

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

DISSERTAÇÃO

**MODELAGEM E CONTROLE FUZZY DA DENSIDADE E
VISCOSIDADE APARENTE DE FLUIDOS DE
PERFURAÇÃO**

THALLES PEREIRA DE MELLO

2022



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

MODELAGEM E CONTROLE FUZZY DA DENSIDADE E
VISCOSIDADE APARENTE DE FLUIDOS DE
PERFURAÇÃO

THALLES PEREIRA DE MELLO

Sob a orientação da Professor Doutor

Luis Américo Calçada

e Coorientação dos Professores Doutores

Cláudia Miriam Scheid

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Química** no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Seropédica,RJ

Junho de 2022

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

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

M527m Mello, Thalles Pereira de, 1993-
MODELAGEM E CONTROLE FUZZY DA DENSIDADE E VISCOSIDADE
APARENTE DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO / Thalles Pereira de Mello.
- Seropédica, 2022.
100 f.: il.

Orientador: Luiz Américo Calçada.

Coorientadora: Cláudia Miriam Scheid.

Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química, 2022.

1. Lógica fuzzy. 2. Densidade. 3. Viscosidade aparente.
4. Fluido de perfuração. 5. Controle fuzzy. I. Calçada, Luís
Américo, 1966-, orient. II Scheid, Cláudia Miriam, 1968-,
coorient. III. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

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”.

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

THALLES PEREIRA DE MELLO

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 22/07/2022.

Luís Américo Calçada. D. Sc. DEQ/IT/UFRRJ (Orientador)

Luiz Augusto da Cruz Meleiro. D. Sc. DEQ/IT/UFRRJ

Fábio Bentes Freire. D. Sc. DEQ/CCET/UFSCar



Emitido em 2022

TERMO Nº 862/2022 - PPGEQ (12.28.01.00.00.00.42)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 01/08/2022 13:34)

LUIS AMERICO CALCADA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEQ (12.28.01.00.00.00.45)
Matricula: 2181679

(Assinado digitalmente em 30/07/2022 11:22)

LUIZ AUGUSTO DA CRUZ MELEIRO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEQ (12.28.01.00.00.00.45)
Matricula: 2412659

(Assinado digitalmente em 29/07/2022 10:52)

FÁBIO BENTES FREIRE
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 159.915.878-76

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número:
862, ano: **2022**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **29/07/2022** e o código de verificação: **2d1fb6baa0**

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha família, pela dedicação, amor e suporte incondicional em especial para meu avô Oswaldo José Pereira que fez questão de ajudar com minha formação enquanto pode, aos meus pais Fernando Cesar Nogueira de Mello e Leila de Jesus Pereira Mello que não mediram esforços para que chegasse até esta etapa da minha vida e a minha amada esposa Sara Moreira Mello por compreender os momentos que estive ausente e me prover com suporte e companheirismo inigualáveis.

Obrigado ao Rodrigo Campista Ferraz que me apresentou ao LEF e a meus orientadores Luís Américo Calçada e Cláudia Miriam Scheid, pela oportunidade de trabalho no Laboratório de Escoamento de Fluidos, por estar sempre dispostos a compartilhar seu conhecimento e me ajudar na caminhada da vida acadêmica.

Obrigado a equipe do LEF por sua contribuição inestimável no desenvolvimento do presente trabalho em especial Moacyr Nogueira, Rodrigo Borges, Eduardo Paraiso e Elias Pacheco.

RESUMO

Mello, Thalles Pereira de. **Modelagem e controle fuzzy da densidade e viscosidade aparente de fluidos de perfuração**. 2022. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

Os fluidos de perfuração são produtos complexos da mistura de sólidos líquidos e gases. Para que essas substâncias cumpram suas funções no processo de perfuração, deve haver um controle eficiente das suas propriedades. Para esse fim, a indústria do petróleo busca o desenvolvimento de novas tecnologias e técnicas de controle cada vez mais eficientes, adaptáveis e versáteis. Este trabalho tem como finalidade a proposta de um sistema de controle automatizado em tempo real para a densidade e viscosidade aparente de fluidos de perfuração simultaneamente utilizando lógica fuzzy. A avaliação da técnica de controle foi feita por meio da utilização de uma unidade experimental piloto de preparo de fluidos de perfuração. Capaz de preparar 100 litros de fluido por batelada, munida de dosadores de sólidos para o ajuste das propriedades do fluido, assim como, sensores de densidade e viscosidade para o realimentação do sistema de controle. As funções de pertinência do controlador fuzzy foram desenvolvidas por meio de experimentos de bancada para avaliar a interação entre o fluido base e os aditivos utilizados para o adensamento e viscosificação. A partir dos testes de bancada, foi definido o intervalo de atuação para o controlador de 1 a 1,2 g/cm³ para densidade e 10 a 30 cP para a viscosidade aparente. O controlador fuzzy foi submetido a testes do tipo servo e regulador. Nos testes do tipo servo o controlador foi capaz de levar a densidade e viscosidade aparente aos setpoints desejados, tanto simultaneamente quanto individualmente. Já em testes do tipo regulador, foram aplicadas perturbações do tipo degrau ao fluido em ambas as propriedades e o controlador se mostrou apto a resistir as perturbações, trazendo as propriedades do fluido de volta ao valor estipulado. O controlador foi avaliado quanto ao offset e overshoots apresentados, sendo os testes repetidos por um controlador PID para fins de comparação. Os resultados validaram o conceito de aplicação da lógica fuzzy para o controle fuzzy como uma solução viável e competitiva para o controle das propriedades de fluidos de perfuração.

Palavras-chaves: Lógica fuzzy, densidade, viscosidade aparente, fluidos de perfuração, controle fuzzy.

ABSTRACT

Mello, Thalles Pereira de. **Modeling and fuzzy control of density and apparent viscosity of drilling fluids**. 2022. 100 p. Dissertation (Master of Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Technology Institute, Chemical Engineering Department, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

Drilling fluids are complex products of the mixture of solids, liquids and gases. For these substances to fulfill their functions in the drilling process, there must be an efficient control of their properties. To this end, the oil industry seeks to develop new technologies and control techniques that are increasingly efficient, adaptable and versatile. This work aims to propose a real-time automated control system for the density and apparent viscosity of drilling fluids simultaneously using fuzzy logic. The evaluation of the control technique was carried out through the use of a pilot experimental unit for the preparation of drilling fluids, capable of preparing 100 liters of fluid per batch and equipped with solids dosers to adjust the properties of the fluid, as well as, density and viscosity sensors for the control system feedback. The pertinence functions of the fuzzy controller were developed through bench experiments to evaluate the interaction between the base fluid and the additives used for densification and viscosification. From the bench tests, the actuation range for the controller was defined from 1 to 1.2 g/cmS for density and 10 to 30 cP for apparent viscosity. The fuzzy controller was submitted to servo and regulator tests. In the servo-type tests the controller was able to bring the density and apparent viscosity to the desired setpoints, both simultaneously and individually. In regulator-type tests, step-type perturbations were applied to the fluid in both properties and the controller proved to be able to resist the perturbations, bringing the fluid properties back to the stipulated value. The controller was evaluated for the offset and overshoots presented, and the tests were repeated by a PID controller for comparison purposes, which pointed out the fuzzy control as a viable and competitive solution for the control of drilling fluid properties.

Keywords: Fuzzy logic, density, apparent viscosity, drilling fluids, fuzzy control.

Lista de Figuras

2.1	Esquema de sonda de perfuração Fonte: Desconhecida, Adaptada da Web	4
2.2	Representações dos gradientes da rocha Fonte: Rocha e Azevedo 2007	5
2.3	Bomba de Lama Fonte: glorytekdrill, 2020	7
2.4	Shale Shaker Fonte: glorytekdrill, 2020	7
2.5	Desander Fonte: gnsolidscontrol,2020	8
2.6	Desilter Fonte: gnsolidscontrol,2020	9
2.7	Degasser Fonte: gnsolidscontrol,2020	9
2.8	Mud Tank Fonte: gnsolidscontrol,2020	10
2.9	Tipos de fluidos Fonte: Pritchard, 2011 adaptado	11
2.10	Esquema do densímetro “balança de lama pressurizada”. Fonte: Adaptado do manual FANN Pressurized Mud Balance	13
2.11	Esquema do viscosímetro FANN 35A. Fonte: adaptado do manual FANN 35A	13
2.12	Histórico de aplicações da lógica fuzzy Fonte: Própria	15
2.13	Função de pertinência triangular Fonte: RADISH(2018)	17
2.14	Função de pertinência trapezoidal Fonte: RADISH(2018)	17
2.15	Função de pertinência gaussiana Fonte: RADISH(2018)	18
2.16	Função de pertinência gaussiana Fonte: RADISH(2018)	18
2.17	Função de pertinência gaussiana Fonte: RADISH(2018)	19
2.18	Estrutura de um controlador fuzzy Fonte: Almeida et al. (2020)	20
3.1	Unidade de filtração com operação automática. Fonte: Barbosa (2016)	27
3.2	Unidade de filtração com operação automática. Fonte: Barbosa (2016)	27
3.3	Diagrama PID da unidade de preparo de fluidos de perfuração: 1) Alimentador de sólidos; 2) Tanques ; 3) Bomba helicoidal; 4) Sensor de nível; 5) Medidor de densidade; 6) Transdutor de pressão; 7) Bomba dosadora de água; 8) Tanque de armazenamento Fonte: RACHID (2018)	28

3.4 Diagrama de Processo da unidade experimental. Fonte: FERRAZ (2019).....	29
3.5 Diagrama de Processo da unidade experimental. Fonte: Própria.....	30
3.6 Diagrama PID da unidade experimental. Fonte: Própria.....	30
3.7 Bomba helicoidal de deslocamento positivo. Fonte: Rachid(2018).....	31
3.8 Transdutor de pressão manométrica SMAR. Fonte: Própria.....	31
3.9 Transmissor indicador de densidade (DIT-05) e Vazão (FIT-08). Fonte: FERRAZ(2019)	32
3.10 Tanque de mistura. Fonte: RACHID(2018).....	33
3.11 Agitador acoplado ao tanque de mistura. Fonte: RACHID(2018).....	33
3.12 Sensor de Nível. Fonte: RACHID(2018).....	34
3.13 Bomba de Dosagem GRAPE Fonte: RACHID(2018).....	34
3.14 Bomba de Dosagem GRAPE Fonte: RACHID(2018).....	35
3.15 dosador de sólidos Retsch GmbH Tipo DR100 / 75 de acionamento digital Fonte: Própria	35
3.16 Quadros de comando e força da unidade experimental (acima) e seus interiores (abaixo). Fonte: Adaptado de RACHID(2018).....	36
3.17 Viscosímetro tipo tubular. Fonte: FERRAZ(2019).....	36
3.18 Arranjo físico viscosímetro tipo tubular. Fonte: Adaptado de FER- RAZ(2019).....	37
3.19 Comparação entre viscosímetros on-line e de bancada Fann 35A. Fonte: FERRAZ(2019)	39
3.20 Viscosímetro co axial.....	39
3.21 Chassis de aquisição de dados e controle CDAQ 9188XT. . Fonte: Manual do Fabricante.....	40
3.22 Módulo de saída de corrente da Série C. Fonte: Manual do Fabricante.....	41
3.23 IHM programada em Labview versão 2.0 modular. Fonte: Própria.....	42
3.24 Módulo de controle manual. Fonte: Própria.....	43
3.25 Módulo de controle fuzzy. Fonte: Própria.....	44
3.26 Módulo de controle PID. Fonte: Própria.....	44
3.27 Viscosímetro FANN35A. Fonte: Manual do Fabricante.....	45
3.28 Balança de Lama. Fonte: Manual do Fabricante.....	45
3.29 Variação da viscosidade ao longo do tempo em três concentrações distintas. Fonte: Própria	46
3.30 Procedimento experimental para os testes de bancada de interação entre barita e CMC Fonte: Própria.....	47
3.31 Tensão cisalhante em função da taxa de cisalhamento para suspensões de CMC e barita a pressão de 1 atm e temperatura de 25 C° Fonte: Própria.....	48

3.32	Variação da viscosidade plástica em função do nível de concentração de barita para diferentes concentrações de CMC a pressão de 1 atm e temperatura de 25 C° Fonte: Própria.	49
3.33	Variação de densidade em função do nível de concentração de CMC para diferentes concentrações de barita a pressão de 1 atm e temperatura de 25 C° Fonte: Própria.	50
3.34	Variação de densidade em função do nível de concentração de barita para diferentes concentrações de CMC a pressão de 1 atm e temperatura de 25 C° Fonte: Própria.	50
3.35	Variação de densidade em função do nível de concentração de Calcita para diferentes concentrações de CMC a pressão de 1 atm e temperatura de 25 C° Fonte: Própria.	51
3.36	Variação de viscosidade plástica em função do nível de concentração de calcita para diferentes concentrações de CMC a pressão de 1 atm e temperatura de 25 C° Fonte: Própria.	52
3.37	Efeito da adição de calcita na viscosidade.	53
3.38	Estrutura de cálculo do controlador fuzzy. Fonte:(PASSINO, K. M.; YURKOVICH, S , 1998).	53
3.39	Interface de programação do controlador fuzzy. Fonte:(Própria).	55
3.40	Funções de pertinência de entrada para densidade. Fonte:(Própria).	56
3.41	Funções de pertinência de entrada para viscosidade. Fonte:(Própria).	56
3.42	Funções de pertinência de saída para a dosagem de adensantes. Fonte:(Própria).	57
3.43	Funções de pertinência de saída para a dosagem de CMC. Fonte:(Própria).	58
3.44	Funções de pertinência de saída para a dosagem de água. Fonte:(Própria).	58
3.45	Matriz de regras fuzzy para o controle de densidade e viscosidade. Fonte:(Própria).	59
3.46	Simulação do controlador fuzzy para a dosagem de viscosificantes em situação que as propriedades se encontram no valor desejado. Fonte:(Própria).	62
3.47	Simulação do controlador fuzzy para a dosagem de adensantes em situação que as propriedades se encontram no valor desejado. Fonte:(Própria).	62
3.48	Simulação do controlador fuzzy para a dosagem de água em situação que as propriedades se encontram no valor desejado. Fonte:(Própria).	62
3.49	Procedimento experimental para operação da unidade de preparo de fluidos em testes de controle da densidade e viscosidade Fonte:(Própria).	63

4.1	Teste de controle fuzzy do tipo servo inicialmente com 20cP de viscosidade aparente e densidade de 1.0 g/cm^3 com setpoint de 1.1 g/cm^3 and 30 cP.	67
4.2	Teste servo de controle com densidade inicial de 1,0 g/cm^3 e 20 cP de viscosidade aparente com setpoint em 1,1 g/cm^3 e 30 cP.	68
4.3	Teste servo de controle com densidade inicial de 1,1 g/cm^3 e 15 cP de viscosidade aparente com setpoint em 1,1 g/cm^3 e 30 cP.	68
4.4	Respostas do controlador fuzzy em teste servo com setpoint de densidade estático e degrau positivo de viscosidade.	69
4.5	Teste servo de controle com densidade inicial de 1,1 g/cm^3 e 30 cP de viscosidade aparente com setpoint em 1,1 g/cm^3 de densidade e 20 cP de viscosidade aparente.	70
4.6	Resultado típico de falha de leitura em teste do tipo servo com setpoints definidos em 1,02 g/cm^3 e 10cP para densidade e viscosidade aparente, respectivamente.	71
4.7	Teste de controle PID do tipo servo inicialmente com 20cP de viscosidade aparente e densidade de 1.0 g/cm^3 , com setpoint de 1.1 g/cm^3 e 30 cP.	72
4.8	Teste de controle PID do tipo servo inicialmente com 20cP de viscosidade aparente e densidade de 1.1 g/cm^3 com setpoint de 1.1 g/cm^3 e 30 cP.	72
4.9	Teste de controle PID do tipo servo inicialmente com 30 cP de viscosidade aparente e densidade de 1.1 g/cm^3 com setpoint de 1.1 g/cm^3 e 20 cP.	73
4.10	Teste de controle Fuzzy do tipo regulador com setpoint em 30 cP de viscosidade aparente e com a densidade de 1.1 g/cm^3 submetido a adição de 12 litros de água e utilizando calcita como adensante.	74
4.11	Teste de controle PID do tipo regulador com setpoint em 30 cP de viscosidade aparente e com a densidade de 1.1 g/cm^3 submetido a adição de 12 litros de água e utilizando barita como adensante.	75
4.12	Leitura de viscosidade do viscosímetro tubular e do viscosímetro coaxial em teste servo de controle de densidade e viscosidade aparente com setpoint 10cP.	76
4.13	Teste servo de controle utilizando viscosímetro coaxial com densidade inicial de 1,07 g/cm^3 e 12 cP de viscosidade aparente com setpoint em 1,1 g/cm^3 e 20 cP.	76
4.14	Teste servo de controle com densidade inicial de 1,0 g/cm^3 e 20 cP de viscosidade aparente com setpoint em 1,1 g/cm^3 e 30 cP.	77

Lista de Tabelas

3.1 Níveis utilizados no planejamento experimental.	47
3.2 Níveis utilizados no planejamento experimental com calcita.51
3.3 Variáveis fuzzy de entrada do Controlador.56
3.4 Variáveis fuzzy de entrada do controlador.57
3.5 Variáveis fuzzy de saída do controlador fuzzy.57
4.1 Caracterização do fluido base dos testes em temperatura de 25 C° e 1 atm65

Lista de Abreviaturas

C-o-A	Método de Defuzzificação, Centro da Área
C-o-G	Método de Defuzzificação, Centro de Gravidade
C-o-M	Método de Defuzzificação, Centro do Máximo
MC	Carboximetilcelulose
DT	Density Transmitter
FIT	Flow Indicator Transmitter
FLC	Fuzzy Logic Controller
FL	Lógica Fuzzy
GLR	Gas Liquid Ratio
HEC	Hidroxietilcelulose
IA	Inteligência Artificial
IHM	Interface Homem Máquina
LEF	Laboratório de Escoamento de Fluidos
LIT	Level Indicator Transmitter
M-o-M	Método de Defuzzificação, Média do Máximo
PID	Diagrama de Tubulação e Instrumentação
PDT	Pressure Differential Transmitter
PID	Proporcional Integral Derivativo
PIT	Pressure Indicator Transmitter
RPM	Rotações por minuto

TT	Temperature Transmitter
UFRRJ	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
USA	United States of America
pH	potencial Hidrogeniônio

Lista de Símbolos

$\mu a(x)$	Grau de pertencimento de x em A
μ_{ef}	Viscosidade efetiva
ρ	Densidade
τ	Tensão de cisalhamento
D	Diâmetro do tubo
L	Comprimento
Q	Vazão volumétrica
R	Raio da tubulação
ΔP	Diferencial de Pressão
$\gamma(r)$	Taxa de deformação
μ_{ef}	Viscosidade
k	Índice de consistência
n	Índice de comportamento do fluido
v	Velocidade de escoamento do fluido

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvi
1 Introdução	1
2 Revisão de Literatura	3
2.1 Fluidos de perfuração	3
2.2 Medições de densidade e reologia	12
2.2.1 Densidade	12
2.2.2 Viscosidade	13
2.3 Lógica fuzzy	14
2.3.1 Fundamentos da lógica fuzzy	14
2.3.2 Conjuntos fuzzy	15
2.3.3 Operações entre conjuntos fuzzy	19
2.3.4 Controlador fuzzy	19
2.3.5 Processo de fuzzyficação	20
2.3.6 Base de conhecimentos	21
2.3.7 Processo de inferência fuzzy	21
2.3.8 Processo de defuzzyficação	22
2.4 Exemplos/ estado da arte	23
2.4.1 Controle fuzzy na indústria	23
2.4.2 Controle fuzzy na indústria do petróleo	24
2.4.3 Controle fuzzy para de fluidos	24
3 Materiais e Métodos	26
3.1 Unidade experimental	26
3.1.1 Re comissionamento, adaptação e evolução	26
3.2 Descrição da instrumentação e atuadores	29
3.3 Testes com viscosímetro coaxial	39
3.3.1 Interface homem máquina	41
3.4 Caracterização dos aditivos utilizados	45

3.5	Modelagem e controle fuzzy	52
3.5.1	Estratégia de controle	52
3.5.2	Modelagem do sistema por meio de lógica fuzzy	53
3.5.3	Funções de pertinência	55
3.5.4	Regras de inferência fuzzy	58
3.6	Metodologia experimental	63
4	Resultados e Discussões	65
4.1	Desempenho do controlador fuzzy em problemas do tipo servo	66
4.1.1	Desempenho do controlador PID em problema do tipo servo	71
4.2	Desempenho do controlador fuzzy em problema do tipo regulador	73
4.3	Testes com viscosímetro co-Axial	75
5	Conclusões	79
	Referências Bibliográficas	80

Capítulo 1

Introdução

O processo de perfuração de poços de petróleo é feito por meio de uma sonda. Neste processo as rochas são perfuradas pela rotação e peso exercidos por uma broca presente na extremidade da coluna de perfuração. Os cascalhos resultantes são deslocados para fora do poço por meio do bombeamento de fluido de perfuração para o interior da coluna, retornando a superfície por meio do espaço anular entre a coluna e as paredes do poço. A perfuração de um poço de petróleo tem riscos e um alto custo de operação, tornando necessário o monitoramento contínuo de diversos parâmetros do fluido, como a densidade e a viscosidade aparente.

A densidade de fluidos de perfuração tem como função principal controlar a pressão no poço em uma janela de operacional. A janela operacional é caracterizada pelos valores mínimo e máximo de pressão que podem ser aplicado ao sistema, sem que ocorra fluxos indesejados de fluido no poço ou fratura da rocha. O valor máximo é conhecido como pressão de fratura e o mínimo de pressão de poros.

O viscosidade afeta a velocidade de transporte dos fragmentos da perfuração assim como no controle da perda de carga na tubulação e exerce a função de manter o material sólido em suspensão no caso de necessidade de parada da linha.(THOMAS, 2001)[1].

Para manter a pressão hidráulica dentro dos limites, o operador bombeia fluido na coluna de perfuração, sendo necessário conhecer os parâmetros reológicos do fluido para manter o processo seguro.

Atualmente, o processo de produção de fluidos de perfuração e correção de suas propriedades passam pela amostragem do fluido e sua análise em ensaios de laboratório em instrumentos offline. Após obtidos os resultados, operadores especializados efetuam manualmente a dosagem de aditivos para corrigir as propriedades.

O objevo deste trabalho foi a proposta de um sistema automatizado de monitoramento e controle online de fluidos de perfuração. Segundo Gandelman (2013)[2], o aparato mais avançado de perfuração não assegura a eficiência das operações se o controle das propriedades do fluido não for efetivo.

Neste contexto, este trabalho propôs métodos para o controle da densidade e viscosidade de fluidos de perfuração a base de água, de forma automatizada. No estudo foram utilizados como aditivos barita como adensante e carboximetilcelulose (CMC) como viscosificante. O sistema experimental utilizado foi uma planta piloto, composta de um tanque de mistura onde dosadores vibratórios para a adição de aditivos, uma bomba helicoidal para o deslocamento do fluido por uma linha onde diversos sensores fizeram a leitura em tempo real das propriedades do fluido.

O controle tradicional cumpre inúmeras funções importantes, sendo suficiente para a resolução de grande parte de problemas de controle industrial. Porém sua eficácia deteriora-se devido à não linearidade e tempo morto. Por outro lado, controladores fuzzy não são sintonizados conforme o método tradicional. Segundo Bashier(2012)[3], controladores fuzzy geralmente apresentam melhores desempenhos onde esses aspectos são proeminentes.

Os sistemas fuzzy tem como característica a possibilidade de trazer a linguagem e o conhecimento humano para a linguagem de máquina, possibilitando seu uso em sistemas inteligentes de controle, além de demonstrar grande capacidade de lidar com imprecisões (ZADEH, 1965) [4]. Características que tornam o controlador fuzzy uma opção de estudo para o processo de preparo de fluidos de perfuração abordado neste trabalho.

Com o objetivo de controlar a densidade do fluido e a viscosidade aparente, realizou-se um conjunto de testes de bancada para avaliar a interação entre os aditivos utilizados e adquirir informações para a construção da base de conhecimento do controlador fuzzy.

Foi feito um conjunto de ensaios de bancada com o objetivo de compreender a sinergia entre o controle da densidade e viscosidade aparente assim como contribuir para a construção da base de conhecimento do controlador fuzzy.

Capítulo 2

Revisão de Literatura

Neste capítulo é apresentada uma visão geral da operação de perfuração de poços de petróleo assim como o processo de uma unidade de circulação e tratamento de fluidos de perfuração. Estratégias de controle das propriedades de fluidos de perfuração são apresentadas e alguns aspectos reológicos e geológicos relevantes a mesma.

Foi dado destaque à importância do controle adequado da densidade e de alguns parâmetros reológicos dos fluidos. A manutenção da densidade dentro de uma faixa operacional adequada da-se pela sua importância no controle da pressão de fundo de poço.

Com relação ao controle da reologia do poço, pode-se citar o adequado carreamento de cascalhos, controle de filtrado, características de bombas, entre outras.

2.1 Fluidos de perfuração

Na perfuração de poços a broca atua na rocha pela ação da rotação e do seu peso. Os fragmentos resultantes da perfuração são removidos pela ação contínua do fluido de perfuração, que é injetado por bombas para o interior da coluna de perfuração, e retorna para a superfície pelo espaço anular formado pelas paredes do poço e a coluna (THOMAS, 2001) [1].

O espaço anular entre as paredes do poço e o tubo de revestimento é cimentado a fim de isolar as rochas atravessadas, possibilitando o avanço da perfuração com segurança. Após o processo de cimentação, a coluna de perfuração é descida novamente no poço, seguindo o processo com uma broca de diâmetro menor que a do revestimento para o prosseguimento da perfuração (THOMAS, 2001) [1]. A figura 2.1 apresenta um sistema típico de perfuração de poços e petróleo.

