

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

DISSERTAÇÃO

**MODELAGEM E CONTROLE *FUZZY* DA VISCOSIDADE APARENTE
DE SOLUÇÕES DE CARBOXIMETILCELULOSE E ÁGUA**

RODRIGO DE SOUSA CAMPISTA FERRAZ

2019



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

**MODELAGEM E CONTROLE *FUZZY* DA VISCOSIDADE APARENTE
DE SOLUÇÕES DE CARBOXIMETILCELULOSE E ÁGUA**

RODRIGO DE SOUSA CAMPISTA FERRAZ

Sob a orientação do professor:

Dr. Luís Américo Calçada

e Co orientação do professor:

Dr. Luiz Augusto da Cruz Meleiro

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

Seropédica, RJ
Agosto de 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

F368m Ferraz, Rodrigo de Sousa Campista, 1979-
Modelagem e Controle Fuzzy da Viscosidade Aparente
de Soluções de Carboximetilcelulose e Água / Rodrigo de
Sousa Campista Ferraz. - Seropédica-RJ, 2019.
82 f.

Orientador: Luís Américo Calçada.
Coorientador: Luiz Augusto da Cruz Meleiro.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química, 2019.

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

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

RODRIGO DE SOUSA CAMPISTA FERRAZ

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 29/08/2019

Prof. Dr. Luís Américo Calçada. DEQ/UFRRJ
(Orientador)

Prof. Dr. José Leandro Casa Nova Almeida. IFRJ, Universidade de Vassouras

Profa. Dra. Rosane Ferreira de Oliveira. DEMAT/UFRRJ

*Dedico este trabalho a meu filho Victor,
a minha esposa Letícia,
aos meus pais, Sueli e Gilberto (in
memoriam) e ao meu irmão Rogério,
pelo apoio e incentivo incondicional.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, toda honra, toda a glória e todo o louvor, por todas as conquistas realizadas por meio deste trabalho. Por toda aprendizagem e por todas amizades que fui presenteado.

Aos meus Pais Gilberto (*in memorian*) e Sueli Ferraz, por todo empenho de vida para me apoiar, e com muita sabedoria deixar seu legado.

Ao meu filho Victor e minha esposa Letícia, que são a minha felicidade, benção e herança de Deus para minha vida. Grato pelo apoio e paciência nos momentos de ausência.

Ao meu irmão Rogério e à época sua esposa Andreia, dos quais usados por Deus, me informaram sobre LEF/UFRRJ e suas linhas de pesquisa. Em visita técnica, com a atenção do Prof. Dr. Calçada, pude naquele momento perceber e decidir por querer estudar neste local.

Aos meus orientadores, Luís Américo Calçada e Luiz Augusto da Cruz Meleiro, agradeço a todo ensinamento, pelo exemplo de vida, de sabedoria e profissionais que são. Pelos desafios que me moldaram, pela oportunidade de realizar tantas conquistas no LEF, e por chegar à conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos funcionários do LEF, Sérgio Magalhães, Elias Valim, Gabriela Fontella e Eduardo Cunha, pessoas especiais que fizeram diferença e nunca se pouparam em ajudar. Pelos ensinamentos do *LabVIEW*® e de engenharia aplicada do Sérgio, pela prática de montagem de estruturas do Elias, e pela amizade de vocês, meu muito obrigado.

Ao SENAI de Barra do Piraí – RJ, onde trabalho, a equipe técnico pedagógica, a minha gerente Mônica Leone, e em especial ao meu coordenador José Orlando, que me deram meios para eu poder estudar e crescer profissionalmente e sempre me apoiaram, muito obrigado.

E a todos os amigos que fiz ao longo desses anos que estudei na UFRRJ, lugar maravilhoso.

Obrigado!

