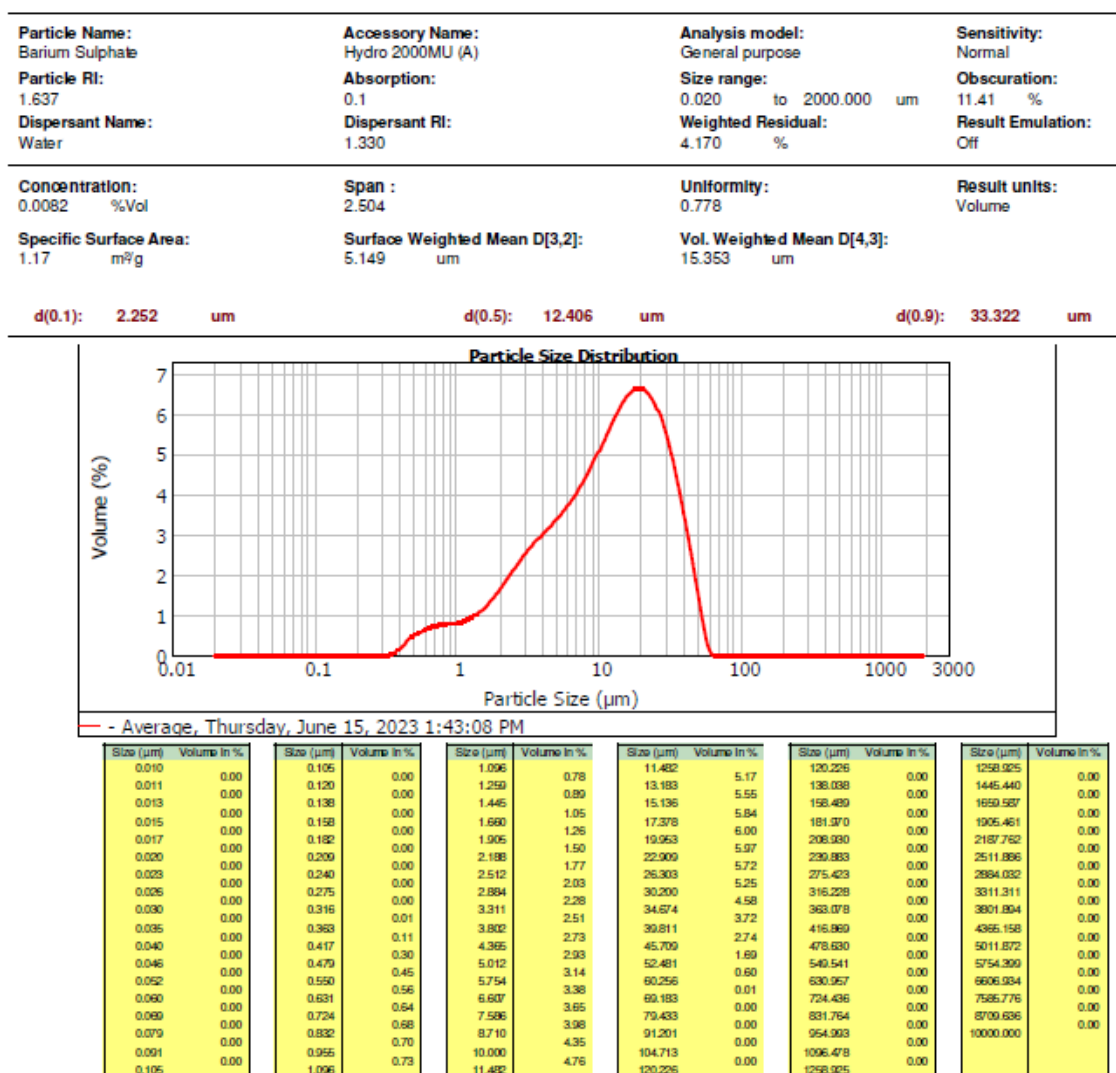
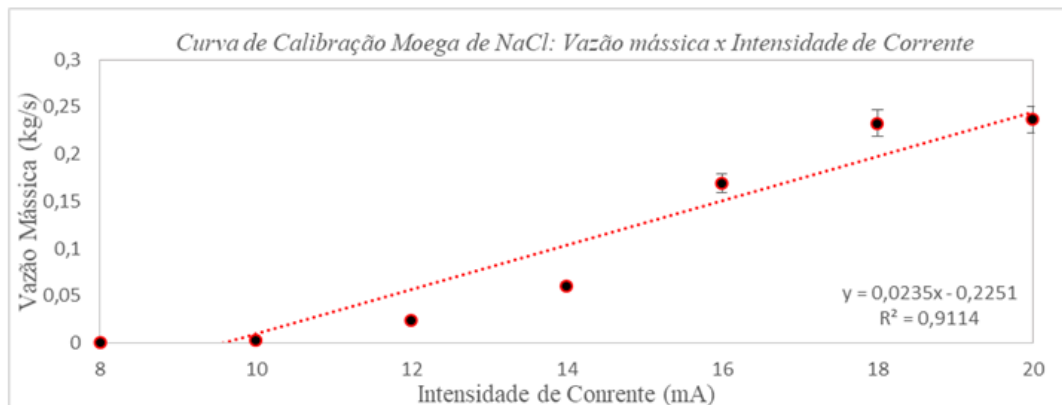