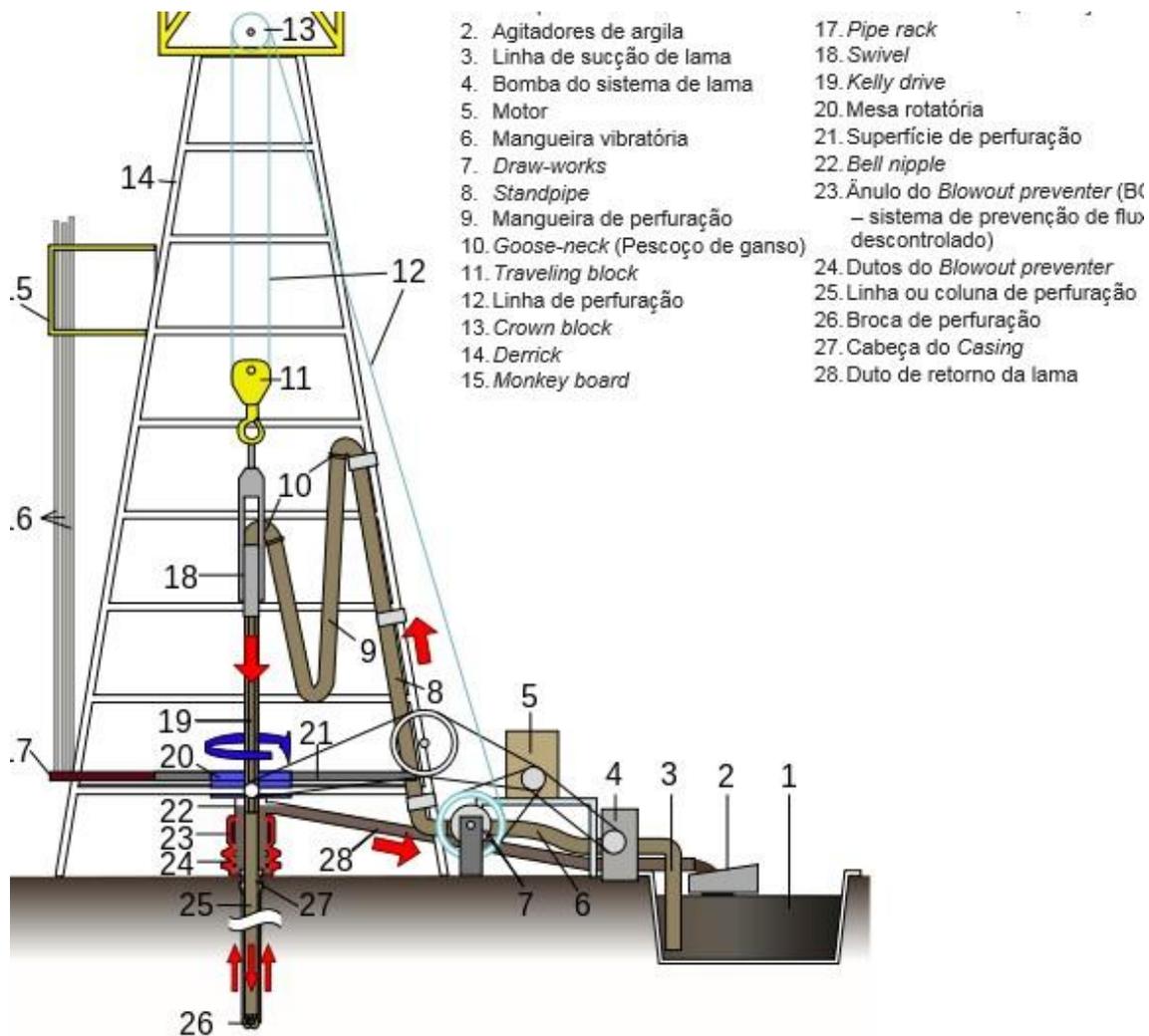


Figura 2.1: Esquema de sonda de perfuração Fonte: Desconhecida, Adaptada da Web.

Importância do controle da densidade de fluidos.

A fim de mitigar a perda de fluido e manter estáveis as paredes do poço durante o processo de perfuração, manipular corretamente as faixas operacionais de peso de fluido é de vital importância, isso torna essencial que as pressões de poros e fratura das rochas, sejam consideradas.

A pressão de poros é a pressão contida nos poros da formação, varia em função da profundidade e pode ser separada em três categorias: normal, subnormal e sobre pressão. Pressão de poros normais são aquelas equivalentes a pressão que uma coluna de água exerceria naquela profundidade, assim como as pressões subnormais e sobrepressões caracterizam valores menores e maiores, respectivamente, que a coluna de água equivalente (COSENDEY, 2011)[5]. O gradiente de pressão de poros pode ser definido como a razão da pressão de poros pela profundidade, expresso em densidade equivalente, ou seja, lbm/gal para que seja comparado com a densidade do fluido de perfuração (AbdallahGreenwood, 2007)[6].

No limite oposto a pressão de poros, está a pressão de fratura. A pressão de fratura é o valor de pressão que quando excedido, irá causar a fratura da formação comprometendo sua permoporosidade. Sendo assim o gradiente de pressão de fratura, ou gradiente de fratura, é definido como aquele que fratura da rocha,(COSENDEY, 2011)[5]. Além deste conceito, é possível ressaltar o gradiente de colapso, que pode ser essencial no estudo de geopressões em condições de fluidos de baixo peso. Segundo Rocha Azevedo (2019)[7], a pressão de colapso é a pressão de ruptura da rocha quando submetida à compressão. Este efeito acontece quando é verificada a ruptura da rocha pelo baixo peso da lama. Assim, a pressão de colapso é a pressão mínima capaz de manter as paredes do poço estáveis, impedindo assim que elas desmoronem parcial ou completamente.

Por meio destes conceitos, podemos identificar a janela operacional que determina o intervalo de variação do gradiente de pressão do fluido de perfuração, sem que haja danos à parede do poço. A figura 2.2 exemplifica um diagrama típico de gradientes de pressão na rocha.

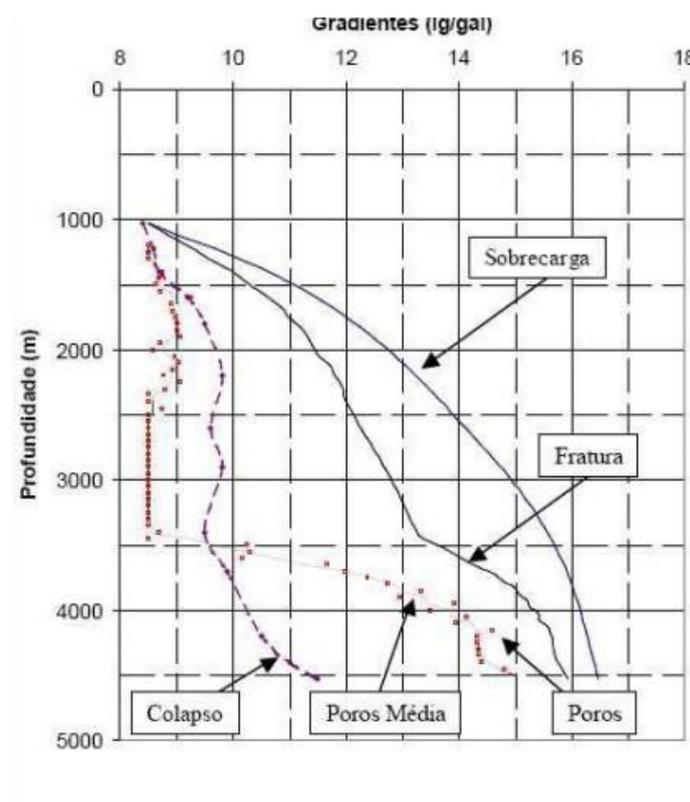


Figura 2.2: . Representações dos gradientes da rocha Fonte: Rocha e Azevedo 2007.

Controle de fluidos de perfuração

Fluidos de perfuração são produtos complexos da mistura de sólidos, líquidos, composto químicos e eventualmente gases, podendo apresentar o aspecto de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão do ponto de vista químico. São destinados a

auxiliar no processo de perfuração de poços de petróleo a fim de garantir uma perfuração rápida e segura. Atuam no resfriamento da broca, mantendo os cascalhos em suspensão quando o fluido estiver estático, assim como exercer pressão hidrostática sobre as paredes do poço mantendo sua estabilidade mecânica e química, evitando influxo de fluidos indesejáveis (kick) (THOMAS, 2000)[1].

As propriedades físicas de controle dos fluidos são: a densidade, a viscosidade, o teor de sólidos, o PH, a resistividade elétrica, o índice de lubrificidade e a estabilidade elétrica (SHIROMA, 2012)[8] .

No processo de perfuração, o controle de pressão do poço é feito por meio da alteração da densidade do fluido. Os limites de variação da densidade são definidos pela pressão de poros e pressão de fratura das formações expostas.

Os produtos comumente utilizados para elevar a densidade do fluido é a baritina ($BaSO_4$), a hematita e a galena pois apresentam peso específico elevado, possuem a densidade de 4, 25kg/m³, 5, 3kg/m³ e 7, 5kg/m³, respectivamente. Porém, apenas a baritina é utilizada no Brasil. (Baltar, 2020)[9]. Estes valores são superiores a 2, 60kg/m³ que representa a densidade média dos sólidos perfurados. Analogamente, se for necessário reduzir a densidade do fluido de perfuração, adiciona-se por exemplo água em fluidos base água e óleo diesel em fluidos de perfuração a base de óleo. (RADICH, 2018)[10].

Já o controle da viscosidade é feito por adição de compostos que podem ser classificados como naturais (gomas) e os viscosificantes. Dentre os viscosificantes modificados, os mais utilizados são o CMC(carboximetilcelulose), HEC (hidroxietilcelulose) e o CMS (carboximetilamido). (FERRAZ, 2019)[11].

Na figura 2.1 é apresentado um esquema de fluxo de um sistema de circulação e tratamento dos equipamentos envolvidos no processo de perfuração, circulação e tratamento do fluido de perfuração assim como seus componentes.

O fluido de perfuração é colocado em circulação por meio de bombas de “lama” (Mud Pump) equipamentos de grande porte, com capacidade para alta pressão e vazão como ilustrado na figura 2.4.



Figura 2.3: Bomba de Lama Fonte: glorytekdrill, 2020.

O fluido passa pela broca de perfuração resfriando-a e carregando os fragmentos de rocha resultantes da perfuração. Este fluido retorna do poço trazendo os fragmentos e posteriormente passa por etapas de peneiramento de diversas granulometrias, etapas estas que estão presentes na figura 2.1 .

A figura 2.4 mostra uma peneira vibratória (Shale Shaker). Sendo esta a primeira etapa para separar os sólidos de maior granulometria. O dimensionamento adequado dessas peneiras evita a sobrecarga dos equipamentos seguintes (PEREIRA, 2010) [12].



Figura 2.4: Shale Shaker Fonte: glorytekdrill, 2020.

As etapas de seguintes de separação granulométrica de sólidos são os hidrociclones que são capazes de separar sólidos da ordem de micron. As figuras 2.5 e 2.6 ilustram os separadores de sólidos hidrociclones.

Segundo Thomas (2001)^[1], os hidrociclones são cones ocios, com uma entrada para o fluido de perfuração que chega pressurizado devido a uma bomba centrífuga ligada a entrada do equipamento, passando por um corpo cilíndrico que induz a formação de um “vortex” interno, gerando uma intensa força centrífuga. Como decorrência, as partículas maiores e mais pesadas são levadas para uma saída de descarte de sólidos, existindo outra saída para a saída do fluido recuperado.



Figura 2.5: Desander Fonte: gnsolidscontrol,2020.

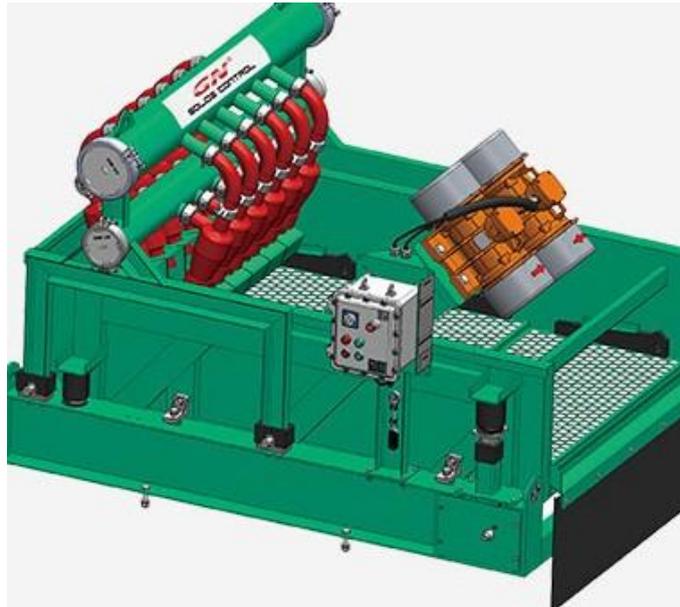


Figura 2.6: Desilter Fonte: gnsolidscontrol,2020.

Com os sólidos retirados do sistema pelas etapas anteriores, o fluido passa por um desgaseificador (degasser), figura 2.7. Nele pequenas quantidades de gases que podem ter se misturado ao fluido durante a circulação no interior do poço são removidas. Este equipamento é utilizado para reduzir as chances do fluido ficar leve devido ao acúmulo de gases, o que poderia acarretar um kick.(THOMAS, 2001)[1]



Figura 2.7: Degasser Fonte: gnsolidscontrol,2020.

A etapa seguinte, são os tanques de tratamento e armazenamento do fluido de perfuração (Mud tanks). Nesta fase, o fluido é armazenado e suas informações físicas e químicas são analisadas com a finalidade de tomar ações de correções para recuperar os parâmetros iniciais e poder reutilizá-lo no processo de perfuração. A figura 2.8 exemplifica um tanque.



Figura 2.8: Mud Tank Fonte: gnsolidscontrol,2020.

A importância do controle da reologia de fluidos

A reologia é o estudo do comportamento de escoamento e deformação da matéria, principalmente a relação entre tensão, deformação, taxa de deformação e tempo.(OLIVEIRA, 2015) [13].

Líquidos e gases deformam-se de maneira irreversível, dissipando a energia em forma de calor, sendo impossível recuperá-la. A reologia de fluidos de perfuração impacta em diversas frentes do processo de perfuração, entre elas, a eficiência hidráulica e estrutural de poços, controle de filtrado, carreamento de cascalhos. É importante entender como o cisalhamento causado pelos diversos processos presentes na perfuração afeta a viscosidade aparente dos fluidos.

Fluidos Newtonianos obedecem a uma relação linear entre a tensão e a taxa de deformação, cujo atrito interno é constante para taxas de cisalhamento distintas e é invariante no tempo, sendo a constante de proporcionalidade conhecida como viscosidade. Já fluidos não Newtonianos apresentam taxa de cisalhamento não proporcional em relação a taxa de deformação, sendo sua viscosidade inconstante para uma determinada situação.

Os fluidos não Newtonianos são caracterizados por seu comportamento, como dependentes ou independentes no tempo. Fluidos dependentes variam com a tensão de cisalhamento ao longo do tempo, que a mesma é aplicada. Entre eles se destacam os materiais tixotrópicos, que apresentam queda do valor de viscosidade ao longo do tempo de aplicação de tensão de cisalhamento, com um aumento na viscosidade ao cessar a aplicação de tensão. (PRITCHARD, 2011)[14]

Entre os fluidos independentes no tempo, estão aqueles em que a taxa de deformação em qualquer momento é somente em função da tensão a que é submetido. Segundo Pritchard (2011) [14], são classificados em alguns grupos:

Fluidos Binghamianos (Plásticos): Fluidos que necessitam de uma tensão cisalhante mínima para o início do movimento. Quando submetidos a uma tensão de cisalhamento acima do valor mínimo, apresentam um comportamento linear entre a

tal tensão e a taxa de deformação, ou seja, uma vez que o deslocamento se inicie o fluido Binghamiano comporta se como um fluido Newtoniano.

Fluidos pseudoplásticos: Fluidos onde a viscosidade decresce com o aumento da taxa de deformação ou tensão cisalhante. A maioria dos fluidos não Newtonianos apresenta este comportamento, como exemplo, pode-se destacar soluções poliméricas, suspensões coloidais e polpa de papel misturado a água.

Fluidos dilatantes: Fluidos onde a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento, são mais raros que fluidos pseudoplásticos. Soluções de açúcar e amido são exemplos de fluidos dilatantes.

Na figura 2.9 estão representadas as curvas de fluxo onde é possível observar o comportamento dos fluidos Newtonianos e não Newtonianos.

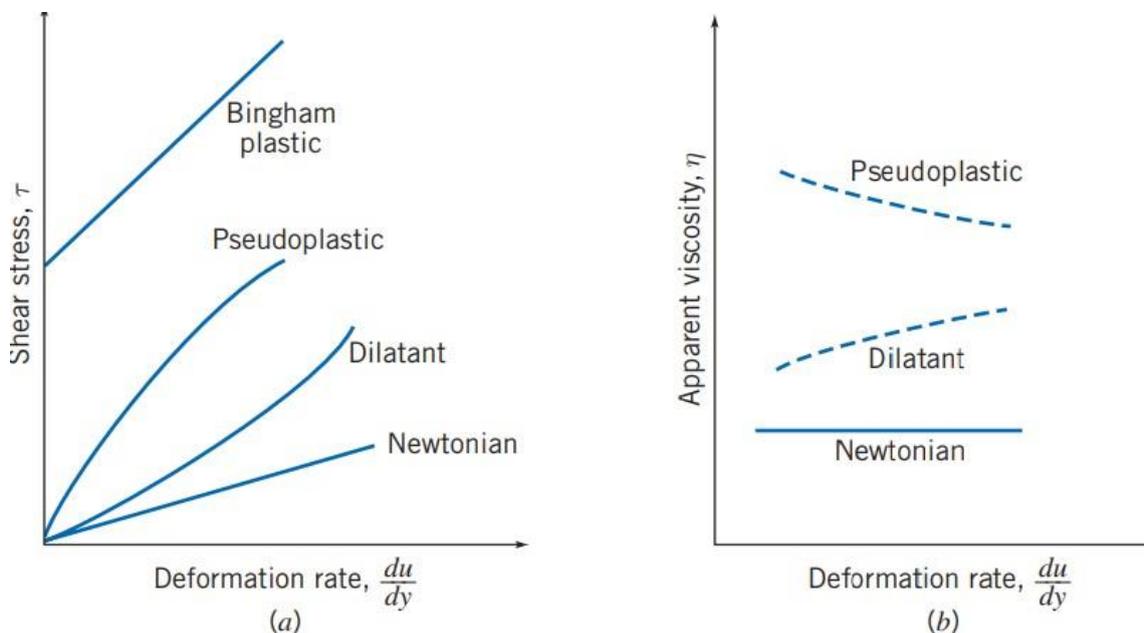


Figura 2.9: Tipos de fluidos Fonte: Pritchard, 2011 adaptado.

Os parâmetros reológicos definem o comportamento de fluxo de um fluido, os quais influenciam diretamente no cálculo de perda de carga na tubulação e velocidade de transporte dos fragmentos provenientes perfuração. Estes são determinados a partir de um modelo matemático. Os modelos mais comuns são: Power Law, Modelo de Bingham ou plástico ideal, modelo de Harschel-Bulkley ou fluido de potência com limite de escoamento ou fluido de potência modificado. (VALE, 2017) [15]

Power Law: Modelo de potência é o mais difundido e utilizado em aplicações de engenharia, pois uma grande gama de problemas pode ser resolvidos analiticamente aplicando este modelo. A equação para viscosidade aparente é definida por

$$\tau = K \frac{(\partial\mu)^n}{(\partial Y)}, \tag{2.1}$$

Onde K é o índice de consistência e n o índice de lei de potência. Um fluido Newtoniano apresenta $n = 1$. Caso $n < 1$ caracteriza um fluido pseudoplástico, se $n > 1$ tem-se um fluido dilatante.

Bingham: Geralmente é utilizado para descrever líquidos com grandes quantidades de suspensões e representa um material viscoplástico (BIRD et al, 2004)[16]. Esse tipo de fluido tem uma tensão limite de escoamento τ_0 . Por definição, se a tensão aplicada ao fluido for inferior que esse limite, não ocorrerá escoamento, se comportando como um corpo rígido quando submetido a baixas taxas de deformação.

Harschel-Bulkley: O modelo de Harschel-Bulkley é uma combinação dos modelos de Bingham e Power Law, representa fluidos com tensão limite de escoamento. São fluidos estruturados, que têm estrutura muito forte abaixo da tensão limite de escoamento, com a viscosidade elevada. Quando o fluido alcança a tensão limite de escoamento, a estrutura do fluido deteriora se, causando a queda acentuada dos níveis de viscosidade.

Por meio do estudo reológico, é possível prever como o fluido vai se comportar sobre várias condições de temperatura, pressão e taxa de cisalhamento. No campo, as propriedades reológicas de maior interesse que se encontram vinculadas ao desempenho dos fluidos são: índice de comportamento, índice de consistência, viscosidade aparente; viscosidade plástica; limite de escoamento e força gel (THOMAS, 2001)[1].

2.2 Medições de densidade e reologia

No processo de controle das propriedades dos fluidos de perfuração, amostras são coletadas dos tanques de fluido e levadas para testes em laboratório. Serão apresentados equipamentos da FANN, pois são amplamente utilizados nos poços de perfuração brasileiros.(MAGALHÃES, 2015)[17].

2.2.1 Densidade

A técnica comumente usada para a aferição da densidade de fluido de perfuração é baseada no equipamento chamado balança de lama, cujo esquema pode ser visto na figura 3.28, este equipamento tem seu funcionamento baseado no equilíbrio entre dois pesos, de um lado, o peso da amostra de fluido e do oposto, uma escala graduada e calibrada. Balanças de lama podem ser encontradas em dois modelos: o pressurizado e o sem pressão. Normalmente o modelo pressurizado possibilita, com o uso de um êmbolo, que seja injetado fluido sobre pressão na câmara do dispositivo, reduzindo assim, erros por aprisionamento de ar.

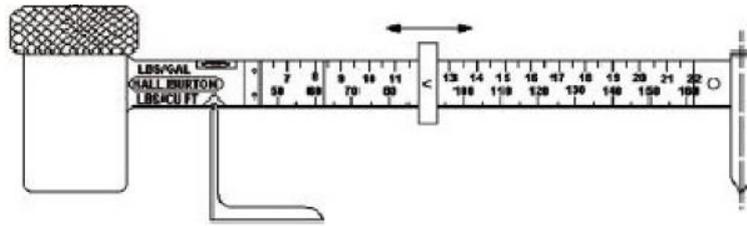


Figura 2.10: Esquema do densímetro “balança de lama pressurizada”. Fonte: Adaptado do manual FANN Pressurized Mud Balance.

Feito o preenchimento da câmara, à esquerda, com a amostra de fluido, o usuário acopla o êmbolo na parte superior da câmara e completa o volume restante. A seguir, deve-se deslizar a barra até obter o equilíbrio perfeito entre o peso da amostra e o peso da balança, orientando-se pelo medidor de nível na parte superior da peça. Com o equilíbrio alcançado, é possível ler diretamente na barra graduada o valor da densidade (FANN, 2009[18]).

2.2.2 Viscosidade

Para medir a viscosidade em bancada são utilizados viscosímetros para mensurar as propriedades de fluidos de perfuração, como pode ser observado na figura [2.11](#).

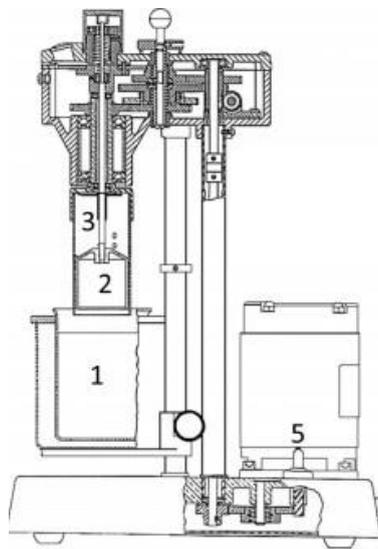


Figura 2.11: Esquema do viscosímetro FANN 35A. Fonte: adaptado do manual FANN 35A.

Segundo o manual, o princípio de funcionamento consiste em preencher com a amostra do fluido o copo de aferição (1), até completar o volume entre 200 a 300 ml. A seguir deve-se elevar a plataforma do copo de aferição até que os dois furos presentes no cilindro externo (3) sejam completamente submersos. Ao manipular a manopla (5) nas posições “Alta” ou “Baixa” juntamente com a marcha (4) tem-se a combinação de seis diferentes velocidades de giro no cilindro externo, 3, 6, 100, 200,

300 e 600 RPM. Cada velocidade causa uma taxa de deformação diferente. O giro do cilindro externo induz uma força de arraste no fluido que está confinado no espaço anular formado entre os dois cilindros. Este arraste movimenta o fluido radialmente até que o mesmo encontre o cilindro interno, que está ligado a uma mola. Este cilindro passa a flexionar a mola proporcionalmente ao torque causado pelo fluido de perfuração. A medição se dá ao ler, no lugar, o valor de cada deflexão angular, em graus, a cada velocidade correspondente. Para calcular a tensão de deformação, a equação fornecida pelo fabricante do equipamento, é

$$\tau_f = 0,51 \cdot \vartheta. \quad (2.2)$$

Onde ϑ representa o ângulo de deformação.

A taxa de deformação é

$$u = 1,703 \cdot RPM. \quad (2.3)$$

Já a viscosidade aparente de um fluido de perfuração pode ser definida por

$$u_{ap} = \frac{0,51 \cdot \vartheta}{1,703 \cdot RPM}. \quad (2.4)$$

2.3 Lógica fuzzy

A lógica fuzzy e a teoria dos conjuntos difusos podem ser definidas como um meio de transferir conhecimento, raciocínio e a capacidade de percepção humanas para sistemas automatizados, representando uma forma de lidar com dados imprecisos, provendo um método de traduzir expressões verbais vagas e aproximadas, comuns na comunicação humana em valores numéricos.

2.3.1 Fundamentos da lógica fuzzy

A lógica fuzzy é uma metodologia baseada no conceito de conjuntos difusos (fuzzy Sets) e em suas operações difusas, desviando-se do meio tradicional de como as máquinas trabalham com variáveis de entrada e saída. A lógica tradicionalmente utilizada de Boole trabalha por meio da tabela verdade, simulando entradas para obter valores de 0 ou 1, verdadeiro ou falso, ou seja, valores entre 0 e 1 não são inclusos para a resposta do sistema. A lógica fuzzy é cada vez mais utilizada para sistemas que necessitam receber uma entrada de informação vinda de seres humanos para automatizar qualquer processo. Por exemplo, em processos de tomada de decisão, diagnóstico, etc, sendo muito eficiente para sistemas de controle complexos e não lineares.

Zadeh (1965) [4] publicou o artigo que seria considerado a fundação do conhecimento em lógica fuzzy para resolver problemas incompatíveis com a lógica clássica, onde ficariam definidas ideias básicas dos conjuntos fuzzy, que representam a característica vaga da informação, assim como operações entre conjuntos fuzzy, como união, interseção, inclusão, complemento, relação e convexidade (ZADEH,1965)[4]. Em 2013 foi publicado um relatório do impacto da lógica fuzzy em aplicações de patente, apontando seu uso em 16,898 patentes nos USA e 7149 no japão (HARPREET, 2013)[19].

A figura 2.12 mostra uma rápida apresentação do desenvolvimento e o uso da lógica fuzzy.