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 artby the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1.	Perfuração de Poços de Petróleo	3
2.2.	Fluidos de Perfuração	4
2.2.1.	Medição da viscosidade em laboratório	6
2.3.	Lógica Fuzzy.....	7
2.3.1.	Conjuntos Fuzzy.....	8
2.3.2.	Aspectos da Lógica Fuzzy.....	13
2.3.3.	Controlador Fuzzy.....	16
2.3.3.1.	Funções da Interface de fuzzificação.....	16
2.3.3.2.	A Base de Conhecimento	17
2.3.3.3.	Procedimento de Inferência	18
2.3.3.4.	Interface de Defuzzificação	19
2.3.3.5.	Eficiência e Vantagens na Aplicação do Controle Fuzzy.....	20
2.4.	Aplicações da Lógica Fuzzy	20
2.4.1.	Controlador Fuzzy Aplicado no Setor de Petróleo e Polímeros.....	20
2.4.2.	Controladores Fuzzy Aplicados no Controle de Pressão	21
2.4.3.	Controladores Fuzzy Aplicados no Controle de Temperatura	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS.	23
3.1.	Unidade Experimental	23
3.2.	Montagem, adaptação e evolução	23
3.3.	Descrição dos Equipamentos e Instrumentos	27
3.4.	O Viscosímetro Tubular.....	32
3.4.1.	Aferição do Viscosímetro Tubular.....	34
3.5.	Sistema de Controle e Aquisição de Dados	35
3.5.1.	Sistema Supervisório.....	37
3.6.	Metodologia Experimental	38
4	MODELAGEM E CONTROLE FUZZY da VISCOSIDADE.....	41
4.1.	Estratégia de Controle.....	41
4.2.	Função de Pertinência.....	41
4.2.1.	Funções de Pertinência de Entrada.....	42
4.2.2.	Funções de Pertinência de Saída	44
4.3.	Base de Regras.....	45
4.4.	Exemplo de Operação da Lógica Fuzzy no LabVIEW ®.....	47

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1.	Desempenho do Controlador Fuzzy em Problema do Tipo Regulador	50
5.1.1.	Perturbação com Aplicação de Água	50
5.1.2.	Perturbação com Aplicação de CMC	52
5.2.	Desempenho do Controlador Fuzzy em Problema do Tipo Servo	55
5.3.	Discussão dos Resultados	58
6	CONCLUSÕES.....	60
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
	APÊNDICE A – Programação no LabVIEW ®.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de uma soda rotativa.....	3
Figura 2. Fluxograma de processo de produção de fluido de perfuração.....	4
Figura 3. Peneira Vibratória.....	5
Figura 4. Hidrociclones – (a) Desander; (b) Desilter.....	5
Figura 5. Tanque de fluido de perfuração Off Shore.....	6
Figura 6. Bomba de recirculação (Mud Pump).....	6
Figura 7. Viscosímetro Fann 35A.....	7
Figura 8. Breve histórico de evolução da lógica fuzzy e aplicações.....	8
Figura 9. Exemplo de motoristas que violam o limite máximo de velocidade: Função de pertinência booleana.....	9
Figura 10. Exemplo de motoristas que violam o limite máximo de velocidade: Função de pertinência fuzzy.....	9
Figura 11. Função de pertinência triangular.....	10
Figura 12. Função de pertinência trapezoidal.....	11
Figura 13. Função de pertinência gaussiana.....	11
Figura 14. Função de pertinência sigmoideal.....	12
Figura 15. Função de pertinência sino.....	12
Figura 16. Estrutura de um Controlador Nebuloso.....	16
Figura 17. Função de pertinência – exemplo temperatura.....	17
Figura 18. Modelo clássico de Mamdani.....	18
Figura 19. Modelo clássico de Larsen.....	19
Figura 20. Unidade de filtração com operação automática.....	23
Figura 21. Diagrama P&ID da unidade de filtração automática.....	24
Figura 22. Diagrama P&ID da unidade de preparo de fluidos de perfuração: 1) Alimentador de sólidos; 2) Tanque de mistura; 3) Bomba helicoidal; 4) Sensor de nível; 5) Medidor de densidade; 6) Transdutor de pressão; 7) Bomba dosadora de água; 8) Tanque de armazenam.....	24
Figura 23. Diagrama de Processo da unidade experimental.....	25
Figura 24. Diagrama de Processo da unidade experimental atualizada 2019.....	26
Figura 25. Foto da unidade de preparo de fluido de perfuração – Visão Superior.....	27
Figura 26. Foto da unidade de preparo de fluido de perfuração – Visão traseira.....	28
Figura 27. Bomba Helicoidal.....	28
Figura 28. Transmissor indicador de Pressão (PIT-04).....	29
Figura 29. Transmissor indicador de densidade (DIT-05) e Vazão (FIT-08).....	29
Figura 30. Tanque de mistura (a), Agitador mecânico (b) e Transmissor Indicador Nível (c).....	30
Figura 31. Bomba dosadora de água.....	30
Figura 32. Tanque de 1500L de água.....	30
Figura 33. Dosador de sólidos vibratório fabricante MVL.....	31
Figura 34. Quadros de comando e força da unidade experimental (acima) e seus interiores (abaixo).....	31
Figura 35. Viscosímetro tipo tubular - adaptado.....	32
Figura 36. Arranjo físico viscosímetro tipo tubular – Foto.....	32
Figura 37. Programação no software LabVIEW ® do controlador PID.....	34
Figura 38. Comparação entre viscosímetros on-line e de bancada Fann 35A.....	35
Figura 39. CLP National Instruments – Chassis Modular.....	36
Figura 40. Placa NI-DAQ de aquisição de dados.....	36
Figura 41. Quadro de comando com CLP instalado.....	37
Figura 42. Tela de supervisor elaborada para monitoramento e controle da unidade experimental.....	38