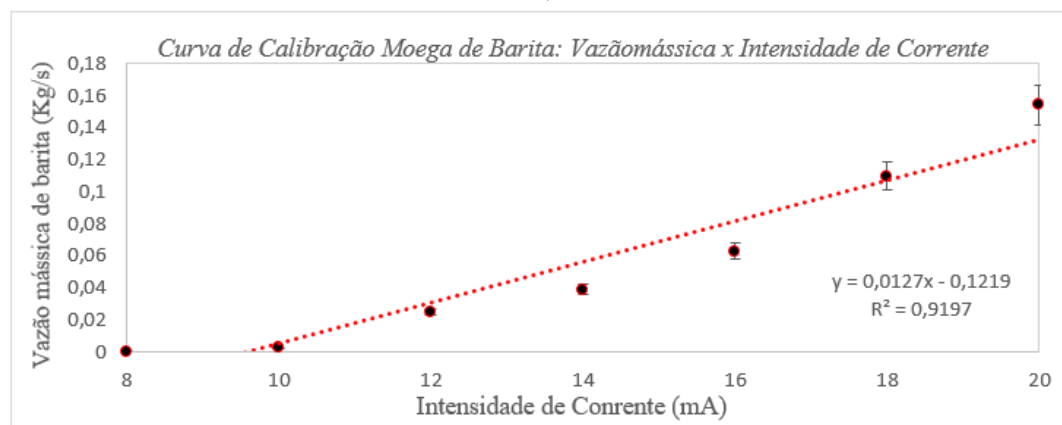
Figura B.1- Análise granulométrica da amostra da Barita (BaSO₄).

APÊNDICE C – CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS ATUADORES DE NaCl, GOMA XANTANA e BARITA

A)



B)



C)

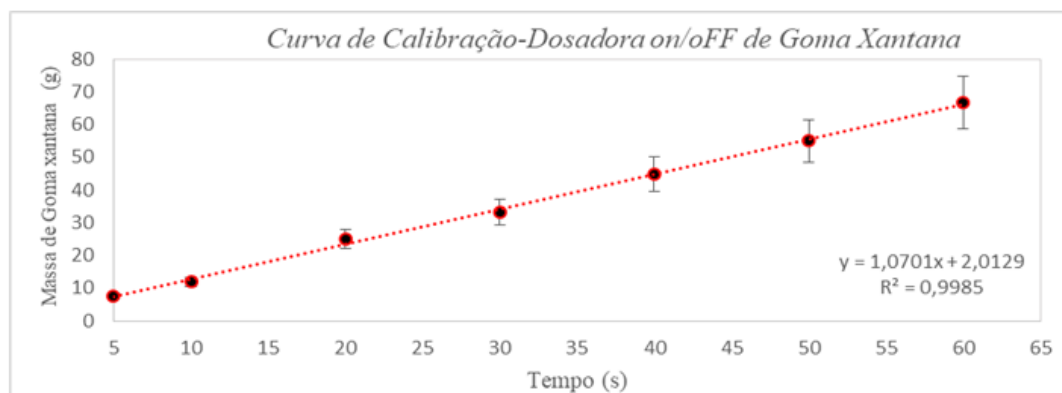


Figura C-1. Gráficos das curvas de calibração para atuadores de sólidos: A) Vazão mássica de NaCl, B) Vazão mássica de Barita e C) Dosagem de Goma Xantana.