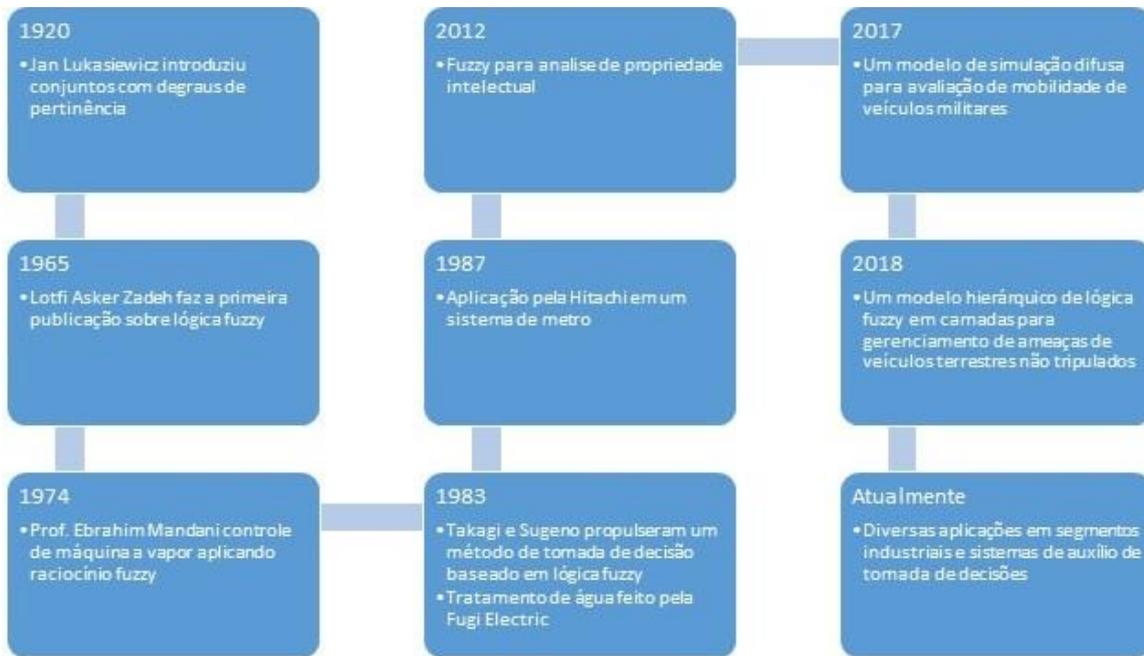


Figura 2.12: Histórico de aplicações da lógica fuzzy Fonte: Própria.

2.3.2 Conjuntos fuzzy

Em 1965 a teoria dos conjuntos difusos foi introduzida por Loft Zadeh (1965) [4]. Onde o princípio básico é que um conjunto A de um universo de discurso X, que é um elemento genérico, assim como $X = x$. O conjunto fuzzy A em X é definido por um função de pertinência,

$$\mu : X \rightarrow [0, 1].$$

Essa função liga cada elemento x de X a um grau de pertinência em um intervalo 0,1, onde x pertence a A. (ZADEH, 1965)[4]. Ou seja, os conjuntos fuzzy podem ser definidos como funções que um atributo que pode pertencer a um conjunto com valor entre 0 e 1, atribuindo o grau de pertencimento de x em A. Por exemplo:

$$\mu_A(x) = 1,$$

representa que x pertence completamente a A.

$$\mu_A(x) = 0,$$

representa que x não tem nenhum grau de pertencimento em A.

$$\mu_A(x) = 0,65,$$

representa que x tem 65% de pertencimento em A.

O conceito de conjuntos difusos possibilita o uso de categorias com limites imprecisos, de situações intermediárias entre o todo e o nada, da passagem gradual de uma propriedade a outra assim como o uso de valores aproximado. Ou seja, conjuntos difusos tem como propósito possibilitar uma pertinência gradual e não absoluta em um elemento a uma classe, contrastando com a noção de conjunto clássico onde um elemento pertence ou não a uma classe. (ARAUJO, 2009)[20].

Conjuntos fuzzy são definidos por funções de pertinência, que podem ser implementadas computacionalmente e podem ser encontrados em diversos formatos, tais como triangular, trapezoidal, gaussiana, sino, sigmoidal, entre outras, descrevendo como cada ponto em um universo de discurso se relaciona a um grau de pertinência em um intervalo [0,1].

A seleção da forma geométrica que mais se adequa a função de pertinência pode variar muito, apesar de ter uma importância vital na solução do problema, sendo as triangulares e gaussianas mais incidentes em situações que se deseja exprimir pertinência crescente à esquerda e decrescente à direita. Funções trapezoidais são encontradas em situações semelhantes, porém onde há um desejo de estender a faixa de pertinência máxima. (RADICH, 2018)[10]

As principais funções matemáticas utilizadas na representação de conjuntos fuzzy são apresentadas a seguir.

A função de pertinência triangular é mostrada na figura 2.13, onde a, b, c, são parâmetros escalares que representam os vértices do triângulo.

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

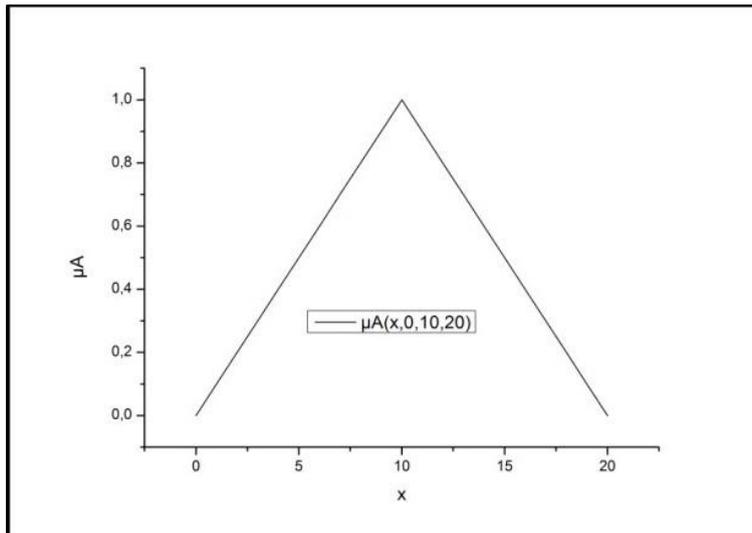


Figura 2.13: Função de pertinência triangular Fonte: RADISH(2018).

A figura 2.14 representa uma função trapezoidal, cujos quatro vértices são representados por a, b, c, d.

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

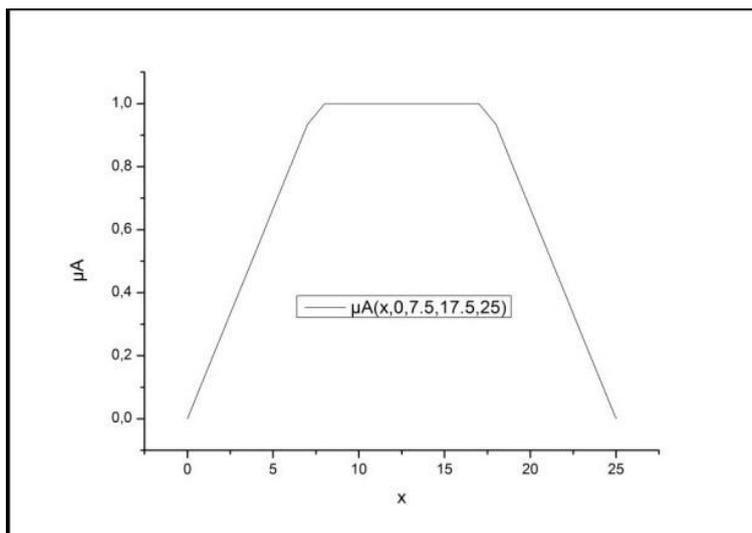


Figura 2.14: Função de pertinência trapezoidal Fonte: RADISH(2018).

A função gaussiana, figura 2.15, é definida por dois parâmetros, a média c e o desvio padrão:

$$\mu_A(x, \sigma, c) = \exp \frac{-(x - a)^2}{2\sigma^2}$$

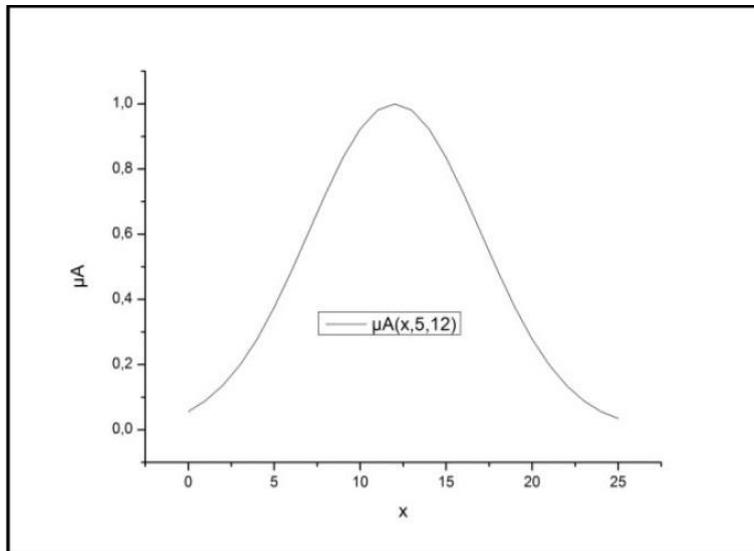


Figura 2.15: Função de pertinência gaussiana Fonte: RADISH(2018).

A figura 2.16 apresenta a função sigmoidal, com os parâmetros a e c, que correspondem ao parâmetro de inclinação e ao ponto de inflexão da curva respectivamente.

$$\mu_A(x, \sigma, c) = \exp \frac{1}{1 + \exp(-a(x - c))}$$

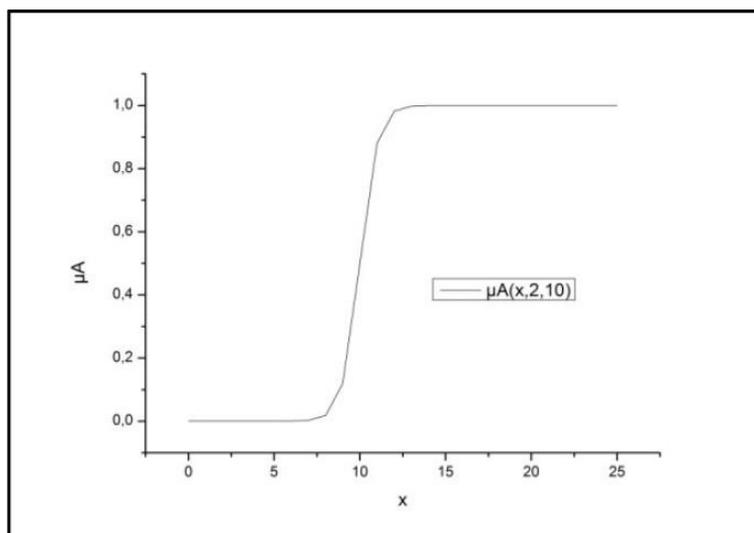


Figura 2.16: Função de pertinência gaussiana Fonte: RADISH(2018).

A função sino possui três parâmetros a, b, e c, onde o parâmetro a representa a extremidade da curva quando $\mu_a(x) = 0$, b o ponto de inflexão da curva quando

$\mu_a(x) = 0,5$ e c é o ponto central da curva. A forma dessa função é representada na figura 2.17.

$$\mu_A(x, \sigma, c) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2 b}$$

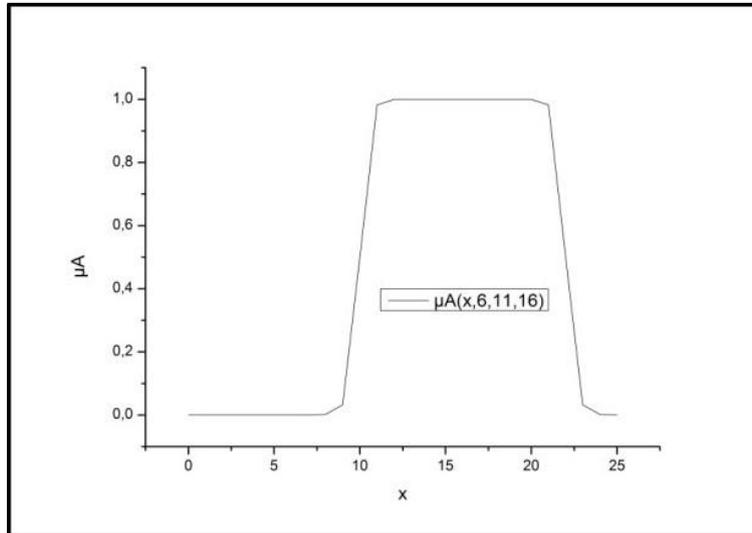


Figura 2.17: Função de pertinência gaussiana Fonte: RADISH(2018).

2.3.3 Operações entre conjuntos fuzzy

Plantas e processos industriais são sistemas físicos, podendo ter seus modelos matemáticos expressos em forma de números e conjuntos, possibilitando a construção de bases de conhecimentos que envolvem diferentes universos de discurso a partir das entradas e saídas do sistema de controle. As operações básicas dos conjuntos fuzzy são a interseção e a união de conjuntos (SHAW & SIMÕES, 2007) [21].

Com A e B se tratando de conjuntos difusos e μ_a representando o valor de pertinência entre $[0, 1]$, as operações mais comuns são interseção e união, sendo descritas por:

União:

$$A \cup B \Leftrightarrow \mu_{A \cup B} = \mu_a \vee \mu_b.$$

Interseção:

$$A \cap B \Leftrightarrow \mu_{A \cap B} = \mu_a \wedge \mu_b.$$

2.3.4 Controlador fuzzy

Controladores fuzzy, também conhecidos como controladores difusos, são desenvolvidos com o intuito de aplicar ações de controle provenientes do conhecimento acumulado por especialistas humanos. Este arquétipo forma um modelo lógico de

controle inteligente, o qual é focado nas ações de controle que seriam tomadas por operadores humanos, ajustando os parâmetros de controle a fim de obter um setpoint desejado.

Essa aproximação foge dos métodos de controle convencionais de processos onde os algoritmos de controle são definidos analiticamente por meio da modelagem matemática dos processos a fim de derivar as ações de controle em função do estado do processo. Em contraste, o controle fuzzy faz uso de regras lógicas para compor o algoritmo de controle a fim de descrever um padrão de experiência humana, aspectos intuitivos e heurística para controlar um processo. Esta nova abordagem foi motivada de casos onde o conhecimento de especialistas de controle estava acessível, por meio de operadores ou projetistas experientes acostumados a lidar com sistemas cujos modelos matemáticos seriam muito complicados ou custosos para serem desenvolvidos (SHAW & SIMÕES, 2007) [21].

A estrutura básica de um controlador fuzzy pode ser visto na figura. 2.18, ela é composta pela interface de fuzzyficação, base de conhecimento (Base de dados e base de regras), Motor de inferência(lógica de tomadas de decisão) e a interface de defuzzyficação.

A estrutura do controlador converte valores que pertencem ao domínio do mundo real, que usa números reais, para o domínio fuzzy, composto por valores fuzzy. Nessa transformação, um conjunto de inferência fuzzy é utilizado para o processo de tomada de decisões, finalizando com a conversão inversa, retornando os valores fuzzy para valores reais, possibilitando o seu uso em atuadores para agir no controle do processo (SHAW & SIMÕES, 2007) [21].

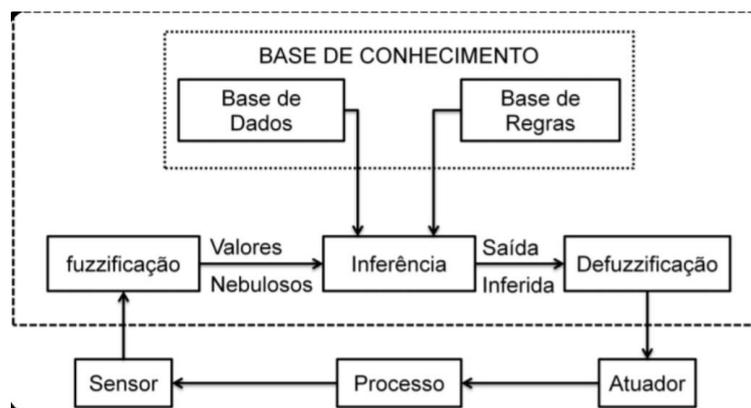


Figura 2.18: Estrutura de um controlador fuzzy Fonte: Almeida et al. (2020).

2.3.5 Processo de fuzzyficação

O processo de fuzzyficação constitui um mapeamento de números discretos (reais) para o domínio dos números fuzzy. A interface de fuzzyficação toma os valores não fuzzy (crisp), vindo de sensores ou outros dispositivos computadorizados que enviam

grandezas físicas como variáveis de entrada para sistema, aplica um escalonamento a fim de condicionar os valores a um universo de discurso pré definido para cada variável de entrada, fuzzyficando os valores em um universo por meio das funções de pertinência contidas na base de conhecimento, tornando os sinais de entrada em um intervalo $[0,1]$ que pode ser associado a variáveis linguísticas. (SHAW & SIMÕES, 2007) [21].

2.3.6 Base de conhecimentos

A base de conhecimento de um controlador fuzzy é composta pela base de dados onde estão armazenadas as variáveis discretas de discurso em suas funções de pertinência, e pela base de regras fuzzy que utilizam as funções de pertinência para realizar inferências lógicas utilizando um modelo de inferência. A base de conhecimentos fornece ao controlador fuzzy os meios necessários para emular um aspecto relevante na forma de pensar dos seres humanos: a implicação lógica, que consiste na formulação de uma conexão entre causa e efeito. (SHAW & SIMÕES, 2007) [21]. Considerando um exemplo de regra fuzzy:

SE a densidade do fluido está MUITO BAIXA, ENTÃO dose adensante em uma taxa MUITO ALTA.

Na regra acima, o termo "SE a densidade do fluido está MUITO BAIXA" é uma condição da regra chamada de antecedente e "ENTÃO dose adensante em uma taxa MUITO ALTA." é o termo consequente, onde os termos "MUITO BAIXA" e "MUITO ALTA" são rótulos linguísticos definidos por conjuntos fuzzy.

2.3.7 Processo de inferência fuzzy

Componente responsável por simular o processo de tomada de decisão de seres humanos, em conjunto com a base de regras. O sistema de inferência fuzzy gera ações de controle (consequentes) a partir de condições de entrada (antecedentes), consiste na conferência do grau de pertinência das funções de entrada e os requisitos nas premissas das regras, determinando o nível de compatibilidade global da premissa em cada regra, resultando em um valor de conclusão referente a pertinência da regra com os dados e a ação de controle, agregando os valores provenientes da conclusão de várias regras, quando necessário, o que retorna uma ação de controle global. Dois tipos principais de sistemas de inferência fuzzy que podem ser implementados são: Tipo Mamdani (1977) e tipo Sugeno (1985), esses dois modelos de inferência variam na forma de como as saídas são determinadas.

Segundo Kalogirou (2009) [22], a inferência do tipo Mamdani espera que as funções de pertinência de saída sejam conjuntos fuzzy. Após o processo de agregação, existe um conjunto fuzzy para cada variável de saída, que precisa de defuzzificação.

É possível, e às vezes mais eficiente, usar um único pico como a função de pertinência de saída em vez de um conjunto difuso distribuído. Isso, às vezes chamado de função de pertinência de saída singleton, pode ser considerado um conjunto fuzzy pré-defuzzificado. Aumenta a eficiência do processo de defuzzificação porque simplifica muito a computação exigida pelo método Mamdani mais geral, que encontra o centroide de uma função bidimensional. Ao invés de integrando através da função bidimensional para encontrar o centróide, o peso médio de alguns pontos de dados pode ser usado.

O método Sugeno de inferência difusa é semelhante ao método Mamdani em muitos aspectos. As duas primeiras partes do processo de inferência fuzzy, a fuzzyficação das entradas e a aplicação do operador fuzzy são exatamente as mesmas. A principal diferença entre a inferência fuzzy do tipo Mamdani e do tipo Sugeno é que as funções de pertinência de saída são apenas lineares ou constantes para a inferência fuzzy do tipo Sugeno, cujo consequente de cada regra é definido como uma função das variáveis linguísticas de entrada.

O resultado de cada regra é um valor numérico (não um conjunto fuzzy), que assume como peso o valor da pertinência resultante do processamento do antecedente da regra. Essa determinação abre mão da definição de uma função de implicação específica. A saída do controlador é obtida pela média ponderada das respostas das regras individuais. Ou seja, neste tipo de controlador não se utiliza processo de defuzzificação. O valor de saída pode também ser definido como um valor constante, que pode ser interpretado como um conjunto fuzzy singleton, e o seu uso permite a definição de regras com valores de saída que representam uma classificação da resposta do controlador, sem alterar a forma simplificada da determinação da resposta final do mesmo.

2.3.8 Processo de defuzzyficação

Como os processos técnicos exigem ações de controle nítidas, é necessário um procedimento que gere um valor nítido a partir de um ou mais conjuntos difusos (saída). Esses métodos de defuzzificação são muitas vezes baseados em ideias heurísticas, como "tomar a ação que corresponde à associação máxima", "tomar a ação que está no meio do caminho entre dois picos ou no centro do platô", etc.

Vários fatores podem contribuir para o tratamento superficial da defuzzificação: primeiro, a defuzzificação pode ser vista como não fazendo parte do núcleo de um sistema fuzzy. O sistema usa conjuntos fuzzy para manipular informações imprecisas e/ou incertas para superar as deficiências de um sistema crisp clássico. Como consequência, é natural que o resultado do núcleo de um sistema fuzzy seja um conjunto fuzzy que incorpore uma representação de imprecisão e/ou incerteza. A

defuzzificação elimina tudo isso, pois reduz o conjunto fuzzy a um único valor de crisp. Em segundo lugar, a defuzzificação é “apenas o último passo”. A única razão para a defuzzificação é a interface com modelos nítidos do mundo, modelos que não podem lidar com imprecisão ou incerteza. Ou seja, a defuzzificação é um processo de síntese (LEEKWIJCK & KERRE, 2009) [23].

Existem diversas opções de métodos métodos de defuzzificação que podem ser aplicados. Os métodos mais comuns são o Centro da Área (C-o-A) ou Centro de Gravidade (C-o-G), Centro do Maximo (C-o-M) e Média do Maximo (M-o-M). O método de defuzzificação mais comumente utilizado em aplicações é o método do Centro da Área, onde o centro da área que representa o termo de saída fuzzy (OUT). Esse termo é formado pela junção de todas as contribuições das regras, onde os pesos para o cálculo de uma média ponderada são os graus de pertinência (SHAW & SIMÕES, 2007) [21].

A equação do método do Centro de Área mais frequente utilizada é dada por

$$\mu_{Out}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \mu_{Out}(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{Out}(x)}$$

onde X_i é o valor discreto da posição do centroide da função de pertinência individual e $\mu_{OUT}(x_i)$ é o valor discreto do grau de pertinência de x_i .

2.4 Exemplos/ estado da arte

A lógica fuzzy apresenta um amplo leque de aplicações documentadas na literatura científica e esta seção apresenta exemplo de suas aplicações na indústria do petróleo e em aplicações de controle de propriedade de fluidos em tempo real.

2.4.1 Controle fuzzy na indústria

Bonissone (1995) [24] ilustra os estudos a respeito da aplicação de lógica fuzzy em produtos produzidos pela General Eletric. A análise feita aborda uma relação entre custo e complexidade de aplicações que vai de máquinas de lavar, apontadas como baixo custo e baixa complexidade a controle de motores de aviões, apontadas como alto custo e alta complexidade.

Aplicações para lógica fuzzy apresentadas incluem: Uso em turbinas a gás visando obter maior eficiência, controle de startup de turbinas a vapor e redução do custo de geração de energia. Em cada aplicação é descrita o método atual, a demanda exigida e a metodologia de aplicação de controle fuzzy utilizada como solução.

2.4.2 Controle fuzzy na indústria do petróleo

Em Okwu et al.[25] foi feito um estudo sobre o uso de lógica fuzzy em diversas frentes de operações da indústria de produção de petróleo, compilando múltiplos exemplos nas seguintes áreas:

Otimização de produção em capo, onde foi aplicado um sistema especialista para diagnosticar mecanismos de dano de formação em poços de armazenamento de gás;

Caracterização de rochas de perfilagem onde o estudo mostrou que a lógica difusa pode prever os tipos de rocha de poços que não possuem nenhuma amostra de núcleo;

Perfuração e completação onde a lógica fuzzy foi usado para planejar a geometria do poço e estratégias de completação dos poços multilaterais;

Tratamento e estimulação Projeto do tratamentos de estimulação, seleção do tratamento específico e seleção de poços candidatos.

Em Lial et al. [26] é apresentado um estudo de desing e desenvolvimento de um controlador fuzzy (FLC) para um sistema de separação de petróleo baseado na experiência de engenheiros de petróleo, que monitoram e controlam os equipamentos de separação e produção presentes na planta industrial.

Uma variável crucial no controle de qualidade da separação de petróleo bruto é a razão gás-líquido (GLR), e os ajustes nesta variável controlam diretamente a qualidade do óleo produzido durante o processo de separação. O FLC controla os níveis de pressão e líquido dentro de um separador de óleo e ambas as variáveis estão associadas ao GLR.

O controlador desenvolvido foi testado em uma planta real de produção no Canadá e os resultados indicam que o sistema apresentou uma melhora na qualidade do produto final.

controlador fuzzy aplicado a um processo automatizado de separação, onde foi provada sua efetividade para um processo com características não lineares e complexas.

2.4.3 Controle fuzzy para de fluidos

Em (ONOFRE, 2012)[27] é proposto o projeto, implementação e avaliação de desempenho de um controlador fuzzy para regulação de pH em plantas industriais, principalmente em reatores de tanque agitado, geralmente encontradas em refinarias de petróleo. O sistema foi desenvolvido baseado no software Simulink/MatLab®, emulando uma planta real onde o controle é feito com a dosagem de ácido e base em um tanque agitado, onde um sensor instalado é responsável por gerar uma leitura de pH para o controlador. Os resultados obtidos apontam que o controlador fuzzy é adequado para o controle de pH em processos de petróleo com características não lineares, apontando resultados melhores que o controlador PI utilizado como

referência .

Estudos anteriores de controle automatizado de fluidos do Laboratório de Escoamento de Fluidos (LEF)

O presente trabalho foi uma continuidade da linha de pesquisa de controle e monitoramento das propriedades de fluido de perfuração iniciada por Radich (2018)[10] e posteriormente ampliada por Ferraz (2019) [11] que estudou o controle da viscosidade aparente no Laboratório de Escoamento de Fluidos (LEF)/UFRRJ.

Radich (2018) [10] projetou um sistema automatizado de controle e monitoramento de densidade de fluidos de perfuração. Foi feita uma comparação de desempenho entre aplicação da tecnologia fuzzy e o controle convencional proporcional Integral (PI). O sistema foi baseado no software LabVIEW®. Os resultados obtidos apontam que, apesar de os critérios de avaliação utilizados não tenham fornecido uma resposta conclusiva, os aspectos operacionais e econômicos indicaram a superioridade do controlador fuzzy-PI.

No trabalho de Ferraz (2019) [11] foi desenvolvido um sistema de monitoramento e controle da viscosidade aparente de fluido de perfuração em tempo real. Foi utilizada, a mesma unidade de Radich (2018)[10], que passou por adaptações para atender as necessidades deste trabalho, o que passa pela inclusão de um viscosímetro tubular. Para fins de avaliação, o controlador foi submetido a testes de controle do tipo regulador e servo, cujos resultados se mostraram satisfatórios, apontando que a lógica fuzzy se apresenta como uma opção viável para o controle da viscosidade em fluidos de perfuração.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Unidade experimental

O desenvolvimento da parte laboratorial utilizado nesta dissertação foi feito no Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani – LEF/UFRRJ – no Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. O desenvolvimento da unidade experimental teve como objetivo a criação de uma plataforma para testes de preparo automático de fluido de perfuração, assim como a aplicação de estratégias de controle e monitoramento em tempo real das propriedades físicas do mesmo, sendo agora adaptada para o controle da viscosidade aparente e densidade simultaneamente por meio de lógica fuzzy.