Figura 43. Loop de controle fuzzy.....	38
Figura 44. Procedimento experimental para controle da viscosidade efetiva.	39
Figura 45. Procedimento experimental para controle da viscosidade efetiva.	42
Figura 46. Funções de pertinência da viscosidade efetiva.....	43
Figura 47. Funções de pertinência de dM_i/dt	44
Figura 48. Funções de pertinência da bomba dosadora de água.	45
Figura 49. Funções de pertinência da dosagem de CMC.	45
Figura 50. Matriz de regras fuzzy da unidade experimental controle de viscosidade.....	46
Figura 51. Programação da base de regras no LabVIEW ®.	47
Figura 52. Teste de operação da lógica fuzzy em set point.	48
Figura 53. Teste de operação da lógica fuzzy abaixo do set point.	48
Figura 54. Teste de operação da lógica fuzzy acima do set point.	49
Figura 55. Gráfico de viscosidade e set point do teste regulador - perturbação com aplicação de água.....	51
Figura 56. Gráfico de dosagem de CMC e água do teste regulador - perturbação com aplicação de água.....	51
Figura 57. Gráfico com todas as variáveis medidas sobrepostas do teste regulador - perturbação com aplicação de água.....	52
Figura 58. Gráfico de viscosidade e set point do teste regulador - perturbação com aplicação de CMC.	53
Figura 59. Gráfico de dosagem de CMC e água do teste regulador - perturbação com aplicação de CMC.	54
Figura 60. Gráfico com todas as variáveis medidas sobrepostas do teste regulador - perturbação com aplicação de CMC.....	54
Figura 61. Gráfico de viscosidade e set point do teste problema do tipo servo	55
Figura 62. Gráfico de dosagem de CMC e água do teste problema tipo servo	56
Figura 63. Gráfico com todas as variáveis medidas sobrepostas de teste problema tipo servo – 1ª etapa.....	56
Figura 64. Gráfico com todas as variáveis medidas sobrepostas de teste problema tipo servo – 2ª etapa.....	57
Figura 65. Gráfico com todas as variáveis medidas sobrepostas do teste problema tipo servo.	58
Figura 66. Programação no LabVIEW - Sistema de aquisição de dados	66
Figura 67. Blocos do controlador fuzzy	66
Figura 68. Blocos responsáveis pela mudança no set point no teste servo	67
Figura 69. Algoritmo de cálculo em blocos da viscosidade.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Velocidades e funções de pertinência fuzzy de motoristas	9
Tabela 2. Variáveis de entrada da base de dados fuzzy.....	42
Tabela 3. Parametrização das funções de pertinência da entrada viscosidade.	42
Tabela 4. Parametrização das funções de pertinência taxa de variação da viscosidade.	43
Tabela 5. Variáveis de saída da base de dados fuzzy.	44
Tabela 6. Parametrização das funções de pertinência da dosagem de água.	44
Tabela 7. Parametrização das funções de pertinência da dosagem de CMC.....	45