3.1.1 Re comissionamento, adaptação e evolução

Iniciando com um breve relato cronológico da unidade experimental utilizada neste trabalho, que passou por uma atualização realizada no equipamento, sendo este trabalho a quarta etapa de melhoramento de hardware.

A unidade foi construída em Barbosa (2016)[28], cujo objetivo foi o desenvolvimento de uma célula de filtração com operação automática. A figura 3.1 ilustra o conceito da primeira versão,

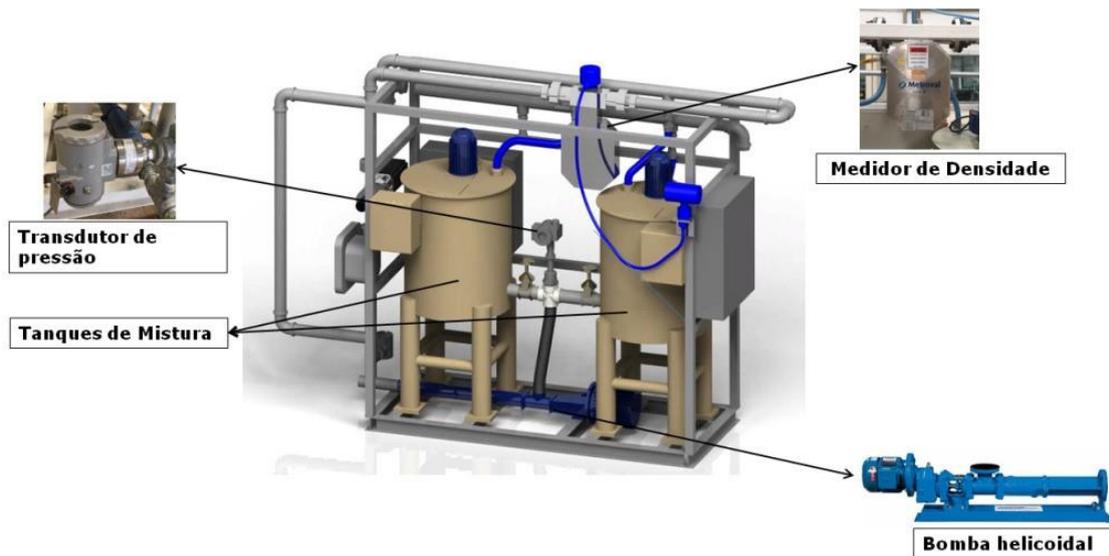


Figura 3.1: Unidade de filtração com operação automática. Fonte: Barbosa (2016).

A figura 3.2 representa seu diagrama PID, onde pode-se observar que era composta de dois tanques com misturadores, uma bomba helicoidal e instrumentos de medição de densidade e pressão em um loop de recirculação do fluido.

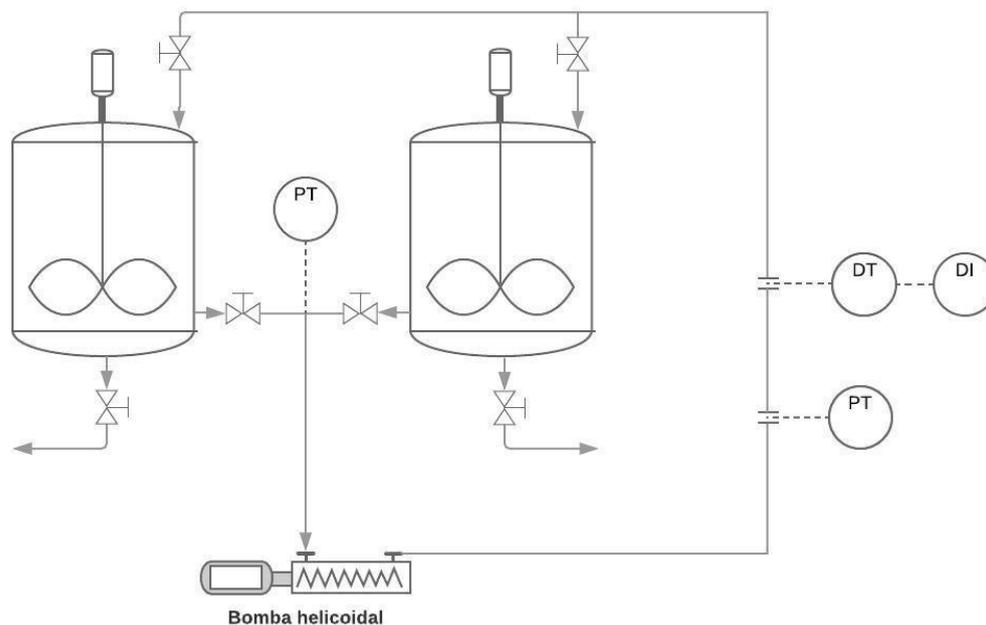


Figura 3.2: Unidade de filtração com operação automática. Fonte: Barbosa (2016).

Radich (2018) [10] deu continuidade ao uso da unidade agora com o objetivo de fazer o controle automático de densidade em fluidos de perfuração, tendo como principais alterações a utilização de um tanque de mistura. Outras adaptações incluíram a instalação de um sensor de nível, uma bomba dosadora, um alimentador de

sólidos (moega vibratória) e um tanque de armazenamento de água, como mostrado no diagrama P&ID na [3.3](#)

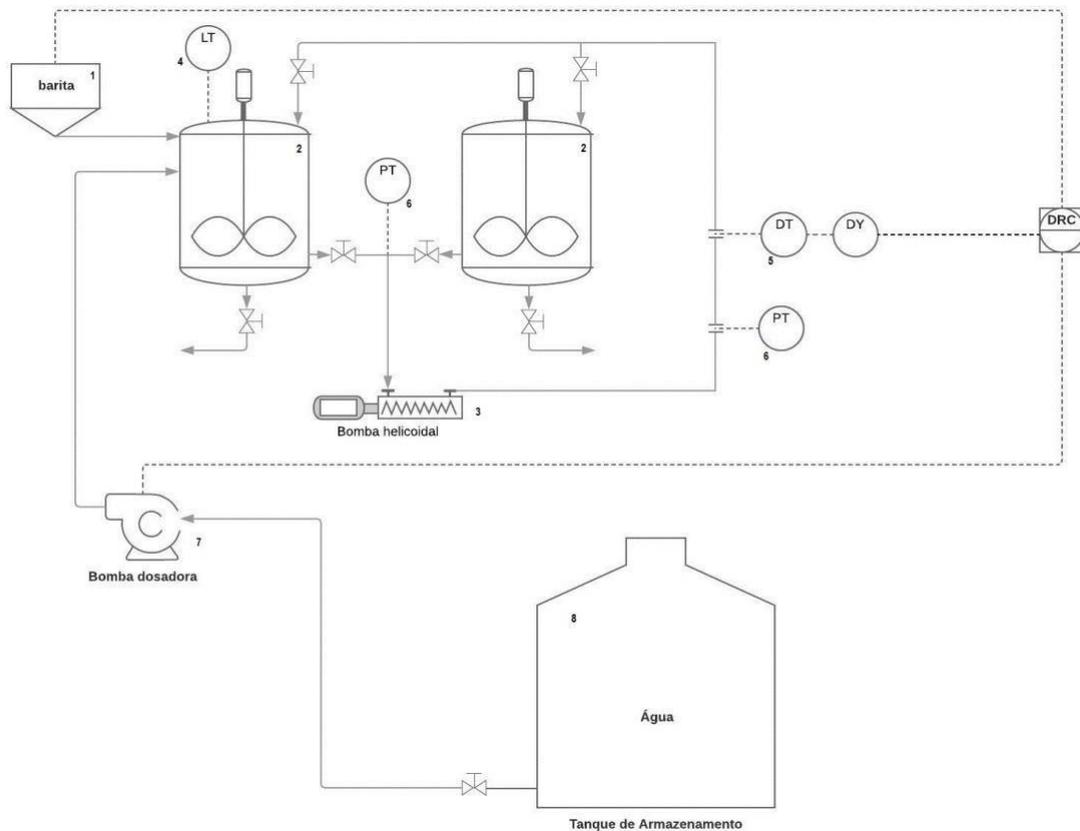


Figura 3.3: Diagrama PID da unidade de preparo de fluidos de perfuração: 1) Alimentador de sólidos; 2) Tanques ; 3) Bomba helicoidal; 4) Sensor de nível; 5) Medidor de densidade; 6) Transdutor de pressão; 7) Bomba dosadora de água; 8) Tanque de armazenamento
Fonte: RACHID (2018)

Seguindo a linha de pesquisa de controle das propriedades físicas de fluido de perfuração, agora com o objetivo de controlar e monitorar a viscosidade de fluidos de perfuração, Ferraz (2019) [\[11\]](#) incluiu a estrutura básica da unidade um viscosímetro tubular, que compõe a instalação de um sensor transmissor diferencial de pressão – PDT, um medidor de vazão – FIT e a inclusão de um circuito de tubulações para circulação de fluido de perfuração a fim de operacionalizar o viscosímetro tubular. O diagrama PID da unidade modificada pode ser visto na [figura 3.4](#)

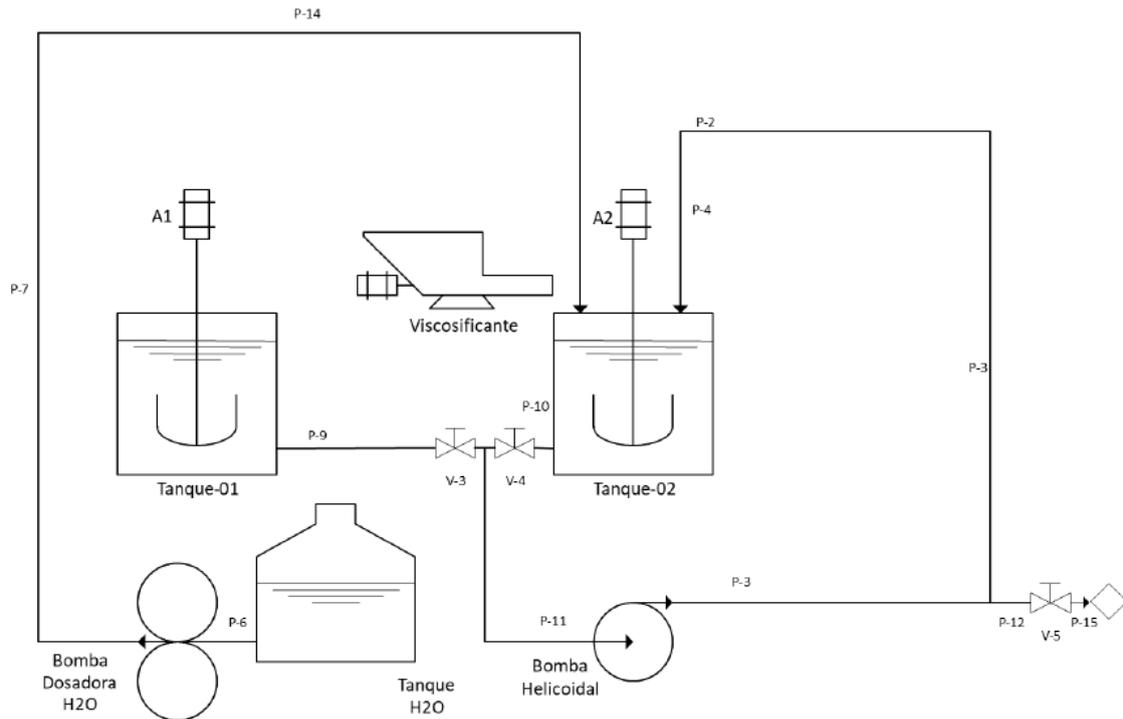


Figura 3.4: Diagrama de Processo da unidade experimental. Fonte: FERRAZ (2019).

Para o presente trabalho, a unidade de preparo de fluidos foi adaptada a fim de manter os equipamentos e instrumentação existentes e permitir o controle da viscosidade e da densidade simultaneamente. Foi instalado um novo dosador de sólidos assim como todas as adaptações elétricas, mecânicas e de software necessárias, em conjunto com uma revisão em toda parte elétrica da unidade experimental e a abertura e limpeza de seus sensores e partes hidráulicas críticas.

3.2 Descrição da instrumentação e atuadores

A unidade atualizada consiste em dois tanques de fluido, o Tanque 01, utilizado como auxiliar para armazenar o excesso de fluido produzido ou água utilizada para diluição. O Tanque 02, foi utilizado para o preparo do fluido, podendo receber material vindo de um dosador de viscosificantes e um dosador de adensantes ou pela bomba dosadora de água, sendo possível aplicar agitação ao fluido por meio do misturador A2 acoplado ao tanque. O fluido preparado foi colocado em circulação por meio de um sistema fechado, onde estão presentes os seguintes instrumentos: O transmissor de pressão diferencial (PDT-09) e o transmissor indicador de vazão (FIT-08) que compõem o circuito de medição de viscosidade, assim como o transmissor de densidade (DT-05) e retorna ao tanque T02. A leitura do nível de fluido foi feita pelo transmissor indicador de nível (LIT-07) e a pressão da linha da bomba de recirculação pelo transmissor e indicador de pressão (PIT-04). A temperatura foi

medida pelo transmissor de temperatura (TT-03).

O diagrama PID é ilustrado na figura 3.5 e a vista superior da unidade de preparo de fluidos na figura 3.6

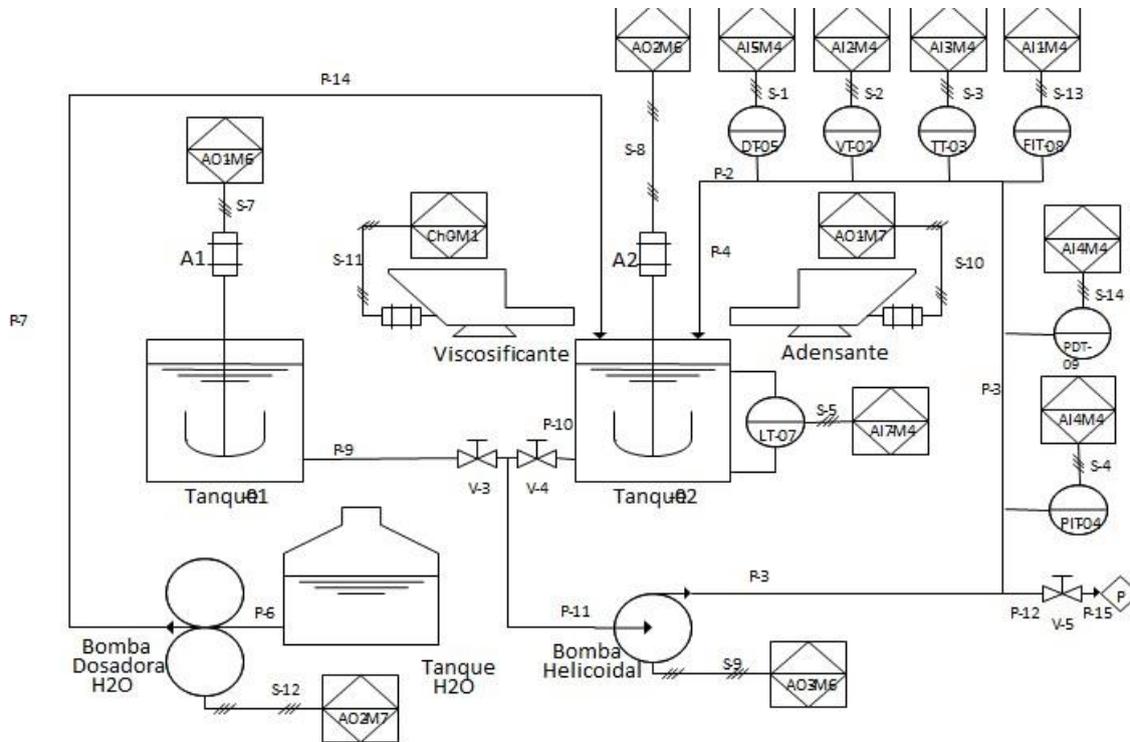


Figura 3.5: Diagrama de Processo da unidade experimental. Fonte: Própria.

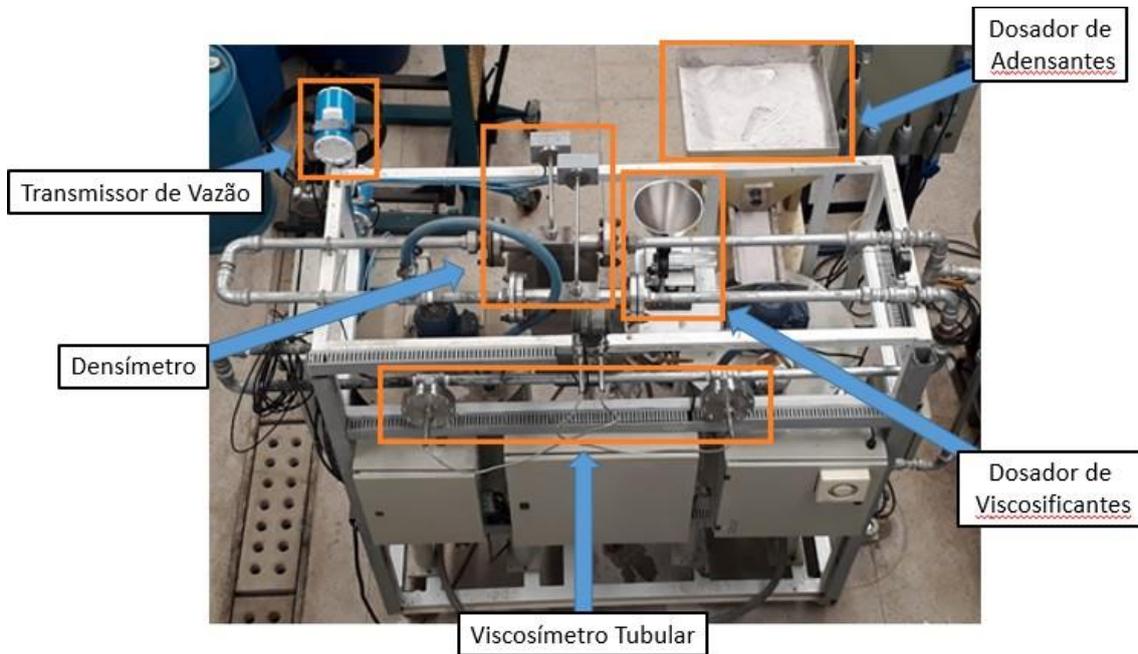


Figura 3.6: Diagrama PID da unidade experimental. Fonte: Própria.

Bomba helicoidal

A unidade experimental possui uma bomba helicoidal de deslocamento positivo, ilustrada na figura [3.7](#), fabricante Weatherford, motor Metalcorte, rotação 1700 rpm e potência 1,5 cv. Essa bomba foi responsável por circular o fluido no loop com o objetivo de permitir a medição da viscosidade e da densidade.



Figura 3.7: Bomda helicoidal de deslocamento positivo. Fonte: Rachid(2018).

Transdutor de pressão manométrica

No recalque da bomba helicoidal foi instalado um transdutor de pressão manométrica para a leitura da pressão na linha de recirculação. A leitura de pressão da unidade foi realizada com o transdutor de pressão manométrica da SMAR, modelo LD291, ilustrado na figura [3.8](#) com range de 9 a 360 psi. Os dados de pressão de recalque da linha foram coletados para fins de monitoramento.



Figura 3.8: Trasdutor de pressão manométrica SMAR. Fonte: Própria.

Medidor mássico

A leitura da densidade foi realizada por meio de um medidor mássico da Metroval, com saída analógica, modelo RHM20, instalado no loop de recirculação do fluido.

A leitura da densidade e da vazão foi realizada por dois instrumentos idênticos. A instalação de dois instrumentos para medição de densidade e vazão, se justificou pela limitação do instrumento de fornecer somente uma saída analógica de uma variável, ou densidade ou vazão (volumétrica / mássica). As medições destas variáveis foram feitas por meio de dois medidores mássicos da Metroval, com saída analógica, modelo RHM20, instalado no loop de recirculação do fluido e ilustrado na figura 3.9.



Figura 3.9: Transmissor indicador de densidade (DIT-05) e Vazão (FIT-08). Fonte: FER-RAZ(2019).

Tanque de mistura

O tanque de mistura utilizado para o preparo do fluido de perfuração (figura 3.10) possui volume máximo de 150L com duas entradas de 3/4” na parte superior. Uma para alimentação de água e a outra para o retorno do fluido que recircula, além de duas saídas de 1” na parte inferior do tanque, uma para a linha de sucção da bomba helicoidal e a outra para descarga manual no fundo do tanque, caso seja necessário. O tanque ainda possui uma janela no topo com dimensões 0,20m x 0,30m para a alimentação do sólido viscosificante e adensante do fluido.



Figura 3.10: Tanque de mistura. Fonte: RACHID(2018).

Acoplado ao tanque existe um agitador mecânico (figura 3.11) do fabricante Mixtura Equipamentos Hidráulicos Ltda., modelo MIX159L, motor Weg, potência 0,5 cv capaz de manter o fluido sob agitação de intensidade regulável a fim de favorecer a homogenização do fluido em preparo (RADICH, 2018)[10].



Figura 3.11: Agitador acoplado ao tanque de mistura. Fonte: RACHID(2018).

O sensor ultrassônico SIEMENS modelo Sitrans Probe LU 7ML5221-28A11, saída 4 a 20mA, fornece a informação de nível de tanque, conforme figura 3.12.



Figura 3.12: Sensor de Nível. Fonte: RACHID(2018).

Bomba dosadora

A alimentação da água no tanque para o preparo do fluido foi realizado por meio de uma bomba dosadora do tipo diafragma da marca Grabe (figura 3.13), motor Siemens com rotação de 1670 rpm e potência 0,5 cv oque se traduz em uma capacidade máxima de 1450 l/h, podendo ser controlado por meio de sinal analógico de 4 a 20mA.



Figura 3.13: Bomba de Dosagem GRAPE Fonte: RACHID(2018).

Dosador de adensantes

O dosador alimentador de sólidos mostrado na figura 3.14 foi o responsável pela dosagem de aditivos adensantes no tanque de mistura. Foi utilizado o dosador de sólidos do fabricante MVL Vibradores, tipo F.010, com capacidade de adicionar até 210 g/s ao fluido.



Figura 3.14: Bomba de Dosagem GRAPE Fonte: RACHID(2018).

Dosador de viscosificantes

Para a dosagem de aditivos viscosificantes no tanque de mistura foi utilizado o dosador de sólidos Retsch GmbH Tipo DR100 / 75 de acionamento digital, que pode ser visto na figura 3.15



Figura 3.15: dosador de sólidos Retsch GmbH Tipo DR100 / 75 de acionamento digital Fonte: Própria.

Sistema elétrico

A instalação elétrica utilizada por Ferraz (2019) [11] foi mantida e revisada, com alterações referentes à instalação do dosador de viscosificantes.

Equipamentos como a bomba dosadora de água, agitadores e a bomba helicoidal são acionados por conjuntos de contadoras, dispositivos de proteção, como relés térmicos e disjuntores e controlados por meio de inversores de frequência da marca WEG modelo CFWo8 por meio do envio de sinal analógico 4 a 20 mA. O dosador de sólido DO1 foi adicionado para ser utilizado para a adição de viscosificantes ao sistema, sendo acionado por um sinal digital proveniente do controlador.

O dosador de adensantes possui um circuito eletrônico de comando do próprio fabricante. Os quadros estão dispostos nos painéis ilustrados na figura 3.16.



Figura 3.16: Quadros de comando e força da unidade experimental (acima) e seus interiores (abaixo). Fonte: Adaptado de RACHID(2018).

Viscosímetro tubular

Como ferramenta para a medição da viscosidade efetiva, foi utilizado um viscosímetro tubular. A montagem física do viscosímetro é composta pela instalação de um sensor de vazão (FIT) e um sensor de pressão diferencial (PDT) entre dois pontos de uma tubulação linear dispostos a uma distância conhecida (L), que enviam dados on-line destas variáveis a placa de controle e aquisição de dados que calcula a viscosidade por meio de um algoritmo de cálculo no software LabVIEW. A figura 3.17 ilustra o diagrama PID do viscosímetro tubular instalado na unidade experimental.

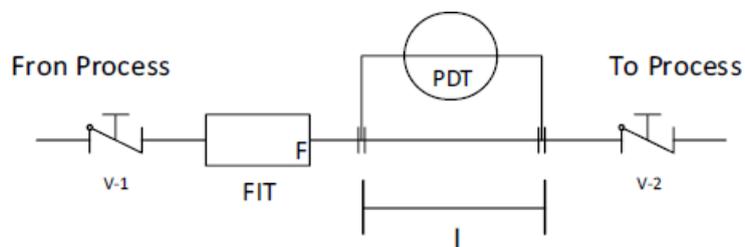


Figura 3.17: Viscosímetro tipo tubular. Fonte: FERRAZ(2019).



Figura 3.18: Arranjo físico viscosímetro tipo tubular. Fonte: Adaptado de FERRAZ(2019).

Segundo Ferraz (2019) [11], a viscosidade efetiva μ_{ef} pode ser determinada pela medição da vazão, e do diferencial de pressão entre dois pontos montados a uma distância L (3.17) em um trecho reto de tubulação.

$$\mu_{ef} = \frac{\pi * R^4}{8 * Q} * \frac{-\Delta P}{L}, \quad (3.1)$$

onde: μ_{ef} = Viscosidade efetiva, R = Raio da tubulação, Q = Vazão volumétrica, ΔP = Diferença de Pressão, L = Comprimento entre dois pontos de medição do sensor diferencial de pressão.

A equação citada acima foi integrada ao software de aquisição de dados programado em LabVIEW® para possibilitar medição da viscosidade efetiva a partir da leitura em tempo real da vazão e o diferencial de pressão em tempo real. Um ponto crítico para o bom funcionamento do viscosímetro tubular, é que o escoamento seja laminar. Para isto, utiliza-se o número de Reynolds para o dimensionamento do viscosímetro. Quando o fluido passa a ter um comportamento não-Newtoniano, o conceito do número de Reynolds mantém se, sendo a viscosidade dinâmica substituída pela viscosidade efetiva, neste caso o número de Reynolds recebe o complemento de generalizado (FERRAZ, 2019)[11]. A equação do número de Reynolds generalizado é

$$Re_G = \frac{\rho * v * D}{\mu_{ef}}, \quad (3.2)$$

onde: μ_{ef} = Viscosidade, v = Velocidade de escoamento do fluido, D = Diâmetro do tubo, Re_G = Diferença de Pressão, ρ = Densidade do Fluido.

Geralmente considera-se que o escoamento é laminar para a faixa de $0 < Re < 2300$ e turbulento para $Re > 4000$. Apesar desta consideração simplificada ser utilizável na maior parte das situações, sabe-se que o Reinalds da transição é determinado

em grande parte pelas condições na entrada do duto (entrada em canto vivo produz transição a partir de $Re= 2000$, enquanto entradas arredondadas e suaves podem produzir transição a partir de $Re=10.000$)(CENGEL, 2007)[29].