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Rótulo linguístico, Alto
<i>a,b,c,d</i>	Parâmetros escalares das funções de pertinência
A1	Agitador 1
A2	Agitador 2
ATC	Aumento da temperatura corporal
B	Rótulo linguístico, Baixo
CLP	Controlado Lógico Programável
CMC	Carboximetilcelulose
CMS	Carboximetilamido
<i>C-o-A</i>	Método de <i>defuzzificação</i> , Centro da área
<i>C-o-G</i>	Método de <i>defuzzificação</i> , Centro da gravidade
<i>C-o-M</i>	Método de <i>defuzzificação</i> , Centro do máximo
CPU	Unidade Central de Processamento
DIT	Transmissor Indicador Densidade
dMi/dt	Rótulo linguístico, Taxa de Variação da Viscosidade
<i>E</i>	Erro (valor de <i>set-point</i> - valor medido)
FIT	Transmissor indicador de Vazão
H ₂ O	Água
HEC	Hidroxietilcelulose
IA	Inteligência Artificial
L	Comprimento entre dois pontos de medição do sensor diferencial de pressão.
LEF	Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani
LT	Transmissor Nível
<i>M</i>	Rótulo linguístico, Médio
MA	Rótulo linguístico, Muito Alto
MB	Rótulo linguístico, Muito Baixo
MN	Rótulo linguístico, Muito Negativo
<i>M-o-M</i>	Método de <i>defuzzificação</i> , Média do máximo
MP	Rótulo linguístico, Muito Positivo
N	Rótulo linguístico, Negativo
P	Purga
P	Rótulo linguístico, Positivo
P&ID	Tubulação e Diagrama de Instrumentação
PDT	Transmissor diferencial de pressão
PI	Proporcional-integral
PID	Proporcional-integral-derivativo
PIT	Transmissor indicador Pressão
PMP 01	Bomba Dosadora de Água
PMP 02	Bomba Helicoidal
PT	Transmissor Pressão
Q	Vazão volumétrica;
R	Raio;
<i>s</i>	Operador s-norma
SIF	Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i>
SP	Rótulo linguístico, <i>Set Point</i>
<i>T</i>	Constante de tempo
<i>t</i>	Operador t-norma
TT	Transmissor Temperatura

U	Variável manipulada no processo
$u(t)$	Sinal de saída do controlador
V	Volume
VDC	Tensão em Corrente Contínua
Y	Variável controlada no processo
Y_m	Valor medido da variável controlada no processo
Y_{sp}	Valor de referência da variável controlada no processo
ZERO	Rótulo linguístico, Zero
ΔE	Variação do erro
ΔP	Diferença de Pressão;
ΔU	Incremento da variável manipulada no processo

Letras gregas

$\mu_A(x)$	Função de pertinência de A
μ_A	Grau de pertinência de A
μ_{out}	Termo de saída <i>fuzzy</i>
μ_{ef}	Viscosidade efetiva;
γ	Taxa de escoamento
τ	Tensão de cisalhamento

RESUMO

FERRAZ, Rodrigo de Sousa Campista. **Modelagem e Controle Fuzzy da Viscosidade Aparente de Soluções de Carboximetilcelulose e Água**. 2019. 67p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