Conforme Magalhães (2017) [30], a Tensão de cisalhamento nas paredes da tubulação em sentido radial pode ser definida por

$$\tau(r) = \frac{\Delta P * R}{2 * L}. \quad (3.3)$$

A partir das equações apresentadas torna-se possível calcular a taxa de deformação utilizando

$$\gamma(r) = \frac{\tau(r)}{\mu_e f}. \quad (3.4)$$

A escolha da vazão a ser adotada durante os testes foi feita baseada na análise do número de reynalds, afim de garantir o escoamento do fluido sob regime laminar, a range de operação definida de 1,1 a 1,2 g/cm^3 e 10 a 30 cP foi testada a partir da equação de Reynalds modificada para a vazão

$$Re = \frac{4\rho Q}{\pi\mu D}, \quad (3.5)$$

foi obtida a faixa de trabalho de 765 a 1531 reynalds

Aferição do viscosímetro tubular

A aferição do viscosímetro on-line (tubular) foi realizada por Ferraz (2019)[11] comparando-se os valores da viscosidade efetiva medidos via software LabVIEW ® com os valores encontrados pelo uso do viscosímetro Fann 35A. A figura 3.19 ilustra o gráfico de comparação entre os viscosímetros.

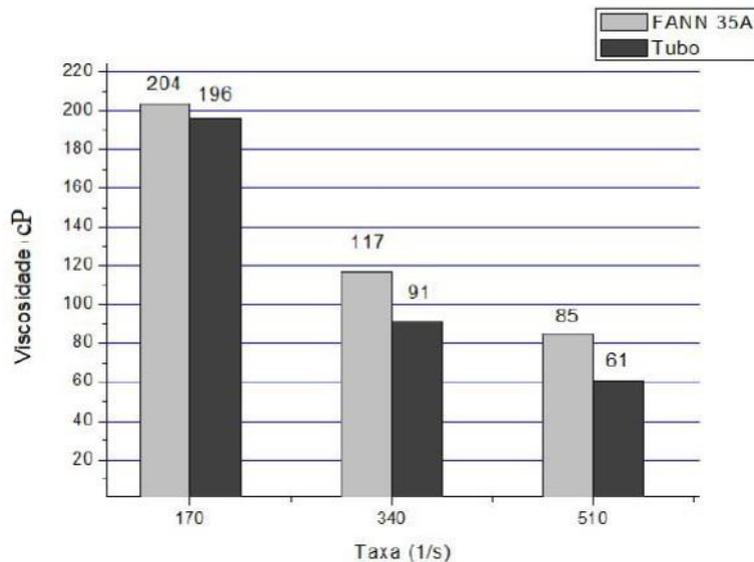


Figura 3.19: Comparação entre viscosímetros on-line e de bancada Fann 35A. Fonte: FERRAZ(2019).

Conforme a variação positiva da taxa de escoamento, as medidas comparadas vão se distanciando, isso porque o viscosímetro foi projetado para trabalhar no escoamento laminar, e aumentar a taxa de escoamento significa que a vazão aumentou na mesma proporção, assim como o número de Reynolds.

3.3 Testes com viscosímetro coaxial

Como alternativa para o viscosímetro tubular, foi utilizado um viscosímetro de cilindro coaxial, um equipamento que funciona por meio da medida da tensão cisalhante do fluido com base na taxa de cisalhamento. O equipamento foi instalado em linha, fornecendo uma leitura em tempo real, operando na taxa de 511 s^{-1} .



Figura 3.20: Viscosímetro co axial.

Controle e aquisição de dados

O Sistema de controle e aquisição de dados foi projetado tendo como base hardware da National Instruments Cdaq9188xt, demonstrado na figura 3.21, que é um sistema modular de aquisição de dados a partir do acoplamento de diversas opções de placas, para diferentes funções. No chassi foram instaladas:

- placa de entrada analógica, utilizadas para receber o sinal de 4 a 20mA, proveniente dos transdutores presentes na unidade;
- Placa de saída analógica, mostrada na figura 3.22 enviam um sinal de 4 a 20 mA para diversos atuadores presentes na unidade, como para regular a rotação da bomba helicoidal ou dos agitadores;
- Placa de saída digital, enviam um sinal on/off atuando no acionamento de contadoras utilizadas para o controle do dosador de viscosificantes digital.



Figura 3.21: Chassis de aquisição de dados e controle CDAQ 9188XT. . Fonte: Manual do Fabricante.



Figura 3.22: Módulo de saída de corrente da Série C. Fonte: Manual do Fabricante.

3.3.1 Interface homem máquina

Para a operação da unidade de preparo de fluidos foi desenvolvido um algoritmo e software baseados em linguagem LabVIEW. Foi escolhida uma arquitetura modular por apresentar maior robustez, versatilidade e apresentar um uso mais eficiente de processamento para a operação da unidade. Para este trabalho, foram desenvolvidos três módulos apresentados a seguir, porém novos módulos podem ser desenvolvidos facilmente caso novas demandas venham a surgir, sem a necessidade de alteração no software já existente.

Modulo principal

O módulo principal, cuja tela de operação é mostrada na figura [3.23](#), é responsável por fazer a comunicação com o chassi 9188XT, conseqüentemente a instrumentação presentes na unidade, coletando leituras online, tratando dados e aplicando o equacionamento necessário. Os dados de interesse são exibidos para o operador durante o teste, porém todas as variáveis são salvas para análises posteriores. O módulo principal também é responsável por selecionar e gerenciar os demais módulos evitando assim, conflitos e garantindo que o poder de processamento seja direcionado apenas para as funções que são de interesse para o processo atual.

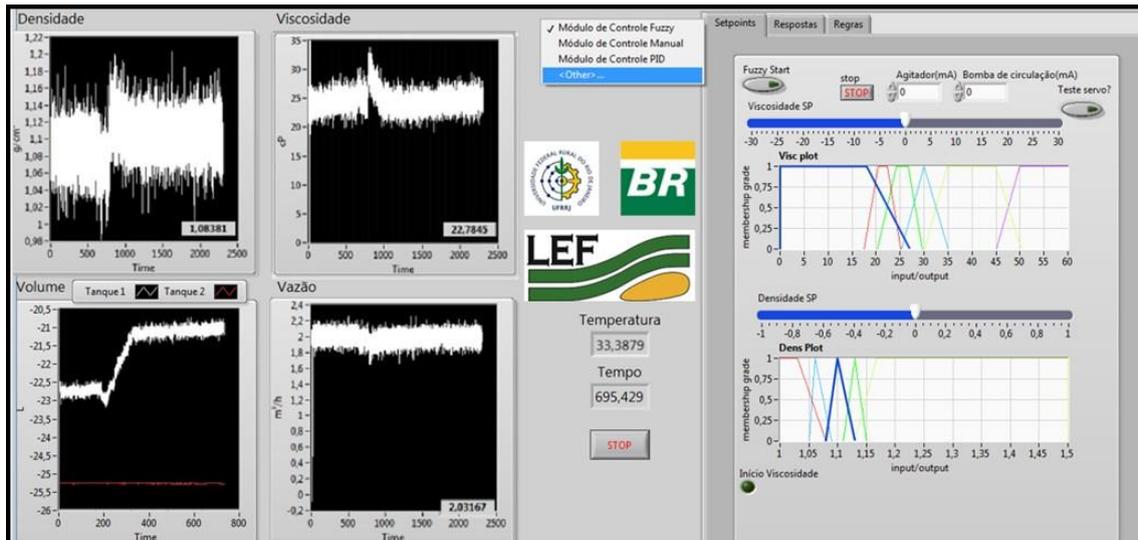


Figura 3.23: IHM programada em Labview versão 2.0 modular. Fonte: Própria.

Módulo de controle manual

Com o desenvolvimento da unidade, foi percebida a necessidade de acionar os atuadores de forma manual para efetuar testes de hardware ou mesmo limpeza dos tanques, a fim de suprir tal demanda, o módulo de controle manual foi desenvolvido, com as funcionalidades de enviar manualmente um sinal de 4 a 20mA para cada atuador e um controle de nível que desliga a bomba de dosagem para impedir que o tanque transborde e desligue a bomba de circulação para parar a purga de fluido caso o nível esteja muito baixo evitando assim, a entrada de ar no sistema. Sua IHM pode ser vista na figura [3.25](#)

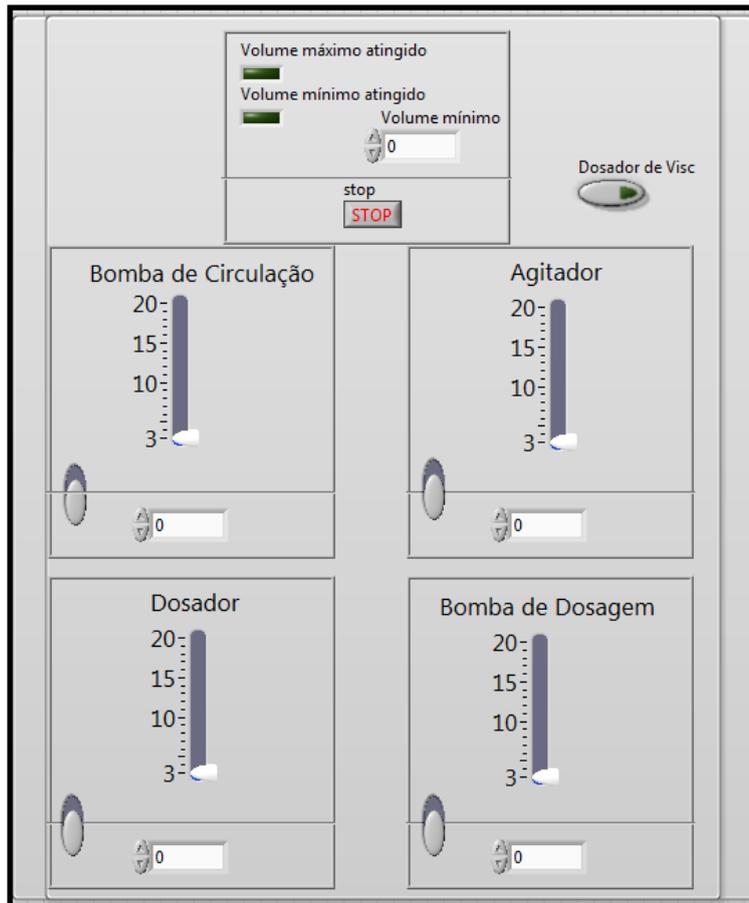


Figura 3.24: Módulo de controle manual. Fonte: Própria.

Módulo de controle fuzzy

Todas as informações referentes ao controlador fuzzy foram concentrados em um módulo próprio, dividido em três abas: a da esquerda mostra para o operador quais funções de pertinência estão sendo acionadas e em qual intensidade, a aba central reúne os controles de setpoint e visualização de todas as funções de pertinência de cada variável controlada. Já a aba da direita mostra o gráfico da atuação do controlador fuzzy sobre cada variável manipulada.

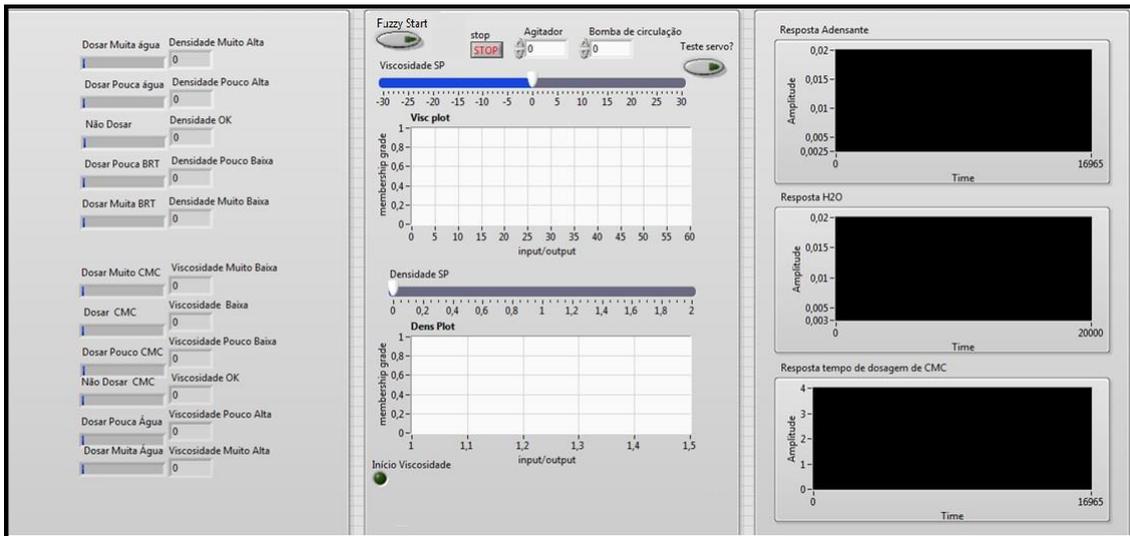


Figura 3.25: Módulo de controle fuzzy. Fonte: Própria.

Modulo de controle PID

O módulo de controle PID surgiu da intenção de testar as capacidades da unidade de preparo de fluidos atuando sob outro tipo de controle, como pode ser visto na figura 3.26 a janela representada a esquerda reúne todos os controles referentes ao controlador PID, incluindo seleção de setpoint e parâmetros de sintonia para cada variável manipulada.

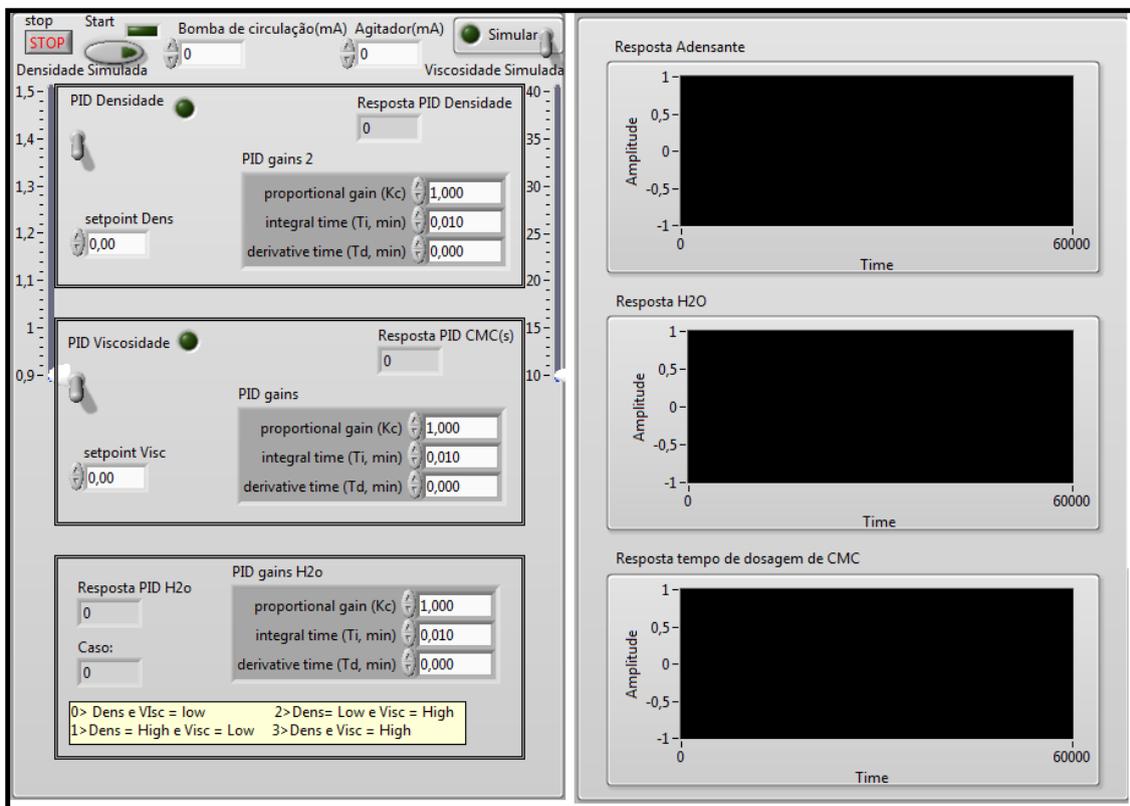


Figura 3.26: Módulo de controle PID. Fonte: Própria.

3.4 Caracterização dos aditivos utilizados

Segundo Shaw & Simões (2007) [21], o conhecimento matemático necessário para o desenvolvimento de um controlador fuzzy não é tão complexo como pode parecer a primeira vista, porém um conhecimento profundo de como imprecisões e incertezas ocorrem no processo faz-se necessário.

A fim de desenvolver o controlador fuzzy de forma adequada, foram planejados uma série de testes de bancada para adquirir dados sobre o comportamento das variáveis de interesse em diversas situações. Para tal foram utilizados o viscosímetro FANN 35A, figura 3.27, em conjunto com a balança de lama demonstrada na figura 3.28 de mesma marca, ambos largamente utilizados na indústria (MAGALHÃES, 2015) [17]



Figura 3.27: Viscosímetro FANN35A. Fonte: Manual do Fabricante.

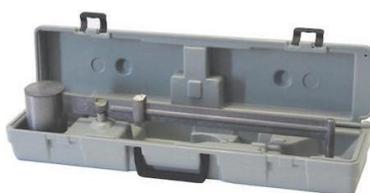


Figura 3.28: Balança de Lama. Fonte: Manual do Fabricante.

Testes de hidratação

Uma das características relevantes do sistema a ser analisada para o desenvolvimento do controlador fuzzy foi o tempo morto, ou seja, o intervalo de tempo após a aplicação de perturbação onde nenhuma resposta é observada. Há um tempo morto físico característico da unidade de preparo de fluidos que provém da distância entre o ponto de dosagem e diluição de aditivos e o ponto onde os sensores estão posicionados, que com a vazão estável pode ser considerado constante. Outra fonte a ser levada em consideração é a hidratação do viscosificante em uso, que poderia gerar

um aumento de viscosidade retardado, interferindo com o controle e a estabilidade do sistema.

Foram realizados testes com três concentrações de CMC em 300 mL água, que foram submetidas a 15000 rpm de agitação para garantir a homogeneização do fluido por 10 minutos. Em seguida utilizando o viscosímetro FANN nas velocidades de 300 e 600 RPM aos 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 140 minutos de hidratação com a finalidade de averiguar como a viscosidade se comporta ao longo do tempo. Os resultados encontrados são apresentados na figura 3.29

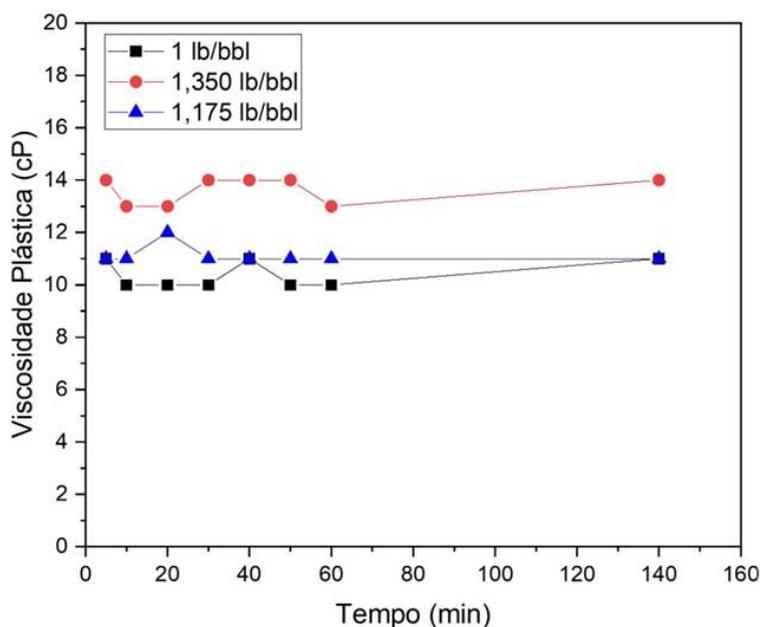


Figura 3.29: Variação da viscosidade ao longo do tempo em três concentrações distintas. Fonte: Própria.

Os resultados obtidos não mostraram uma variação de viscosidade significativa no tempo de análise, indicando que a maior parte do incremento de viscosidade acontece no momento da homogeneização.

Testes de interação barita x CMC

Para efetuar o controle da densidade e viscosidade simultaneamente e em tempo real, foi necessário saber se a adição de adensante iria influenciar a viscosidade e se a adição de viscosificante irá influenciar a densidade. Para tal, foi feito um planejamento experimental fatorial composto por cinco níveis e duas variáveis, mais dois testes no ponto central, como mostrado na tabela 3.1 totalizando 27 testes. O procedimento experimental está descrito na figura 3.30.

Tabela 3.1: Níveis utilizados no planejamento experimental.

Níveis	-2	-1	0	+1	+2
barita	0	28,3	61,8	101,6	150
CMC	0	0,5	1	1,5	2

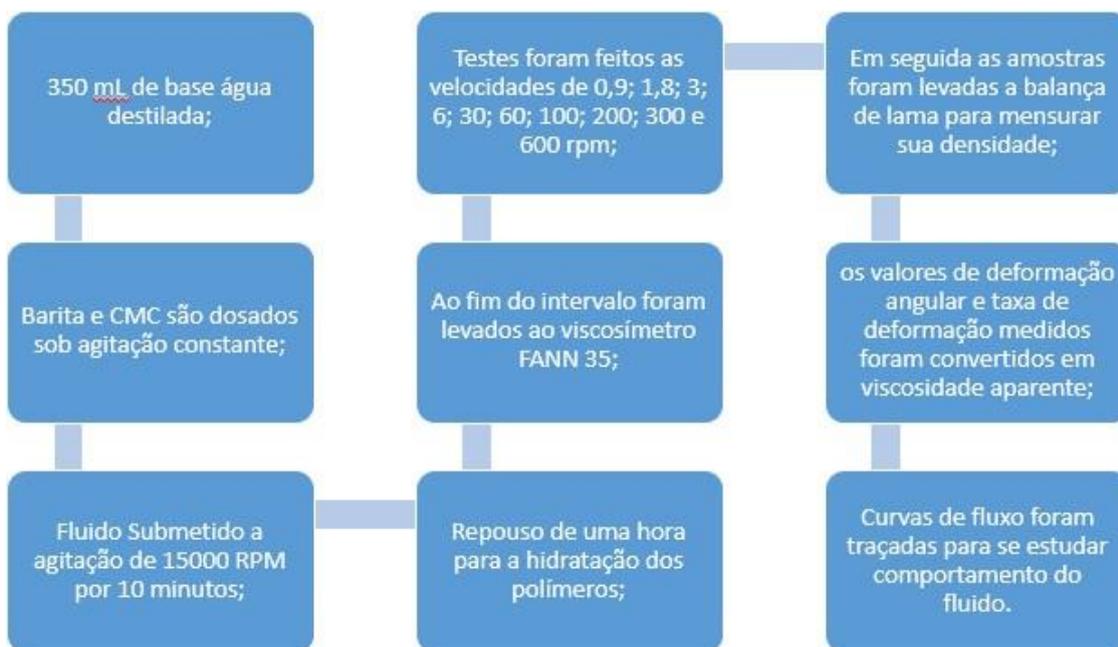


Figura 3.30: Procedimento experimental para os testes de bancada de interação entre barita e CMC Fonte: Própria.

O resultado obtido com o conjunto de testes pode ser visto na figura [3.30](#).

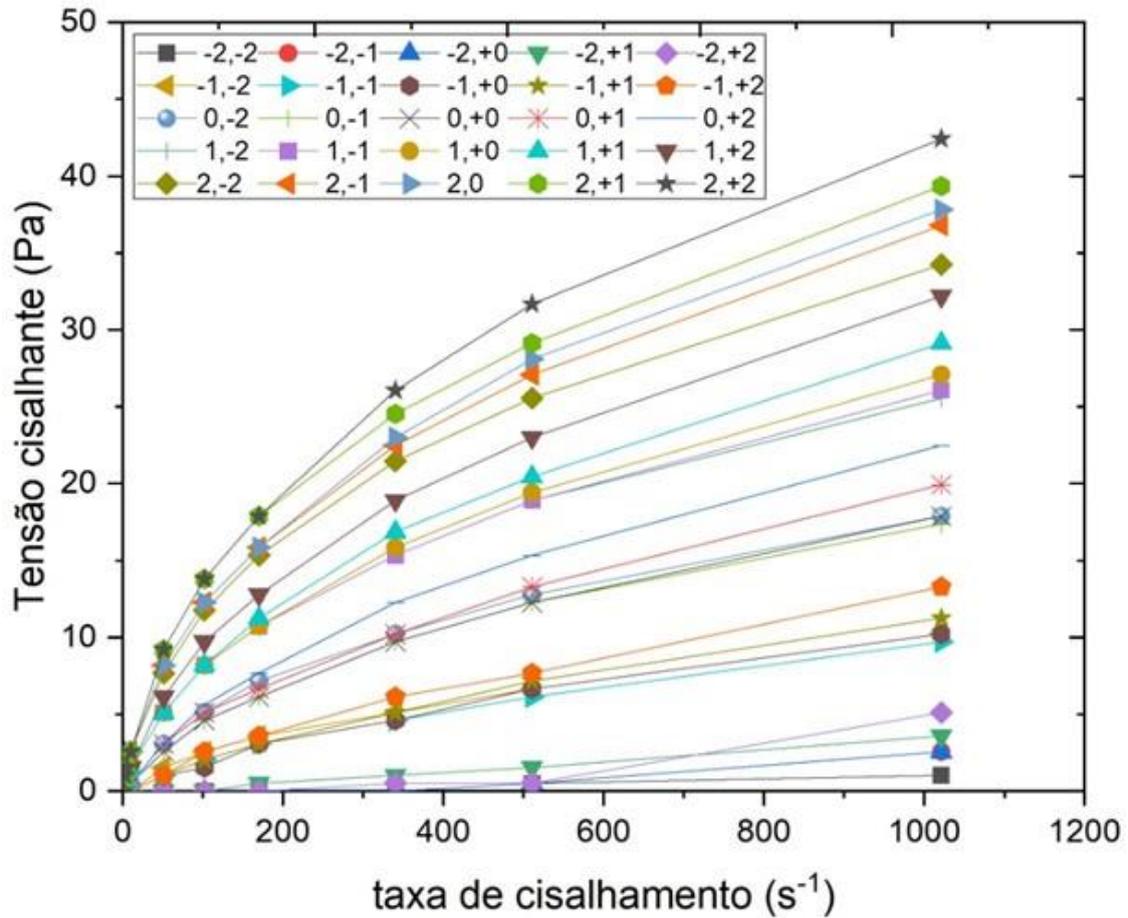


Figura 3.31: Tensão cisalhante em função da taxa de cisalhamento para suspensões de CMC e barita a pressão de 1 atm e temperatura de 25 C° Fonte: Própria.

A curva de fluxo indicou que a presença de adensante tende a aumentar a viscosidade do fluido consideravelmente, esse efeito pode ser isolado e analisado melhor na figura [3.32](#).