A perfuração de poços de petróleo envolve o uso dos fluidos de perfuração, que são substâncias complexas com uma mistura de sólidos, líquidos dentre outros aditivos. O fluido de perfuração assume aspectos de suspensão e dispersão coloidal de forma a garantir uma perfuração rápida e segura. A manutenção das propriedades físicas e químicas do fluido de perfuração é realizado de forma criteriosa, sendo a viscosidade uma das propriedades que deve ser constantemente monitorada e controlada. Atualmente o monitoramento é realizado com coleta de amostras no campo, ensaios de laboratório e a correção é feita manualmente por operadores especialistas do processo. A proposta deste trabalho foi desenvolver um sistema de monitoramento e controle da viscosidade efetiva do fluido de perfuração em tempo real. Para isto, foi realizado a construção de uma unidade experimental de preparação de fluidos de perfuração, que é composta por tanque de mistura, bomba para recirculação do fluido de perfuração, dosadores de sólidos e bomba dosadora de água. A instrumentação é composta por sensores de medição de nível, temperatura, vazão, densidade e para monitoramento da viscosidade foi construído um viscosímetro tubular. O sistema de aquisição de dados é constituído de um controlador lógico programável (CLP) da *National Instruments* com o uso do software supervisorio *LabVIEW®*, onde por meio dos sinais de medição vindo dos instrumentos, é processado na CPU a lógica de controle, atualizada as saídas para os dosadores de sólidos e líquido que farão o controle da viscosidade efetiva do fluido de perfuração. A estratégia de controle utilizada neste trabalho foi a Lógica *Fuzzy*, com método de inferência Mamdani, dos quais tem como fundamento a possibilidade de transferir as informações linguísticas do conhecimento dos operadores especialistas do processo, para a linguagem do domínio da máquina, estabelecendo assim a base de conhecimento do controlador *fuzzy*. Foram realizados testes de controle em problemas do tipo regulador e servo. A avaliação do desempenho foi realizada pela observação dos tempos de subida, acomodação, *off-set* e estabilidade. Os resultados mostraram o funcionamento satisfatório do controlador *fuzzy* na manutenção da viscosidade efetiva do fluido de perfuração e comprovou ser uma ferramenta de grande potencial no controle da viscosidade *on line* no preparo e controle de propriedades de fluidos de perfuração.

Palavras-chave: viscosidade, *fuzzy*, sistema supervisorio, controle nebuloso, fluido de perfuração

ABSTRACT

FERRAZ, Rodrigo de Sousa Campista. *Fuzzy Modeling and Control of Apparent Viscosity Carboxymethylcellulosis and Water Solutions*. 2019. 67p. Dissertation (Master in Chemical Engineering, Chemical Technology). Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

Oil well drilling involves the use of drilling fluids, which are complex substances with a mixture of solids, liquids and other additives. The drilling fluid assumes suspension and colloidal dispersion aspects to ensure fast and safe drilling. The maintenance of the physical and chemical properties of the drilling fluid is carefully performed, and viscosity is one of the properties that must be constantly monitored and controlled. Monitoring is currently performed with field sampling, laboratory testing and correction is done manually by expert process operators. The purpose of this work was to develop a real-time drilling fluid viscosity monitoring and control system. For this, the construction of an experimental drilling fluid preparation unit was carried out, which consists of a mixing tank, drilling fluid recirculation pump, solid vibratory feeders and water metering pump. The instrumentation is composed of sensors for measuring level, temperature, flow, density and for viscosity monitoring a tubular viscometer was built. The data acquisition system consists of a National Instruments programmable logic controller (PLC) using the *LabVIEW*® supervisory software, where through the measurement signals coming from the instruments, the control logic is processed in the CPU, updated the outputs. for solid and liquid feeders that will control the effective viscosity of the drilling fluid. The control strategy used in this work was the *Fuzzy Logic*, with Mamdani inference method, which is based on the possibility of transferring the linguistic information from the expert process operator's knowledge to the machine domain language, thus establishing the basis *fuzzy* controller knowledge. Control tests were performed on regulator and servo problems. Performance evaluation was performed by observing rise, accommodation, off-set and stability times. The results showed the satisfactory operation of the *fuzzy* controller in maintaining the effective drilling fluid viscosity in preparation and control of drilling fluid properties.

Keyword: viscosity, *fuzzy*, supervisory system, *fuzzy* control, drilling fluid

1 INTRODUÇÃO

A perfuração de um poço de petróleo é realizada por meio de uma sonda, onde as rochas são perfuradas por uma broca presa a uma coluna de perfuração. O fluido de perfuração é injetado por sistemas de bombeamento no interior dos tubos e retorna com os fragmentos das rochas pelo espaço anular entre o tubo e as paredes do poço.