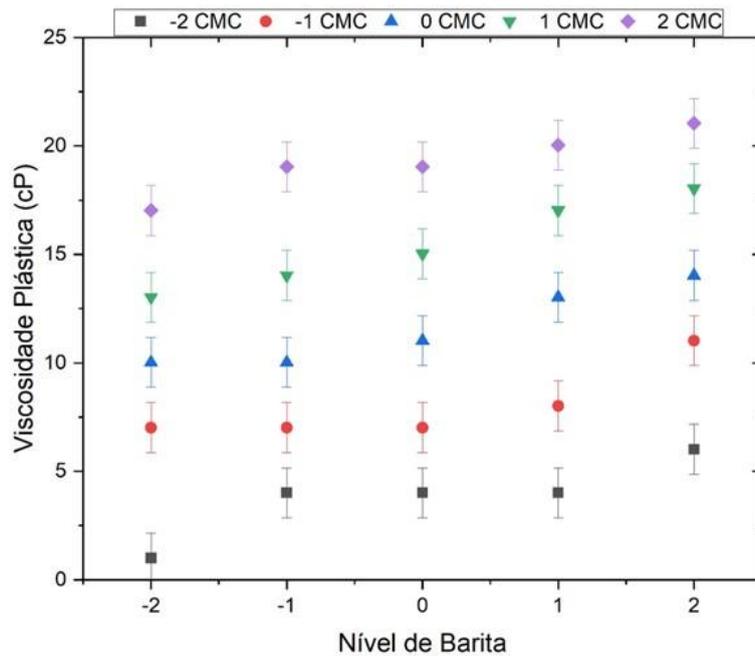


Figura 3.32: Variação da viscosidade plástica em função do nível de concentração de barita para diferentes concentrações de CMC a pressão de 1 atm e temperatura de 25 C° Fonte: Própria.

A mesma análise foi feita em relação a influência do CMC na densidade do fluido, porém o resultado foi que há menos impacto, como pode ser visto na figura [3.33](#). Foi considerado que não seria um problema para o desenvolvimento do controlador fuzzy, pois a quantidade utilizada em cada teste não seria suficiente para trazer mudanças significativas de densidade.

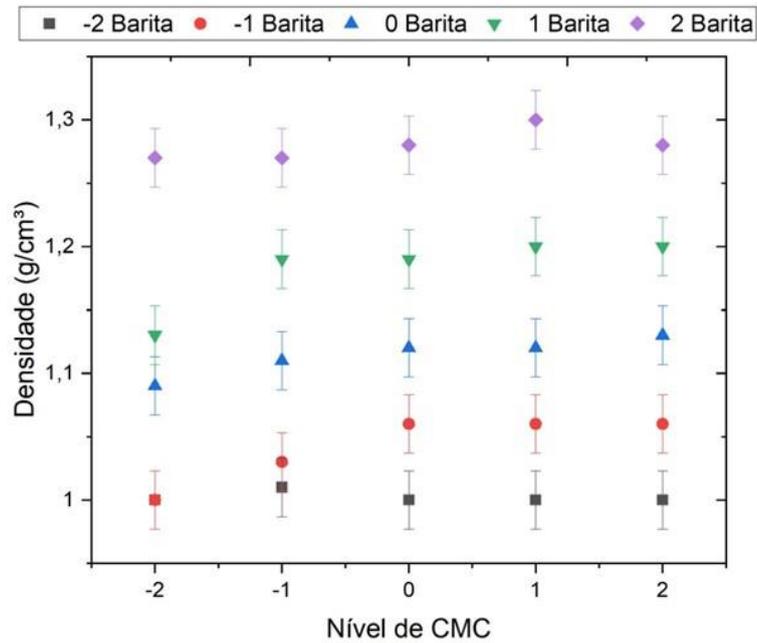


Figura 3.33: Variação de densidade em função do nível de concentração de CMC para diferentes concentrações de barita a pressão de 1 atm e temperatura de 25 C° Fonte: Própria.

A figura 3.34 apresenta uma visão geral da variação de densidade proveniente do CMC em cada nível de concentração de barita.

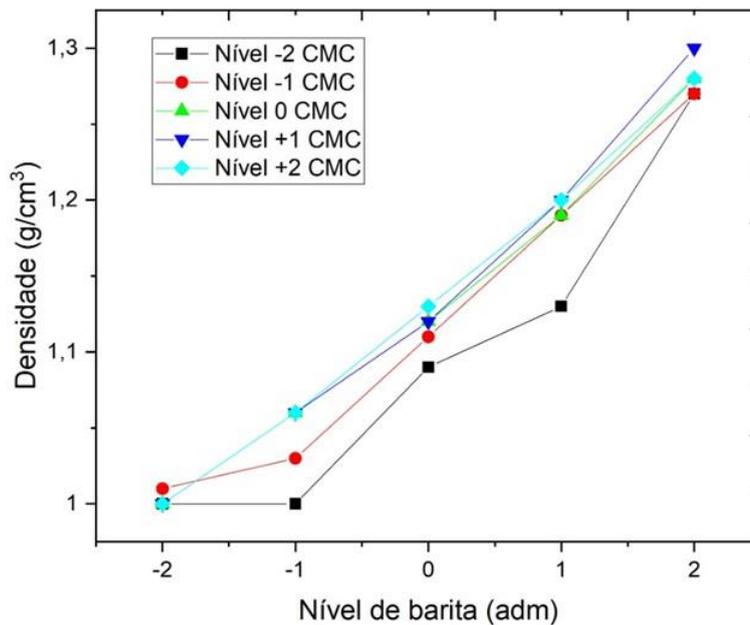


Figura 3.34: Variação de densidade em função do nível de concentração de barita para diferentes concentrações de CMC a pressão de 1 atm e temperatura de 25 C° Fonte: Própria.

Comparação entre barita e calcita

A próxima etapa foi analisar o efeito dos aditivos utilizados. Como base o teste feito com barita foi repetido, seguindo o mesmo planejamento experimental porém utilizando calcita ao invés de barita como mostrado na tabela 3.2. O resultado encontrado pode ser visto na figura 3.35

Tabela 3.2: Níveis utilizados no planejamento experimental com calcita.

Níveis	-2	-1	0	+1	+2
calcita	0	28,3	61,8	101,6	150
CMC	0	0,5	1	1,5	2

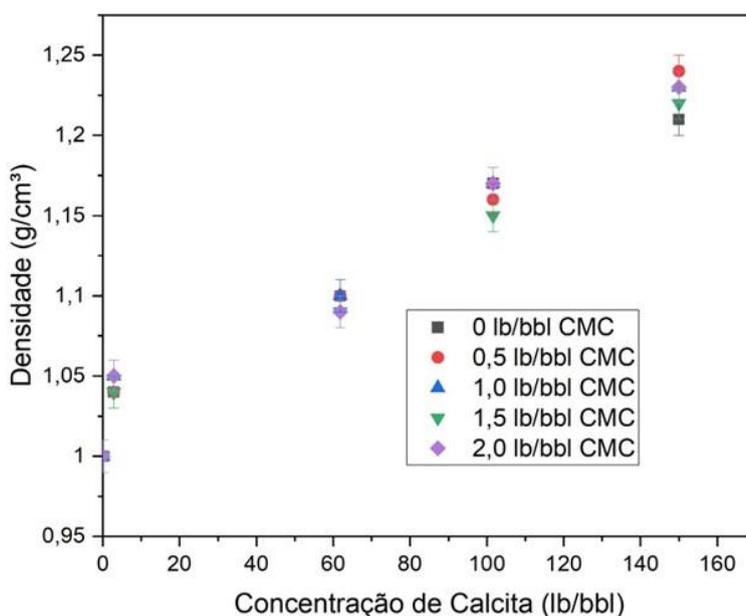


Figura 3.35: Variação de densidade em função do nível de concentração de Calcita para diferentes concentrações de CMC a pressão de 1 atm e temperatura de 25 °C. Fonte: Própria.

Os testes feitos com calcita mostraram uma menor variação da densidade em função da concentração de CMC em relação a figura 3.35.

O efeito da calcita de interferência na viscosidade pode ser visto na figura 3.36, onde a calcita apresentou um ganho de viscosidade maior que o da barita. Como pode ser visto na figura 3.32 chegando a 25 cP na maior concentração contra 21cP da barita.

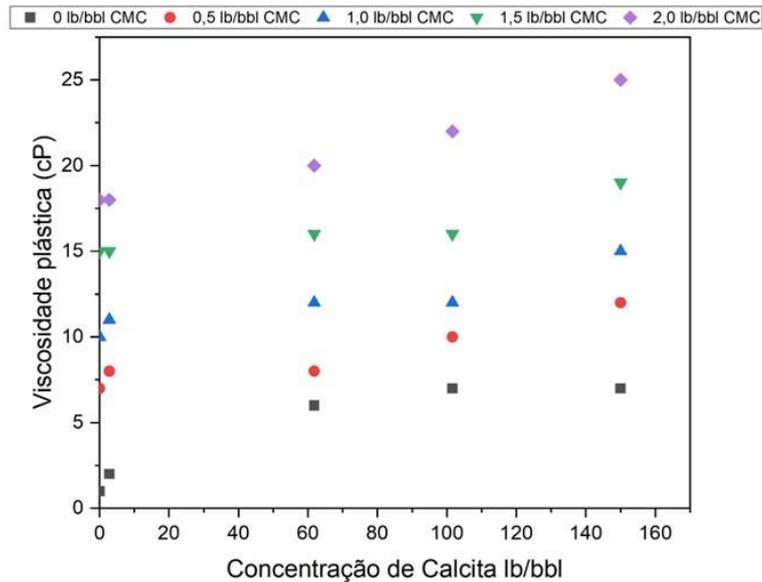


Figura 3.36: Variação de viscosidade plástica em função do nível de concentração de calcita para diferentes concentrações de CMC a pressão de 1 atm e temperatura de 25 C° Fonte: Própria.

3.5 Modelagem e controle fuzzy

Nesta seção é apresentada a estratégia de controle utilizada no experimento, a metodologia empregada para projetar os controladores fuzzy, assim como suas funções de pertinência de entrada e saída, base de regras e inferências utilizadas no desenvolvimento do controlador fuzzy da unidade de preparo de fluidos e a sua superfície de controle simulada.

3.5.1 Estratégia de controle

O foco deste trabalho foi avaliar o desempenho de um controlador fuzzy no controle simultâneo da densidade e viscosidade de fluidos de perfuração em tempo real. Como viscosificante foi utilizado CMC (ou carboximetilcelulose), que é um polímero linear aniônico, usado como agente viscosificante e redutor de filtrado em fluidos de perfuração, que quando misturado em água passa pelo processo de hidratação.

A concentração e estrutura molecular do polímero, o grau total de substituição, a massa molar, a temperatura, o teor de sal, o pH e a presença de surfactantes tem um efeito considerável sobre as propriedades reológicas de soluções de CMC, segundo Ferraz (2019) [11].

O material principal utilizado como sólido adensante foi a barita ou baritina ($BaSO_4$), que teve suas propriedades estudadas por Radich (2018) [10] apresentando o valor médio da densidade de $3,81 (g/cm^3)$. A figura 3.37 apresenta a distribuição granulométrica.

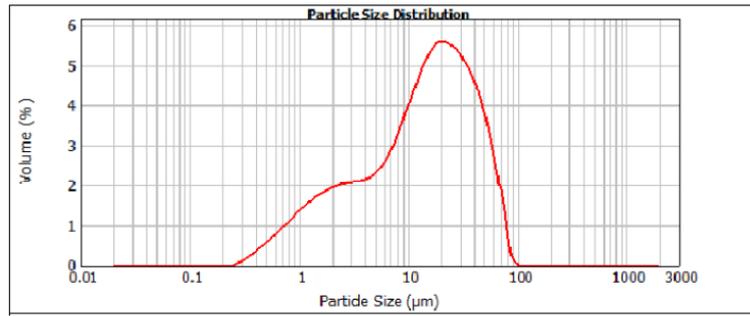


Figura 3.37: Efeito da adição de calcita na viscosidade.

A estratégia de controle adotada baseou-se em um controlador fuzzy proporcional que tem como variáveis de entrada o valor online da densidade e viscosidade. O sinal de saída é a taxa de dosagem de adensante, viscosificante ou água. A estrutura do controlador fuzzy é mostrada na figura 3.38

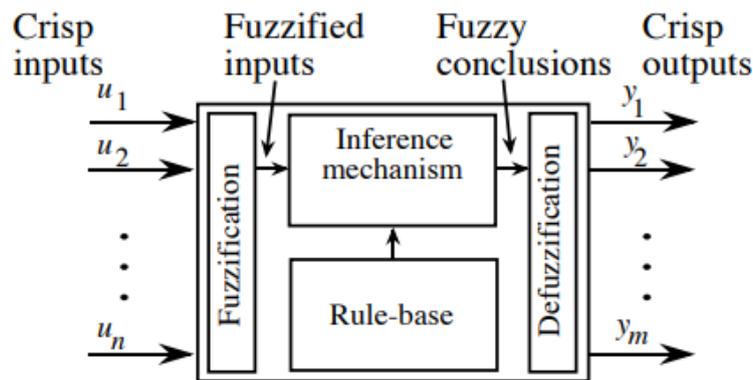


Figura 3.38: Estrutura de cálculo do controlador fuzzy. Fonte:(PASSINO, K. M.; YURKOVICH, S , 1998).

3.5.2 Modelagem do sistema por meio de lógica fuzzy

Para a aplicação do controle fuzzy no preparo do fluido de perfuração definiu-se como variável controlada a densidade do fluido (ρ) e a Viscosidade (μ) como variáveis manipuladas as massas adicionadas de barita (kg), CMC (Kg) e de água (kg). Os universos de discurso considerados para essas variáveis foram:

- $1, 0 \leq (\rho) \leq 1, 3$ para densidade;
- $0 \leq (\mu) \leq 30cP$ para viscosidade;

Em relação as variáveis de saída:

- $0, 003 \leq \text{Taxa de dosagem de barita} \leq 0, 02$;
- $0, 003 \leq \text{Taxa de dosagem de água} \leq 0, 02$;

- $0 \leq \text{Taxa de dosagem de CMC} \leq 10$.

Estes valores foram determinados a partir do conhecimento prévio de simulações e testes de bancada.

Para auxiliar a determinar as escalas de possíveis quantidades de barita e água na mistura, além de correções necessárias, o equacionamento a seguir foi utilizado no desenvolvimento da base de conhecimento do controlador.

Assumindo a mistura binária entre água e barita como ideal, desconsiderando a densidade do CMC adicionado e partindo da definição de densidade

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.6)$$

onde ρ é a densidade, m a massa e V o volume. Estendendo a equação para a mistura

$$\rho_f = \frac{MB + MA}{V_t}, \quad (3.7)$$

onde ρ_f é a densidade do fluido, MB a massa de barita e MA a massa de água, V_t o volume total. Baseado no conhecimento obtido por meio dos testes de bancada foi possível assumir que a massa de CMC adicionada durante o teste pode ser desconsiderada para o controlador.

Então o volume total pode ser considerado em

$$V_t = V_b + V_a. \quad (3.8)$$

O volume de barita adicionado é caracterizado por

$$V_b = \frac{MB}{\rho_b}, \quad (3.9)$$

onde ρ_b representa a densidade da barita. Enquanto o volume de água pode ser representado por

$$V_a = \frac{MA}{\rho_a}, \quad (3.10)$$

onde ρ_a representa a densidade da água. Substituindo:

$$V_t = \frac{MB}{\rho_b} + \frac{MA}{\rho_a} \quad (3.11)$$

e

$$\rho_f = \frac{MB + MA}{\frac{MB}{\rho_b} + \frac{MA}{\rho_a}}, \quad (3.12)$$

o que possibilita estimar quantidades de barita e água na mistura, e as suas quantidades necessárias para um determinado setpoint alvo contribuindo para o desing de funções de pertinência para a dosagem de material.

3.5.3 Funções de pertinência

A implementação do controlador fuzzy foi feita por meio da ferramenta fuzzy System Design, demonstrada na figura 3.39, presente no software LabVIEW [®] que consiste em três partes principais: variáveis linguísticas, funções de pertinência e base de regras.

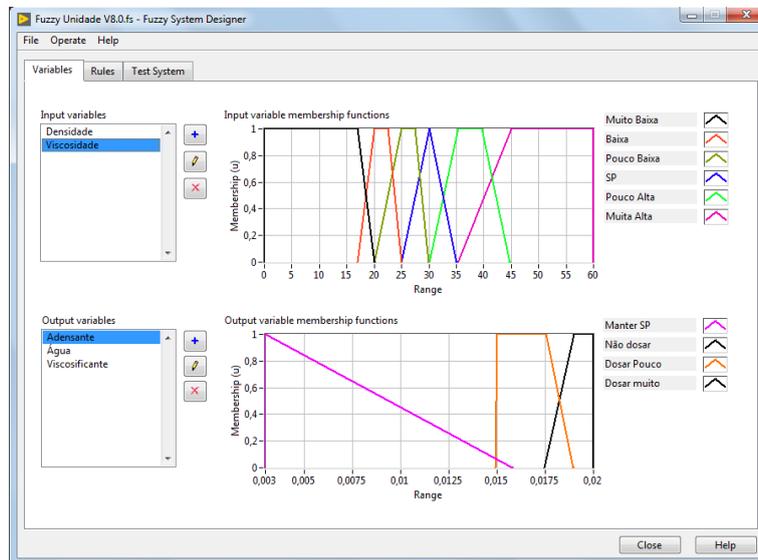


Figura 3.39: Interface de programação do controlador fuzzy. Fonte:(Própria).

Funções de pertinência de entrada

O controlador fuzzy em questão tem como entrada a densidade e a viscosidade como variáveis linguísticas que são representadas por cinco e sete funções de pertinência, respectivamente, que são representadas nas figuras 3.40 e 3.41.

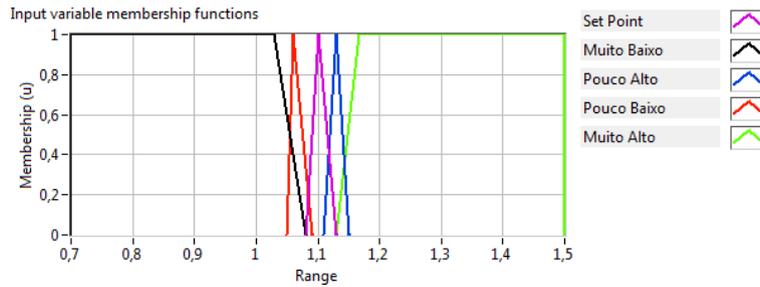


Figura 3.40: Funções de pertinência de entrada para densidade. Fonte:(Própria).

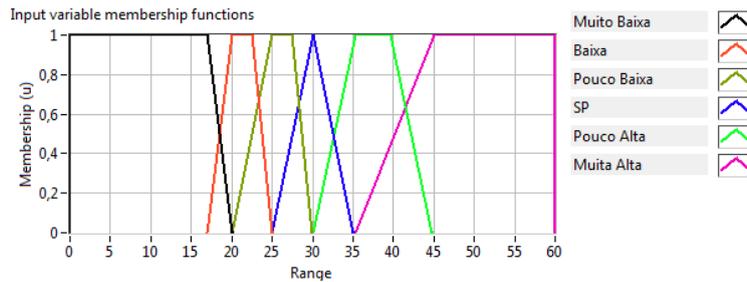


Figura 3.41: Funções de pertinência de entrada para viscosidade. Fonte:(Própria).

Os rótulos linguísticos atribuídos às funções de pertinências das variáveis de entrada de densidade estão descritas na Tabela 3.3 e foram: Setpoint, Muito Baixo, Pouco Alto, Pouco Baixo e Muito Alto. Enquanto para viscosidade foi acrescentado o rótulo intermediário Baixo, devido a necessidade de uma dosagem mais controlada de CMC a fim de evitar overshoots de viscosidade, conforme mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.3: Variáveis fuzzy de entrada do Controlador.

Variável	Função de Pertinência	Tipo	Parâmetros
Densidade	Set Point	Triangular	[1,08; 1,1; 1,13]
	Muito Baixo	Trapezoidal	[0,7; 0,7; 1,03; 1,08]
	Pouco Alto	Triangular	[1,11; 1,13; 1,15]
	Pouco Baixo	Triangular	[1,05; 1,06; 1,09]
	Muito Alto	Trapezoidal	[1,13; 1,17; 1,5; 1,5]

Tabela 3.4: Variáveis fuzzy de entrada do controlador.

Variável	Função de Pertinência	Tipo	Parâmetros
Viscosidade	Muito Baixa	Trapezoidal	[0; 0; 16; 20]
	Baixa	Trapezoidal	[17; 20; 22,5; 25]
	Pouco Baixa	Trapezoidal	[20; 25; ,27,5;29,9]
	SP	Triangular	[25; 30; 35]
	Pouco Alta	Trapezoidal	[30,1; 35,25; 40; 45]
	Muito Alta	Trapezoidal	[35; 45; 60; 60]

Esses rótulos permitem inferir 30 (trinta) regras fuzzy, utilizando um sistema de inferência do tipo Mamdani.

Funções de pertinência de saída

A tabela 3.5 traz uma visão geral das variáveis de saída do controlador para a dosagem de Adensante, viscosificante ou água, assim como suas escalas.

Tabela 3.5: Variáveis fuzzy de saída do controlador fuzzy.

Variável de Saída	Escala	Número de Funções de Pertinência
Adensante	0,003 mA a 0,020 mA	4
Viscosificante	0s a 10s	6
Água	0,003 mA a 0,020 mA	4

As funções de pertinência de saída de adensantes representadas pela figura 3.42 têm seus pontos detalhados na tabela 3.42 e resultam em um sinal de corrente analógico que é enviado diretamente para o dosador de adensantes analógico.

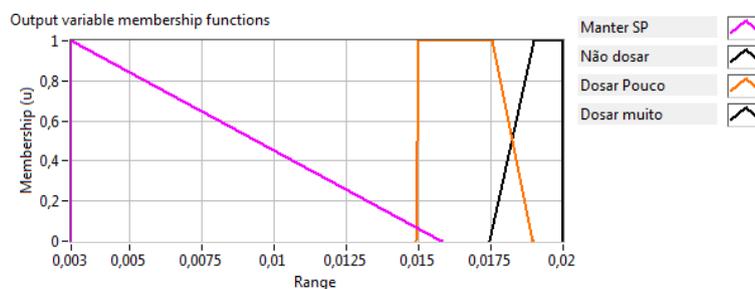


Figura 3.42: Funções de pertinência de saída para a dosagem de adensantes. Fonte:(Própria).

já as funções de pertinência para a dosagem de CMC foram desenvolvidas tendo como elemento de controle final o dosador de sólidos com acionamento digital, que tem como principal característica seu acionamento On/OFF, que não permite um controle de intensidade assim como o dosador utilizado para adensantes. A estratégia utilizada foi que a função de pertinência gera uma resposta de 0 a 10 que representa a largura do pulso dentro de um período total de 10. Quanto maior a necessidade de viscosificante identificada pelo controlador, maior será o período de tempo adicionando CMC.

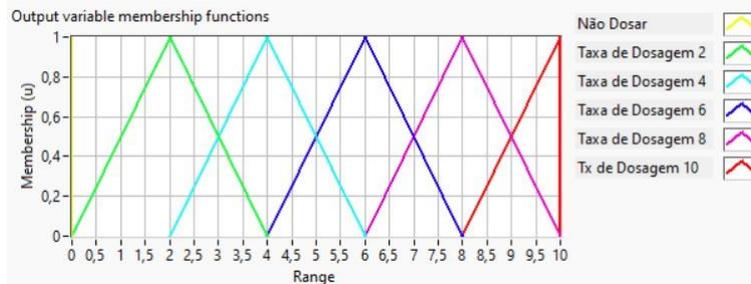


Figura 3.43: Funções de pertinência de saída para a dosagem de CMC. Fonte:(Própria).

A função de pertinência de saída para a dosagem de água, mostrada na figura 3.44, funciona de forma semelhante a de adensante, onde um sinal de saída de 3 a 20 mA é gerado e controla a bomba de dosagem que dilui o fluido a fim de reduzir a densidade e a viscosidade.

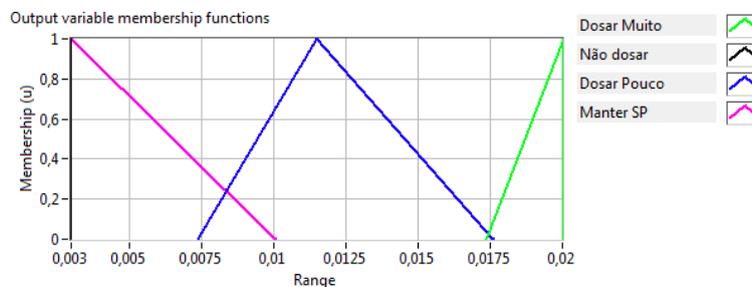


Figura 3.44: Funções de pertinência de saída para a dosagem de água. Fonte:(Própria).

3.5.4 Regras de inferência fuzzy

A base de regras funciona a partir da lógica das implicações, como por exemplo: SE <condição> então <consequência>. É a partir da base de regras é definida a lógica de operação do equipamento, dando a ele a capacidade de “raciocínio”, a fim de se obter ações de saída de controle sobre as variáveis manipuladas, assim como o operador humano.

A matriz de regras do controlador fuzzy, mostrada na figura 3.45, foi concebida a partir do conhecimento do hardware utilizado e dos testes de bancada depois aprimoradas com diversos testes na unidade de preparo de fluidos.

Dens \ Visc	Muito Baixa	Pouco Baixa	Set Point	Pouco Alto	Muito Alto
Muito Baixa	Dosar Muito Adensante Dosar lvl 8 de Viscosificante	Dosar Pouco Adensante Dosar lvl 8 de Viscosificante	Não Dosar Dosar lvl 10 de Viscosificante	Dosar Pouca Água Dosar lvl 10 de Viscosificante	Dosar Muita Água Dosar lvl 10 de Viscosificante
Baixa	Dosar Muito Adensante Dosar lvl 4 de Viscosificante	Dosar Pouco Adensante Dosar lvl 4 de Viscosificante	Não Dosar Dosar lvl 6 de Viscosificante	Dosar Pouca Água Dosar lvl 6 de Viscosificante	Dosar Muita Água Dosar lvl 6 de Viscosificante
Pouco Baixa	Dosar Muito Adensante Dosar lvl 2 de Viscosificante	Dosar Pouco Adensante Dosar lvl 2 de Viscosificante	Não Dosar Dosar lvl 2 de Viscosificante	Dosar Pouca Água Dosar lvl 4 de Viscosificante	Dosar Muita Água Dosar lvl 4 de Viscosificante
Set Point	Dosar Muito Adensante Não Dosar Viscosificante	Dosar Pouco Adensante Não Dosar Viscosificante	Não Dosar Não Dosar Viscosificante	Dosar Pouca Água Não Dosar Viscosificante	Dosar Muita Água Não Dosar Viscosificante
Pouco Alta	Dosar Muito Adensante Dosar Pouca Água	Dosar Pouco Adensante Dosar Pouca Água	Não Dosar Dosar Pouca Água	Dosar Pouca Água Dosar Pouca Água	Dosar Muita Água Dosar Pouca Água
Muito Alta	Dosar Muito Adensante Dosar Muita Água	Dosar Pouco Adensante Dosar Muita Água	Não Dosar Dosar Muita Água	Dosar Pouca Água Dosar Muita Água	Dosar Muita Água Dosar Muita Água

Figura 3.45: Matriz de regras fuzzy para o controle de densidade e viscosidade.
Fonte:(Própria).