A manutenção dos parâmetros reológicos, em especial, a viscosidade, tem grande importância para auxiliar no cálculo de perdas de carga na tubulação, na determinação da velocidade de transporte dos cascalhos, nas forças géis (que fazem parte dos parâmetros reológicos) por indicarem o grau de gelificação de um fluido de perfuração, e fornecem informações sobre a resistência de um fluido em reiniciar o seu escoamento após um período de repouso das atividades de perfuração GUIMARÃES & ROSSI (2007).

Atualmente as atividades de correção da viscosidade, dentre outras propriedades, em uma estação de tratamento de fluidos de perfuração é realizada medindo-se esta variável em ensaios de laboratório, e após os resultados obtidos, os operadores especialistas do processo realizam manualmente a dosagem necessária dos aditivos.

Este trabalho propõe a produção de fluido de perfuração a base de água, com adição de carboximetilcelulose (CMC) como principal aditivo viscosificante do fluido de perfuração. O fluido foi produzido por um processo automatizado composto por um tanque de mistura, dosador de sólidos controlados por um sistema de monitoramento e controle em tempo real.

Em uma unidade experimental construída para controle da densidade, foi realizada a adaptação dos sistemas de tubulações de escoamento dos fluidos, revisão da parte elétrica, adicionados sensores para a medição da viscosidade e dosador para adição de viscosificante, constituindo-se assim, um meio físico para a modelagem e controle da viscosidade do fluido de perfuração em tempo real.

O fluido de perfuração a base de água apresenta um comportamento reológico em que o uso de controle convencional, baseado na teoria de controle clássico, é limitado para este processo que se caracteriza por ser não linear, variante no tempo e com elevado tempo morto.

O uso da modelagem matemática considera a linearização e a invariância no tempo, onde pelo uso desta técnica, encontra-se diversas dificuldades de se obter um modelo significativo e realista do processo de produção do fluido de perfuração.

O desenvolvimento de técnicas de Inteligência Artificial (IA) nos últimos anos tem sido relevante para o desenvolvimento de pesquisas na área de controle de processos, e aos poucos, começam a ser implementadas em plantas industriais com enorme sucesso, como é o caso do controle *fuzzy* (LEITE, 2007).

Os sistemas *fuzzy* possibilitam transferir a linguagem e o conhecimento humano para um sistema de controle, onde pode-se apresentar um comportamento de raciocínio dedutivo, isto é, tomar decisões baseadas no conhecimento especialista dos operadores do processo, tendo como vantagens operar em processos não lineares e variantes no tempo.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um controlador *fuzzy* para o preparo de fluido de perfuração, com o controle e monitoramento em tempo real da propriedade física da viscosidade em tanque de mistura, onde para tal objetivo, foi necessário a adaptação e montagem de uma unidade experimental, automatizada com sistema supervisorio de controle da variável viscosidade.

Este trabalho é composto por sete capítulos.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura e apresenta os sistemas de operação de perfuração, bombeamento e tratamento do fluido de perfuração, além de reunir trabalhos relacionados ao uso da tecnologia *fuzzy* para controle de processos.

O capítulo 3 apresenta a unidade experimental utilizada para o controle da viscosidade do fluido de perfuração, e a montagem do sensor de viscosidade tubular.

O capítulo 4 apresenta a estratégia de controle *fuzzy* utilizada para o controle dos parâmetros reológicos do fluido de perfuração

O capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com o uso do controlador *fuzzy* na unidade experimental.

O capítulo 6 a conclusão, e no capítulo 7 é dado sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Primeiramente apresenta-se um sistema de operação de perfuração de poços de petróleo e a operação de uma unidade de circulação e tratamento de fluido de perfuração, onde é possível se observar a importância da manutenção da viscosidade dentro de parâmetros operacionais. Destaca-se a característica pseudoplástica do fluido de perfuração que o torna capaz de elevar os cascalhos do fundo de poço, e mediante a uma parada no processo de perfuração, as forças géis mantém os sólidos em suspensão.