As 30 regras derivadas dessa base de conhecimento estão listadas abaixo:

1. **SE** a Densidade for "Muito Baixa "e a Viscosidade for "Muito Baixa "**Então** "Dosar Muito Adensante"**e** "Dosar lvl 8 de Viscosificante"
2. **SE** a Densidade for "Muito Baixa "e a Viscosidade for "Baixa "**Então** "Dosar Muito Adensante"**e** "Dosar lvl 4 de Viscosificante"
3. **SE** a Densidade for "Muito Baixa "e a Viscosidade for "Pouco Baixa "**Então** "Dosar Muito Adensante"**e** "Dosar lvl 2 de Viscosificante"
4. **SE** a Densidade for "Muito Baixa "e a Viscosidade for "Set Point "**Então** "Dosar Muito Adensante"**e** "Não dosar Viscosificante"
5. **SE** a Densidade for "Muito Baixa "e a Viscosidade for "Pouco Alta "**Então** "Dosar Muito Adensante"**e** "Dosar Pouca Água"

6. **SE** a Densidade for "Muito Baixa "e a Viscosidade for "Muito Alta "**Então** "Dosar Muito Adensante"**e** "Dosar Muita Água"
7. **SE** a Densidade for "Muito Baixa "e a Viscosidade for "Muito Baixa "**Então** "Dosar Muito Adensante"**e** "Dosar lvl 8 de Viscosificante"
8. **SE** a Densidade for "Pouco Baixa "e a Viscosidade for "Baixa "**Então** "Dosar Pouco Adensante"**e** "Dosar lvl 4 de Viscosificante"
9. **SE** a Densidade for "Pouco Baixa "e a Viscosidade for "Pouco Baixa "**Então** "Dosar Pouco Adensante"**e** "Dosar lvl 2 de Viscosificante"
10. **SE** a Densidade for "Pouco Baixa "e a Viscosidade for "Set Point "**Então** "Dosar Pouco Adensante"**e** "Não dosar Viscosificante"
11. **SE** a Densidade for "Pouco Baixa "e a Viscosidade for "Pouco Alta "**Então** "Dosar Pouco Adensante"**e** "Dosar Pouca Água"
12. **SE** a Densidade for "Pouco Baixa "e a Viscosidade for "Muito Alta "**Então** "Dosar Pouco Adensante"**e** "Dosar Muita Água"
13. **SE** a Densidade for "Set Point "e a Viscosidade for "Muito Baixa "**Então** "Não Dosar Adensante"**e** "Dosar lvl 10 de Viscosificante"
14. **SE** a Densidade for "Set Point "e a Viscosidade for "Baixa "**Então** "Não Dosar Adensante"**e** "Dosar lvl 6 de Viscosificante"
15. **SE** a Densidade for "Set Point "e a Viscosidade for "Pouco Baixa "**Então** "Não Dosar Adensante"**e** "Dosar lvl 2 de Viscosificante"
16. **SE** a Densidade for "Set Point "e a Viscosidade for "Set Point "**Então** "Não Dosar Adensante"**e** "Não dosar Viscosificante"
17. **SE** a Densidade for "Set Point "e a Viscosidade for "Pouco Alta "**Então** "Não Dosar Adensante"**e** "Dosar Pouca Água"
18. **SE** a Densidade for "Set Point "e a Viscosidade for "Muito Alta "**Então** "Não Dosar Adensante"**e** "Dosar Muita Água"
19. **SE** a Densidade for "Pouco Alto "e a Viscosidade for "Muito Baixa "**Então** "Dosar Pouca Água"**e** "Dosar lvl 10 de Viscosificante"
20. **SE** a Densidade for "Pouco Alto "e a Viscosidade for "Baixa "**Então** "Dosar Pouca Água"**e** "Dosar lvl 6 de Viscosificante"

21. **SE** a Densidade for "Pouco Alto "e a Viscosidade for "Pouco Baixa "**Então** "Dosar Pouca Água"e "Dosar lvl 4 de Viscosificante"
22. **SE** a Densidade for "Pouco Alto "e a Viscosidade for "Set Point "**Então** "Dosar Pouca Água"e "Não dosar Viscosificante"
23. **SE** a Densidade for "Pouco Alto "e a Viscosidade for "Pouco Alta "**Então** "Dosar Pouca Água"e "Dosar Pouca Água"
24. **SE** a Densidade for "Pouco Alto "e a Viscosidade for "Muito Alta "**Então** "Dosar Pouca Água"e "Dosar Muita Água"
25. **SE** a Densidade for "Muito Alto "e a Viscosidade for "Muito Baixa "**Então** "Dosar Muito Água"e "Dosar lvl 10 de Viscosificante"
26. **SE** a Densidade for "Muito Alto "e a Viscosidade for "Baixa "**Então** "Dosar Muito Água"e "Dosar lvl 6 de Viscosificante"
27. **SE** a Densidade for "Muito Alto "e a Viscosidade for "Pouco Baixa "**Então** "Dosar Muito Água"tbfe "Dosar lvl 4 de Viscosificante"
28. **SE** a Densidade for "Muito Alto "e a Viscosidade for "Set Point "**Então** "Dosar Muito Água"e "Não dosar Viscosificante"
29. **SE** a Densidade for "Muito Alto "e a Viscosidade for "Pouco Alta "**Então** "Dosar Muito Água"e "Dosar Pouca Água"
30. **SE** a Densidade for "Muito Alto "e a Viscosidade for "Muito Alta "**Então** "Dosar Muito Água"e "Dosar Muita Água"

Simulação de controle fuzzy

O software LabVIEW® disponibiliza a funcionalidade de simular as respostas do controlador fuzzy, o que colaborou para análise do seu comportamento , permitindo uma melhor visualização a atuação de cada das regra e das funções de pertinência para o controle da densidade e viscosidade efetiva do fluido de perfuração.

A figura 3.47 ilustra a dosagem de viscosificante em uma situação simulada onde ambas as propriedades controladas se encontram dentro do valor desejado (set point), e o controlador fuzzy tem as regras 3 e 8 acionadas com peso 1, o que resulta na interrupção da dosagem de todos os aditivos, a figura 3.47 refere-se a dosagem de adensante, enquanto a figura 3.48 a dosagem de água, nesta mesma situação.

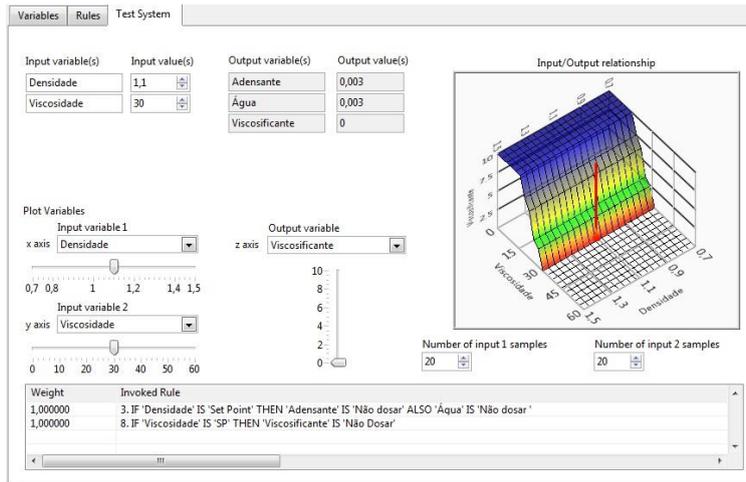


Figura 3.46: Simulação do controlador fuzzy para a dosagem de viscosificantes em situação que as propriedades se encontram no valor desejado. Fonte:(Própria).

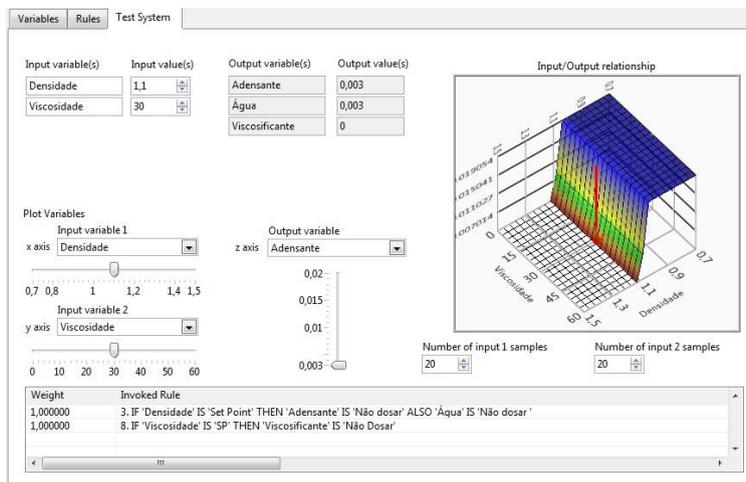


Figura 3.47: Simulação do controlador fuzzy para a dosagem de adensantes em situação que as propriedades se encontram no valor desejado. Fonte:(Própria).

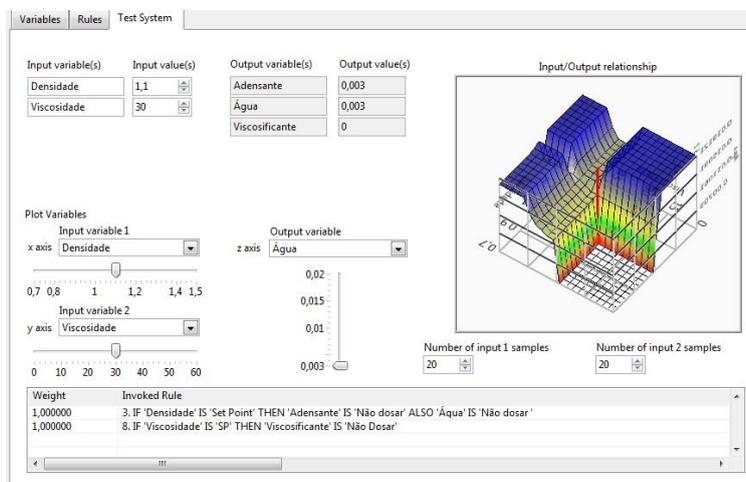


Figura 3.48: Simulação do controlador fuzzy para a dosagem de água em situação que as propriedades se encontram no valor desejado. Fonte:(Própria).

3.6 Metodologia experimental

Para efetuar os testes de desempenho do controlador fuzzy, um procedimento de operação padrão para a unidade experimental foi implementado. Seus principais passos estão pontuados na figura 3.49 e descritos em seguida.

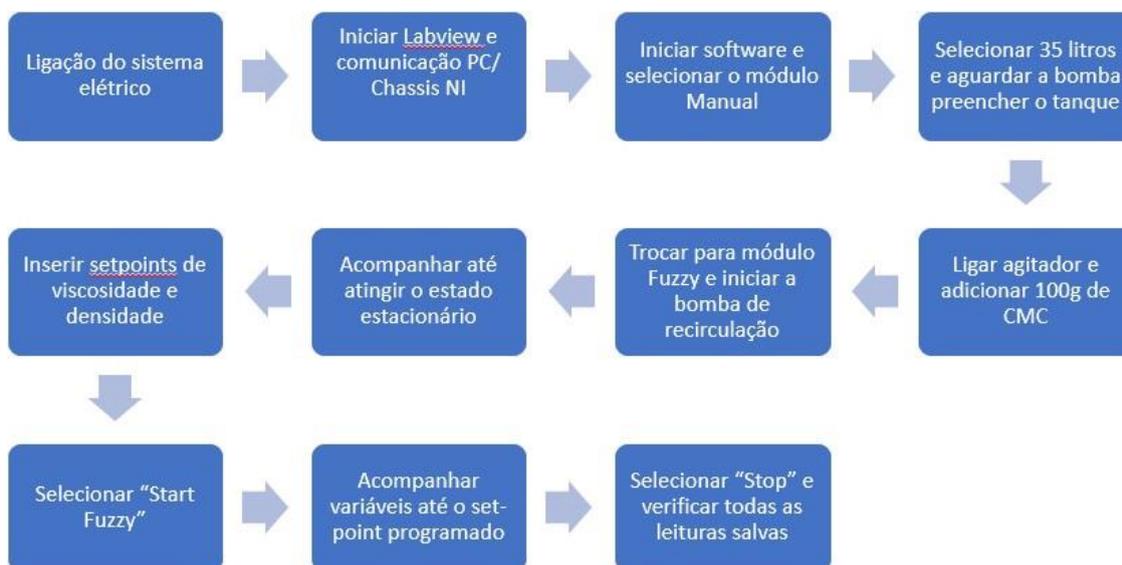


Figura 3.49: Procedimento experimental para operação da unidade de preparo de fluidos em testes de controle da densidade e viscosidade Fonte:(Própria).

- 1. Ligação do sistema elétrico** Acionamento de todos os disjuntores presentes no interior dos quadros, acionando o circuito de potência e comando da unidade, assim como os equipamentos presentes.
- 2. Iniciar Labview** Com estação de trabalho (notebook) conectado a placa de aquisição de dados por meio de cabo Ethernet, o software labview deve ser iniciado e o programa de operação da Unipaf aberto. O software disponibiliza a ferramenta "NI Max" que permite executar auto testes na placa e em cada cartão anexado a ela para detectar problemas de comunicação, caso necessário.
- 3. Iniciar software** Com o programa da Unipaf aberto, deve-se executar o modo run, iniciando a operação da unidade. Ao clicar no seletor de módulos na parte superior central da interface, as opções de módulos serão exibidas e o módulo de controle manual deve ser selecionado a princípio.
- 4. Nível inicial do tanque** A fim de evitar a entrada de ar na tubulação, a unidade de preparo permanece com o tanque cheio de água quando não está sendo usada. A parte superior do módulo manual deve ser selecionado o volume mínimo de 35 litros e a seguir a bomba de recirculação

deve ser acionada então é possível abrir a válvula de purga e a água será descartada até restar o volume selecionado, desligando a bomba automaticamente.

- 5. Adição de CMC** O agitador deve ser acionado para evitar aglutinação, garantir a homogenização do fluido. A seguir 100g de CMC são adicionadas gradativamente para preparar o fluido base para o teste.
- 6. Iniciar Módulo Fuzzy** O módulo fuzzy deve ser selecionado, a bomba de recirculação acionada.
- 7. Aguardar estado estacionário** Assim que a bomba de recirculação é acionada, a vazão e as leituras dos sensores podem levar alguns instantes para se estabilizarem, então deve-se aguardar o estado estacionário antes do início dos testes.
- 8. Inserir Setpoints** utiliza-se os seletores no módulo fuzzy para inserir o valor da densidade desejada e da viscosidade. Ambas as variáveis têm seu set point pré-determinado pelas funções de pertinência da etapa de fuzzificação e pela da base de regras. A alteração poderá ser realizada pelos seletores no painel supervisor, que alteram simultaneamente, todos os valores das funções de pertinência de entrada proporcionalmente.
- 9. Iniciar teste** Ao selecionar "start Fuzzy" o controlador fuzzy começa a atuar automaticamente, gerenciando a dosagem de aditivos ao fluido, enviando sinais de controle para os atuadores da unidade experimental e essas ações serão salvas, assim como as leituras dos sensores.
- 10. Acompanhar teste** O sistema de controle realiza a leitura das entradas das variáveis monitoradas e controladas, compara com os valores de set point e de segurança pré-estabelecidos, realiza o processamento das informações e atualiza as saídas do controlador, enviando dados de monitoramento para o painel supervisor e realizando a atuação nas variáveis manipuladas. O teste pode ser encerrado a qualquer momento, caso o operador julgue necessário.
- 11. Encerrar teste** Quando as variáveis alcançarem o valor desejado, o operador pode selecionar "stop" e o teste será encerrado. Uma mensagem será exibida questionando se os dados devem ser salvos. Caso sim, serão disponibilizados em um arquivo txt onde poderão ser validados e verificado o alcance do objetivo em controlar a densidade e viscosidade de forma simultânea e automatizada no processo de preparo do fluido de perfuração.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo foram apresentados os resultados provenientes de testes de controle do tipo regulador e servo da densidade e viscosidade aparente simultaneamente. Foi feito um estudo de bancada para auxiliar na propostas das regras de controle fuzzy apresentadas nos capítulos anteriores e na experiência prévia laboratorial do LEF/UFRRJ.

O planejamento experimental utilizado para os testes de controle foi realizado respeitando as seguintes características:

- Volume inicial do tanque em 35 litros.
- Agitador constante na potência máxima.
- Como viscosificante, CMC;
- Todos os testes realizados em temperatura de 25 C° e 1 atm;
- Como adensante, barita ou calcita entre 0 lb/bbl e 150 lb/bbl;
- O fluido inicial presente no tanque pode ser caracterizado segundo a tabela

4.1

Testes de controle regulatório foram realizados com adição de 12 litros de água, aproximadamente 30 % do volume de fluido no tanque.

Tabela 4.1: Caracterização do fluido base dos testes em temperatura de 25 C° e 1 atm

Variável	Valor
Concentração de CMC (w/w)	1.00 lb/bbl
Índice de comportamento do fluido, n	0,56
Índice de consistência do fluido, K	0,38 Pa.s ⁿ

4.1 Desempenho do controlador fuzzy em problemas do tipo servo

O controlador fuzzy foi submetido a testes tipo servo, onde foram estabelecidos diferentes degraus de setpoint para a densidade e viscosidade aparente onde o controlador deveria atuar gerenciando a dosagem de aditivos a fim de alcançar automaticamente os valores estipulados em diversas situações. Os casos abordados neste trabalho estão listados abaixo e descritos nesta sessão.

- Degrau positivo de densidade simultaneamente com degrau positivo de viscosidade.
- Degrau negativo de densidade simultaneamente com degrau negativo de viscosidade.
- Setpoint para densidade mantido constante simultaneamente com degrau negativo de viscosidade.
- Setpoint para densidade mantido constante simultaneamente com degrau positivo de viscosidade.

A figura 4.1 apresenta um resultado típico onde o teste começou em aproximadamente 20cP de viscosidade aparente e com a densidade de 1.0 g/cm^3 . Aos 60 segundos, o setpoint foi alterado para 30cP e $1,1 \text{ g/cm}^3$ de viscosidade aparente e densidade, respectivamente, fazendo com que o controlador fuzzy aplicasse uma taxa de dosagem de adensante e viscosificante ao fluido. O controlador fuzzy apresentou um tempo de acomodação de 1300 segundos, seguido por um overshoot de 7,5% na viscosidade aparente e 0,3% para densidade.

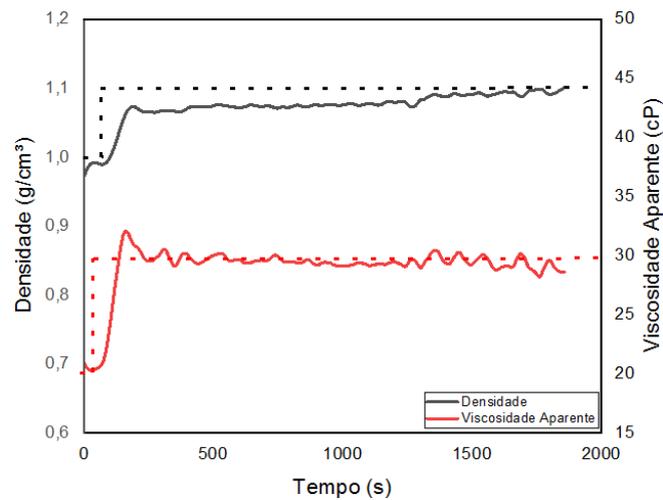


Figura 4.1: Teste de controle fuzzy do tipo servo inicialmente com 20cP de viscosidade aparente e densidade de 1,0 g/cm^3 com setpoint de 1,1 g/cm^3 and 30 cP.

O próximo teste servo a que o controlador fuzzy foi submetido pode ser visto na figura 4.2, foi efetuado um degrau negativo de setpoint, onde as propriedades iniciais do fluido encontravam se em aproximadamente 1,18 g/cm^3 e 25 cP, para densidade e viscosidade aparente respectivamente, e o setpoint foi alterado para 1,1 g/cm^3 em densidade e 20 cP para viscosidade aparente.

Vale ressaltar que a redução das variáveis controladas foi feita por meio da adição controlada de água, que atua na densidade e na viscosidade aparente simultaneamente, não sendo possível reduzir o valor de uma sem causar uma redução na outra. O setpoint definido foi atingido em 380 segundos, não apresentando overshoot considerável.

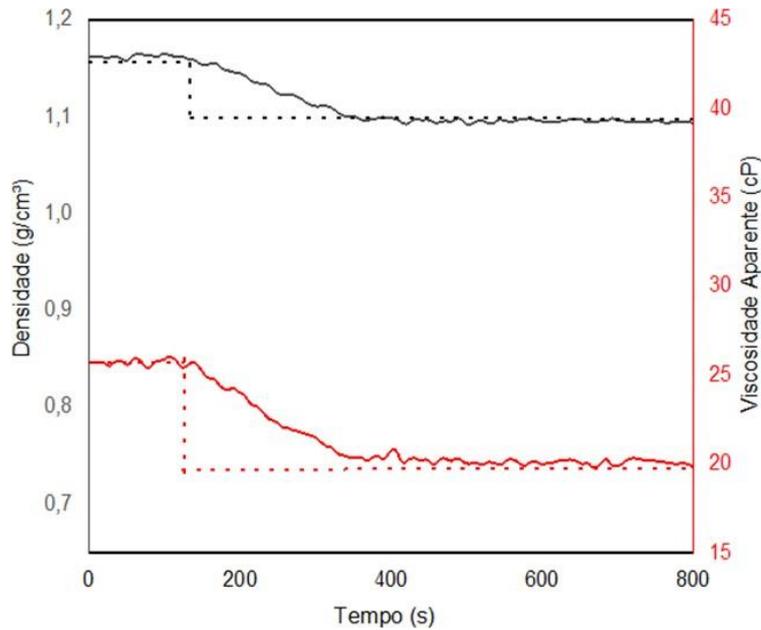


Figura 4.2: Teste servo de controle com densidade inicial de $1,0 \text{ g/cm}^3$ e 20 cP de viscosidade aparente com setpoint em $1,1 \text{ g/cm}^3$ e 30 cP.

O próximo passo foi verificar a capacidade do controlador fuzzy proposto em aplicar um degrau de setpoint para apenas uma das variáveis controladas mantendo a outra variável estável em seu setpoint. A figura 4.3 apresenta um teste servo onde a densidade do fluido de perfuração foi controlada em torno do setpoint de $1,1 \text{ g/cm}^3$ enquanto aplicava um degrau de 20cP a 30cP no ponto de ajuste de controle de viscosidade aparente.

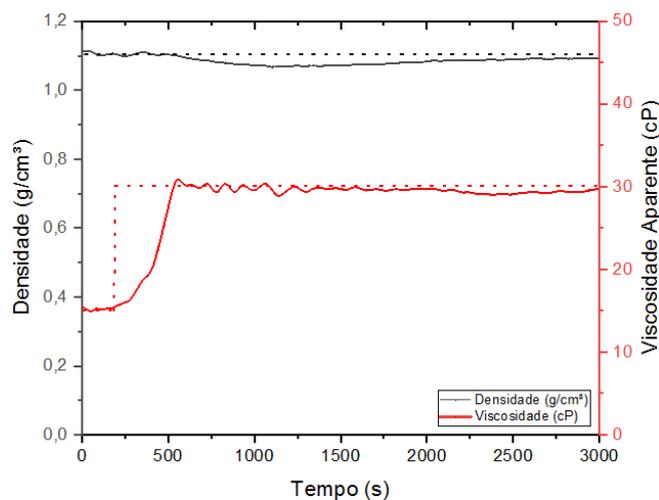


Figura 4.3: Teste servo de controle com densidade inicial de $1,1 \text{ g/cm}^3$ e 15 cP de viscosidade aparente com setpoint em $1,1 \text{ g/cm}^3$ e 30 cP.

A mudança do setpoint da viscosidade aparente foi aplicada pelo controlador em

230 segundos, apresentando um tempo de subida de 260 segundos onde o dosador passou a adicionar água ao fluido para evitar um overshoot, o que causou uma tendência de queda de densidade que foi mitigada automaticamente, pela dosagem de adensante, realizando o controle sem que ocorram overshoots ou offsets consideráveis.

As respostas geradas pelo controlador fuzzy ao longo do teste para controlar a taxa de dosagem de aditivos estão descritas na figura 4.4. Por se tratar de um dosador de viscosificante On/off, a resposta do controlador é expressa em quantos segundos ele permanece ligado durante cada intervalo de 10 segundos. Para a dosagem de água e adensante a resposta é expressa em mA por se tratar de atuadores analógicos controlados por 4 a 20mA.

Assim que o controlador é acionado inicia se a dosagem de viscosificante em intensidade máxima, com a taxa de dosagem reduzindo a medida que aproxima se do setpoint aos 500 segundos, ressaltando que a distância entre o ponto de entrada dos aditivos e o ponto de leitura dos sensores gera um tempo morto inerente a unidade experimental. O controlador identifica a necessidade de dosagem de água para suprimir um possível overshoot e aplica a taxa de dosagem máxima de água observada durante o teste, o que acarreta uma tendência de queda do valor da densidade requerindo a resposta de adição de adensantes que alcança seu pico em 1100 segundos, quando a densidade se encontrava em seu ponto mais distante do valor de setpoint estipulado. Pelo decorrer do testes foram feitas dosagens constantes para a manutenção do setpoint.

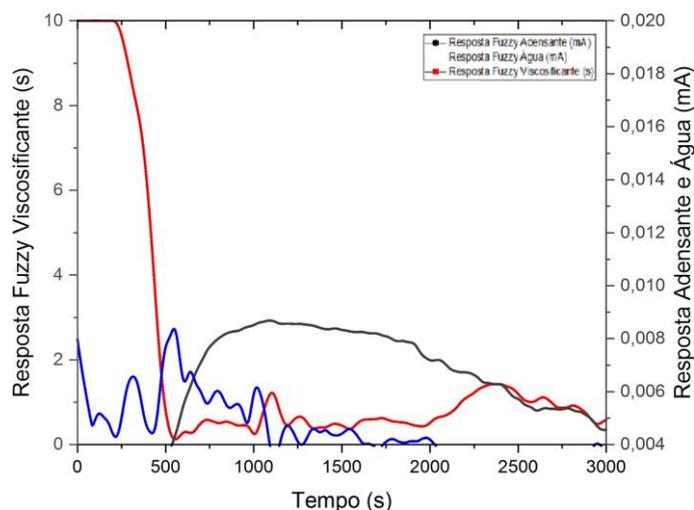


Figura 4.4: Respostas do controlador fuzzy em teste servo com setpoint de densidade estático e degrau positivo de viscosidade.

A seguir foi avaliada a capacidade do controlador manter a densidade estável enquanto reduzia o valor da viscosidade aparente, representado na figura 4.5

O degrau negativo de viscosidade aparente foi aplicado em 100 segundos, com o controlador fuzzy identificando a viscosidade acima do setpoint e iniciando automaticamente a dosagem de água. Devido à diluição do fluido, a densidade apresentou tendência de queda, sendo compensada pela dosagem de espessante, limitando a queda a um valor máximo de $0,025 \text{ g/cm}^3$. O controlador atingiu o setpoint em 320 segundos.

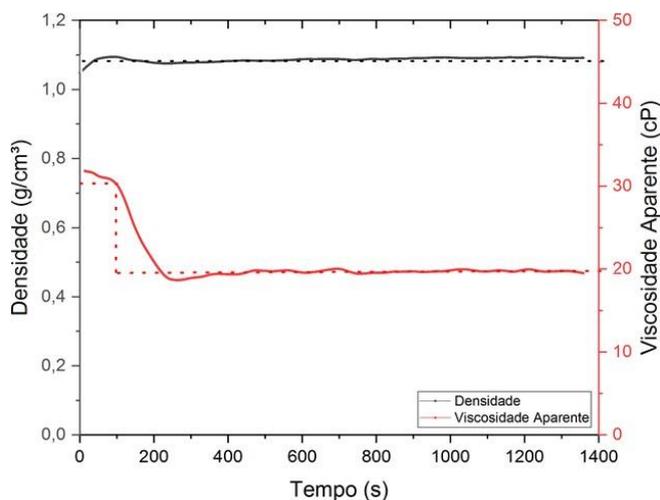


Figura 4.5: Teste servo de controle com densidade inicial de $1,1 \text{ g/cm}^3$ e 30 cP de viscosidade aparente com setpoint em $1,1 \text{ g/cm}^3$ de densidade e 20 cP de viscosidade aparente.

A figura 4.6 representa uma falha típica, atribuída a ação de bolhas de ar acumuladas no sistema, observado na captação de dados da unidade de preparo de fluidos em um teste do tipo servo, onde o estado inicial do fluido era de $1,02 \text{ g/cm}^3$ para densidade e 20 cP para viscosidade aparente, tendo como setpoint os valores de $1,02 \text{ g/cm}^3$ e 10 cP para densidade e viscosidade aparente, respectivamente.

Aos 125 segundos de teste, o aparato experimental passou a reportar valores de viscosidade erráticos sem serem observadas mudanças no fluido ou nos valores amostrados nos displays de instrumentação, retornando a leitura nominal a partir de 190 segundos de teste. O erro observado paralisou o controle de viscosidade durante o estado de falha, pois a maioria dos valores lidos saíam da escala em que o controlador fuzzy foi projetado para atuar, o que impediu uma atuação imprópria, preservando a viscosidade aparente dentro dos valores esperados.

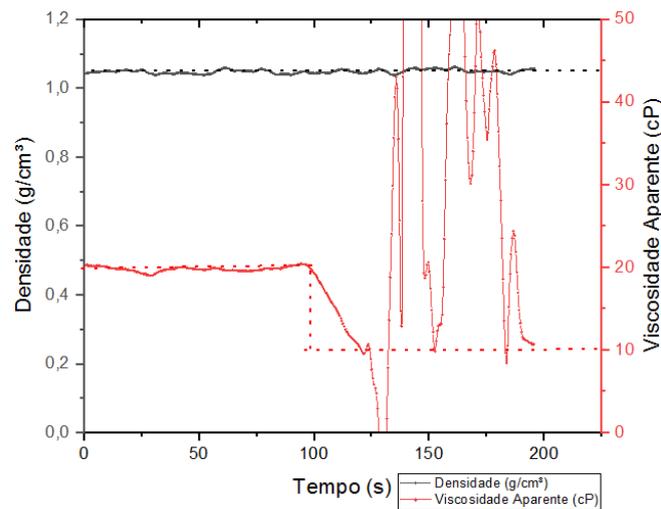


Figura 4.6: Resultado típico de falha de leitura em teste do tipo servo com setpoints definidos em $1,02 \text{ g/cm}^3$ e 10cP para densidade e viscosidade aparente, respectivamente.

4.1.1 Desempenho do controlador PID em problema do tipo servo

A fim de obter um parâmetro de comparação com o controlador fuzzy, foi desenvolvido um controlador PID que foi utilizado para replicar os testes feitos anteriormente, utilizando o mesmo hardware e os resultados serão apresentados na sessão a seguir.

A figura 4.7 descreve um teste tipo servo onde o fluido apresentava inicialmente a densidade de aproximadamente $1,0 \text{ g/cm}^3$ e a viscosidade aparente de 20 cP quando foi submetido ao degrau de setpoint positivo para $1,1 \text{ g/cm}^3$ e 30 cP aos 250 segundos. Após aproximadamente 230 segundos de tempo de elevação, o controlador apresentou um overshoot de 20% em seu ponto máximo, iniciando a dosagem de água, o que resultou na correção do overshoot aos 800 segundos, porém a correção de viscosidade acarretou uma queda na densidade que foi corrigida automaticamente aos 670 segundos .

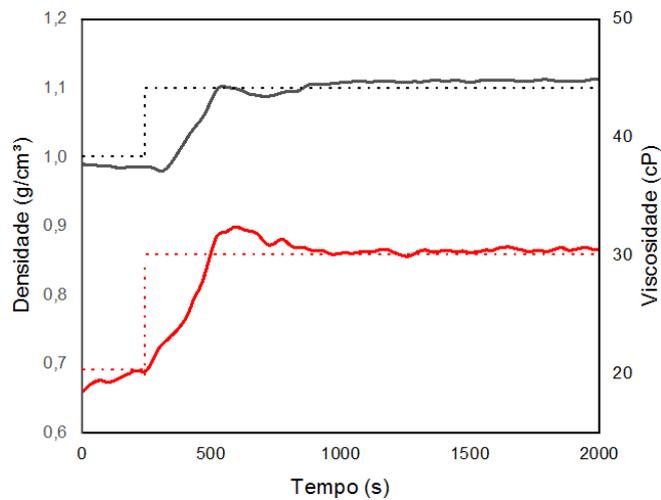


Figura 4.7: Teste de controle PID do tipo servo inicialmente com 20cP de viscosidade aparente e densidade de 1,0 g/cm^3 , com setpoint de 1,1 g/cm^3 e 30 cP.

A seguir foi verificado se o controlador PID seria capaz de lidar com o controle individual de uma das variáveis, a figura 4.8 demonstra um resultado típico onde a densidade manteve seu setpoint em 1,1 g/cm^3 enquanto a viscosidade aparente era submetida a um degrau de setpoint de 20 para 30 cP aos 500 segundos. O controlador PID atingiu o setpoint aos 1050 segundos, onde administrou dosagem de água evitando assim, um overshoot de viscosidade aparente, porém causando uma tendência de queda de densidade que foi corrigida por meio de dosagem de barita aos 1560 segundos, o que acarretou um aumento de viscosidade gerando um offset de 0,8 cP ao final do teste.

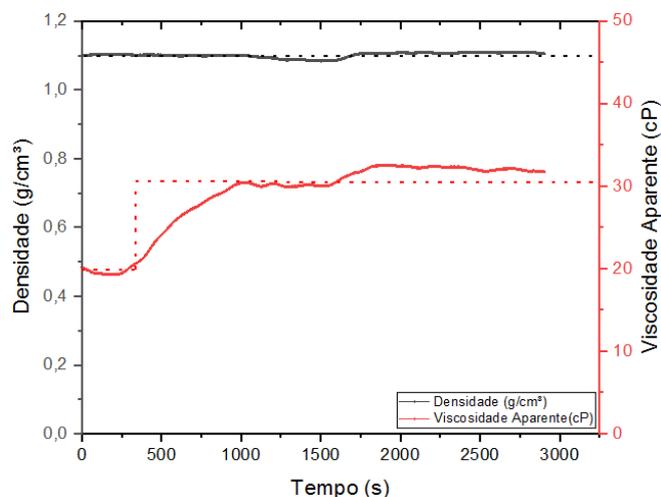


Figura 4.8: Teste de controle PID do tipo servo inicialmente com 20cP de viscosidade aparente e densidade de 1,1 g/cm^3 com setpoint de 1,1 g/cm^3 e 30 cP.

O teste tipo servo seguinte verifica a capacidade do controlador PID de submeter o fluido a um degrau negativo de viscosidade aparente de 30 cP para 20 cP enquanto mantém a densidade no setpoint de 1,1 g/cm^3 e um resultado típico pode ser visto na figura 4.9.

O fluido permanece em regime estacionário até 1000 segundos, onde o degrau negativo de viscosidade aparente é aplicado, o controlador PID inicia a dosagem de água e de barita simultaneamente a fim de manter a densidade próxima de seu setpoint, todavia a densidade chega a 1,049 no auge da queda retornando ao setpoint aos 1575 segundos, já a viscosidade aparente apresenta uma queda oscilante, devido a adição de adensante até alcançar o setpoint aos 2380 segundos.

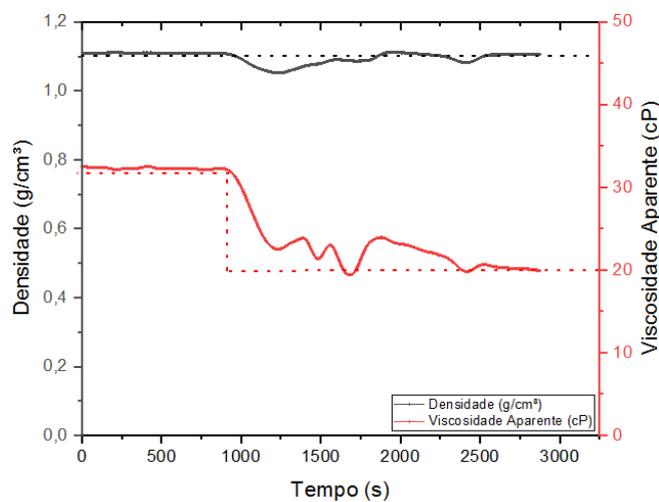


Figura 4.9: Teste de controle PID do tipo servo inicialmente com 30 cP de viscosidade aparente e densidade de 1.1 g/cm^3 com setpoint de 1.1 g/cm^3 e 20 cP.

4.2 Desempenho do controlador fuzzy em problema do tipo regulador

O desempenho do controlador fuzzy atuando na densidade e viscosidade aparente em problemas do tipo regulador estão destacados nessa sessão. São apresentados três resultados de testes típicos com uma perturbação de 12 litros de água em um volume de aproximadamente 35 litros, que foi corrigida com um controlador fuzzy utilizando barita como adensante, fuzzy utilizando calcita como adensante e PID utilizando barita como adensante, respectivamente.

A figura 4.10 ilustra um teste regulador fuzzy utilizando barita como adensante, onde é possível observar queda brusca, tanto da densidade quanto da viscosidade aparente aos 60 segundos, momento que foi adicionado 12 litros de água ao tanque

como perturbação em um curto intervalo de tempo. Com o controle acionado para os setpoints de $1,1 \text{ g/cm}^3$ de densidade e 30 cP de viscosidade aparente, o controlador fuzzy detectou a queda simultânea de densidade e viscosidade aparente e iniciou a dosagem controlada de barita e viscosificante corrigindo a densidade aos 800 segundos e a viscosidade aos 1600 segundos, sem apresentar overshoot em ambas as variáveis controladas.

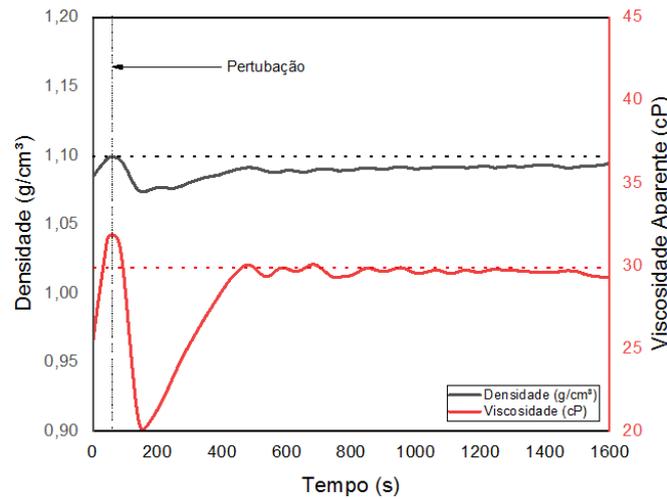


Figura 4.10: Teste de controle Fuzzy do tipo regulador com setpoint em 30 cP de viscosidade aparente e com a densidade de $1,1 \text{ g/cm}^3$ submetido a adição de 12 litros de água e utilizando calcita como adensante.

O mesmo teste foi replicado utilizando um controlador PID e seu desempenho está ilustrado na figura 4.11, onde a perturbação de água foi aplicada aos 200 segundos, acarretando uma redução do valor da densidade e viscosidade aparente, fazendo com que o controlador inicia a dosagem de barita e CMC simultaneamente, atingindo o valor do setpoint aos 450 segundos de teste, porém causando um overshoot de viscosidade aparente de $0,2 \%$ que perdurou até 1000 segundos, onde o setpoint de ambas as variáveis foi recuperado e mantido não apresentando offset.

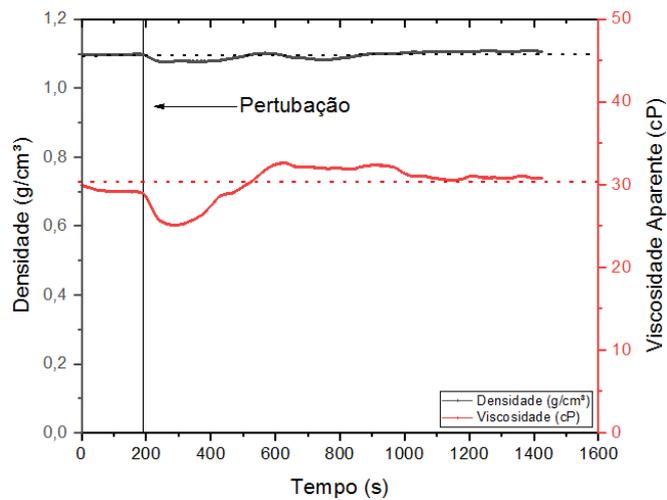


Figura 4.11: Teste de controle PID do tipo regulador com setpoint em 30 cP de viscosidade aparente e com a densidade de 1.1 g/cm^3 submetido a adição de 12 litros de água e utilizando barita como adensante.

4.3 Testes com viscosímetro co-Axial

Como alternativa para o viscosímetro tubular, foi utilizado um viscosímetro de cilindro coaxiais, TT-100, um equipamento que funciona através da medida da tensão cisalhante do fluido com base na taxa de cisalhamento, semelhante ao equipamento de bancada utilizado atualmente nas sondas. A principal modificação introduzida no equipamento comercial foi a alteração do motor e do gerador de sinal elétrico que possibilita a variação da taxa de deformação de forma contínua. Desta forma, o viscosímetro foi modificado e calibrado para permitir total controle do equipamento remotamente e transformando-o, então, em um equipamento exclusivo no mercado, (MAGALHÃES 2015) [17].

O equipamento foi ligado em linha, fornecendo uma leitura em tempo real na taxa de 511s⁻¹

Para a aferição do viscosímetro coaxial, foi feita uma comparação entre as medidas de viscosidades obtidas no viscosímetro alternativo, conforme exemplificado na figura 4.12. A viscosidade aparente aferida em ambos os viscosímetros apresentou comportamento semelhante, indicando que o equipamento também pode servir como sensor viável para fornecer o feedback de viscosidade aparente para o controlador fuzzy.

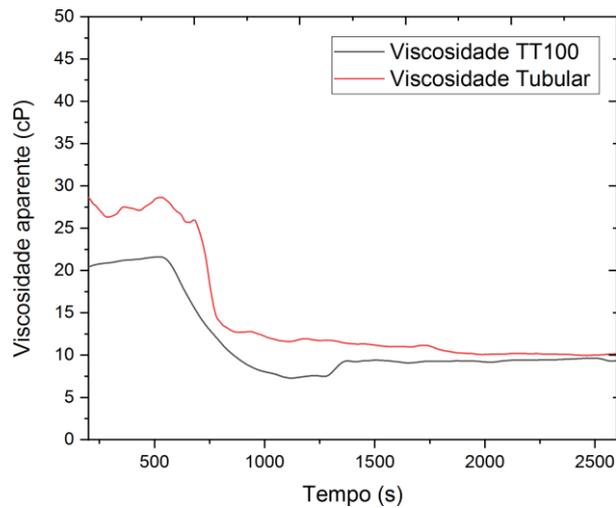


Figura 4.12: Leitura de viscosidade do viscosímetro tubular e do viscosímetro coaxial em teste servo de controle de densidade e viscosidade aparente com setpoint 10cP.

Foram realizados testes servos do tipo degrau positivo e negativo. O servo de degrau positivo foi feito com setpoints de densidade de $1,1 \text{ g/cm}^3$ e viscosidade de 20 cP, partindo do estado inicial de $1,07 \text{ g/cm}^3$ e 12,3 cP, conforme pode ser visto na figura 4.13.

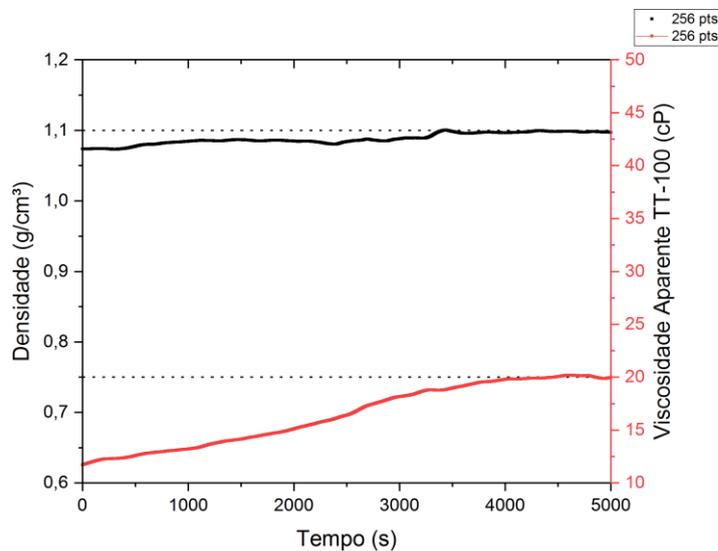


Figura 4.13: Teste servo de controle utilizando viscosímetro coaxial com densidade inicial de $1,07 \text{ g/cm}^3$ e 12 cP de viscosidade aparente com setpoint em $1,1 \text{ g/cm}^3$ e 20 cP.

A densidade alcançou o valor desejado aos 3500 segundos de teste, enquanto a viscosidade aparente alcançou seu setpoint aso 3950 segundos, não foram observados overshoots ou offset consideráveis.

O teste servo com degrau negativo foi iniciado quando o fluido apresentava a

densidade de $1,08 \text{ g/cm}^3$ e a viscosidade $21,5 \text{ cP}$, o controlador fuzzy foi acionado com setpoints de $1,05 \text{ g/cm}^3$ de densidade e 10 cP de viscosidade aparente. Pode-se perceber pela figura. 4.14 que o setpoint de densidade foi atingido aos 1150 segundos, não apresentando overshoots ou offsets significativos. O setpoint de viscosidade foi alcançado aos 1360 segundos após um overshoot de $2,8 \text{ cP}$ em seu pico.

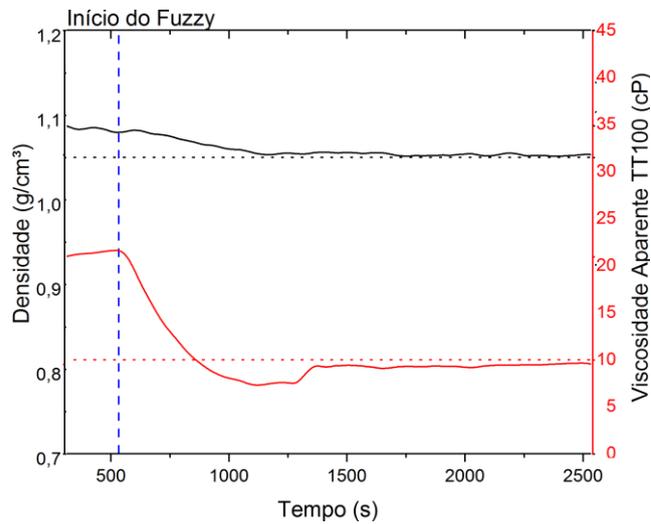


Figura 4.14: Teste servo de controle com densidade inicial de $1,0 \text{ g/cm}^3$ e 20 cP de viscosidade aparente com setpoint em $1,1 \text{ g/cm}^3$ e 30 cP .

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de monitoramento e controle em tempo real de densidade e viscosidade aparente no preparo de fluidos de perfuração por meio de lógica fuzzy.

A adaptação da unidade experimental permitiu a reprodução do processo de produção de fluidos de perfuração em escala piloto, de forma confiável e pertinente, atendendo as necessidades de automação e aquisição de dados necessárias para o estudo proposto.

Foram feitos ensaios do tipo servo e regulador. Em testes do tipo servo foram aplicados degraus de *setpoint* positivos e negativos simultaneamente para densidade e viscosidade aparente, onde foi aferida a capacidade do controlador fuzzy desenvolvido de gerenciar a taxa de dosagem de aditivos para levar cada variável controlada ao seu valor desejado. A metodologia aplicada apresentou um overshoot máximo de 7,5% na viscosidade aparente em testes de degrau positivo e não apresentando overshoot em testes de degrau negativo.

O controlador foi capaz alterar o *setpoint* da viscosidade aparente enquanto a densidade era mantida em torno do valor desejado, e também foi capaz de alterar o valor da densidade enquanto mantinha o valor da viscosidade aparente. Quando submetido a uma perturbação súbita o controlador foi capaz de recuperar os valores de *setpoint* das variáveis controladas, independente do aditivo utilizado não apresentando overshoots nos resultados obtidos.

A comparação com a metodologia de controle PID mostram que o PID foi capaz de efetuar o controle das variáveis de interesse, apresentando um comportamento típico mais oscilatório, o que resultaria em um maior consumo de aditivos e consequentemente um aumento de custo.

A estratégia de controle fuzzy se mostrou uma alternativa viável para o controle automatizado das propriedades de fluidos de perfuração, trazendo a possibilidade de captar a expertise acumulada por operadores para o controle automatizado.

Referências Bibliográficas

- [1](THOMAS 2001), J. E. *Fundamentos da Engenharia de Petróleo*. 1 ed. Brasil, Interciencia, 2001.
- [2](GANDELMAN 2013), R. “Real Time Drilling Data Diagnosis Implemented In Deepwater Wells - A Reality”, October 2013.
- [3](BASHIER 2012), E. “Comparison of some Classical PID and Fuzzy Logic Controllers”, *International Journal of Scientific Engineering Research*, v. 3, n. 1, September 2012.
- [4]ZADEH, 2007, L. A. *Fuzzy sets. Information and Control*. Artigo dissertation, Universidade de Berkeley, Califórnia, EUA, 1965.
- [5](COSENDEY 2011), T, F. *ANÁLISE DA TÉCNICA DE PERFURAÇÃO UN-
DERBALANCED E SUAS VANTAGENS EM RELAÇÃO À PERFURA-
ÇÃO CONVENCIONAL*. Graduação dissertation, Universidade Federal
Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [6](ABDALLAH GREENWOOD 2007), T, F. *Integration of Pore Pres-
sure/Fracture Gradient Prediction Methods and Real-Time Annulus Pres-
sure Measurements Optimizes Drilling in Deltaic Environments*. Artigo
dissertation, Mediterranean Offshore Conference, Niterói, Rio de Janeiro,
Brasil, 2006.
- [7](ROCHA AZEVEDO 2019), J. E. *Fundamentos da Engenharia de Petróleo*. 3
ed. Brasil, Interciência, 2019.
- [8](SHIROMA 2012), P, H. *ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO
DE SUSPENSÕES AQUOSAS DE BENTONITA E CMC: INFLUÊNCIA
DA CONCENTRAÇÃO DO NaCl*. Mestrado dissertation, Universidade
de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil, 2012.
- [9](BALTAR 2020), T. *Barita e bentonita: funções no fluido de perfuração e po-
tencial de uso das reservas do nordeste do Brasil*. Artigo dissertation,

Imprensa da Universidade de Coimbra, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, 2020.

- [10](RADICH 2018), A, S. *MODELAGEM E CONTROLE FUZZY DA DENSIDADE DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO*. Mestrado dissertation, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, 2018.
- [11](FERRAZ 2019), R, S. C. *MODELAGEM E CONTROLE FUZZY DA VISCOSIDADE APARENTE DE SOLUÇÕES DE CARBOXIMETILCELULOSE E ÁGUA*. Mestrado dissertation, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, 2019.
- [12](PEREIRA 2010), M, S. *Caracterização de Cascalho e Lama de Perfuração ao Longo do Processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás*. Mestrado dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, São Paulo, Brasil, 2010.
- [13](OLIVEIRA 2015), M, J. D. *Avaliação do tempo de consolidação de argamassas colantes através de métodos reológicos*. Mestrado dissertation, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 2015.
- [14](PRITCHARD 2011), P, J. *Fox and McDonald's INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS*. 8 ed. EUA, JOHN WILEY SONS, INC, 2011.
- [15](VALE 2017), D. “ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO BASE ÁGUA: EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE NaCl”, *HOLOS*, v. 2017.5162, n. 1, pp. 214–228, Fevereiro 2017.
- [16](BIRD ET AL 2004). *Fenômenos de Transporte*. 2 ed. Brasil, LTC, 2004.
- [17](MAGALHÃES 2015), S, C. *UMPC Unidade Móvel de Pesquisa Científica: um sistema desenvolvido para aferições em tempo real das propriedades físico-químicas de fluidos de perfuração*. Mestrado dissertation, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
- [18](FANN INSTRUMENT COMPANY 2009). *Mud Balance Instruction Manual*. 3 ed. USA, Hamdon Wellsite Solutions, 2009.
- [19](SINGH, 2013), H. *Real-Life Applications of Fuzzy Logic*. Artigo dissertation, *Advances in Fuzzy Systems* vol 2013, Califórnia, EUA, 2013.

- [20]E.ARAUJO. “Lógica Difusa (Fuzzy) e Raciocínio Aproximado: Conceitos e Aplicações”, *Encontro Regional de Matematica Aplicada e Computacional - XIII ERMAcI*, v. 8, n. 8, pp. 1–17, Julho 2009.
- [21](SIMÕES 2007), M, G. *Controle e Modelagem Fuzzy*. 2 ed. Brasil, Blucher, 2007.
- [22](KALOGIROU 2009), M, G. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 2 ed. Tokyo, Elsevier, 2009.
- [23](LEEKWIJCK1997). “Defuzzi cation: criteria and classification”, *Fuzzy Sets and Systems*, v. 108, pp. 159–178, Outubro 1997.
- [24](BONISSONE ET AL 1995). “Industrial Applications of Fuzzy Logic at General Electric”, *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, v. 83, n. 3, pp. 429–437, Março 2012.
- [25]OKWU ET AL (2018). “A review of fuzzy logic applications in petroleum exploration, production and distribution operations”, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, Outubro 2018.
- [26]LIAL ET AL (2007). “Fuzzy logic control for a petroleum separation process”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 21, n. 21, pp. 835–845, Novembro 2008.
- [27](ONOFRE FILHO ET AL 2012). “IMPLEMENTATION OF A FUZZY CONTROLLER FOR pH REGULATION IN OIL PROCESS”, *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, v. 5, pp. 429–437, 2012.
- [28](BARBOSA 2016), R, F. *Desenvolvimento de uma célula de filtração com operação automática para monitoramento de dados online*. Mestrado dissertation, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- [29](CENGEL 2007), Y, A. *Mecânica dos Fluidos Fundamentos e Aplicações*. 2 ed. Brasil, Bookman, 2007.
- [30]S. DA C. MAGALHÃES FILHO^{1*}, M. FOLSTA, E. V. N. N. C. M. S. L. A. C. “STUDY OF CONTINUOUS RHEOLOGICAL MEASUREMENTS IN DRILLING FLUIDS”, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 34, n. 3, pp. 775–788, Setembro 2017.