A proposta deste trabalho é projetar um sistema de controle *fuzzy* para o controle da variável viscosidade do fluido de perfuração. Para tanto, realiza-se neste capítulo a revisão da literatura a fim de se apresentar trabalhos desenvolvidos relacionados ao uso da tecnologia *fuzzy*, em aplicações de controle de pressão e temperatura. Na área de fluidos de perfuração para o setor de petróleo foi encontrado somente o trabalho de RACHID (2018) dos quais este presente trabalho dá continuidade a pesquisa com lógica *fuzzy* do Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani – LEF, na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ.

2.1. Perfuração de Poços de Petróleo

A perfuração de um poço de petróleo se dá pela ação de uma broca que perfura as rochas. Essa broca é presa a uma coluna que são os tubos de perfuração e os comandos. As rochas fragmentadas são elevadas a superfície pelo fluido de perfuração que é injetado por dentro da coluna de perfuração e retorna pelo espaço anular entre a coluna e as paredes do poço. Após esta etapa a coluna de perfuração é retirada e desce a coluna de revestimento de diâmetro inferior ao da broca. O espaço entre as paredes do poço e o tubo de revestimento é cimentado. Isso dá ao poço a condição de operação com segurança, podendo então descer novamente a coluna de perfuração dando continuidade a perfuração do poço. Um poço de petróleo possui diversas fases de perfuração, sendo utilizadas brocas de diferentes diâmetros. THOMAS (2001). A figura 1 ilustra o sistema de perfuração.

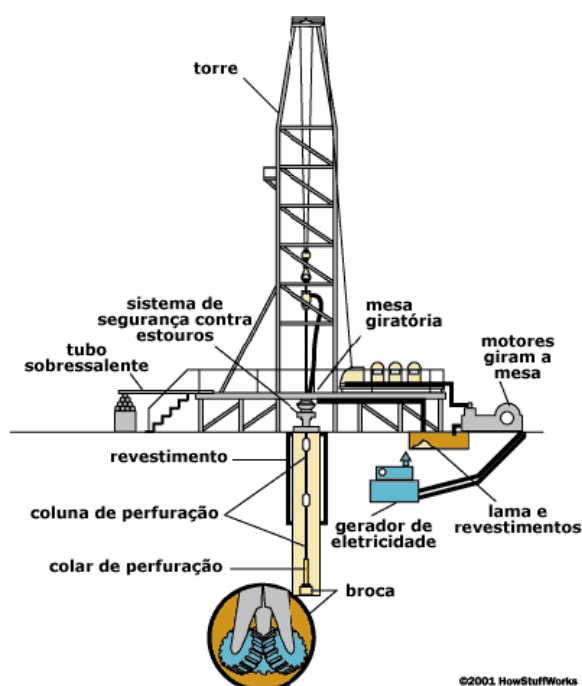


Figura 1. Esquema de uma sonda rotativa.

Fonte: GODOI; CARNIER, 2010

2.2. Fluidos de Perfuração

Segundo Guimarães e Rossi (2007), nas atividades petrolíferas, os fluidos de perfuração têm importância fundamental.

Dentre as inúmeras funções dos fluidos, destacam-se: a capacidade de transportar o sólido gerado no fundo do poço e permitir a sua separação na superfície; refrigerar e lubrificar a broca e a coluna de perfuração; manter a estabilidade do poço por meio do controle das pressões das camadas perfuradas; manter os cascalhos em suspensão durante as paradas na circulação (CAENN e CHILLINGAR, 1996).

Para controle da viscosidade utilizam-se aditivos que podem ser classificados em naturais (gomas) e os modificados. Dentre os polímeros modificados, os mais utilizados são o CMC (carboximetilcelulose), HEC (hidroxietilcelulose) e o CMS (carboximetilamido) BISPO (2014).

O presente trabalho foi desenvolvido utilizando-se o CMC como viscosificante do fluido de perfuração.

Na figura 2 é apresentado um esquema de fluxo de uma unidade de perfuração, circulação e tratamento do fluido de perfuração.

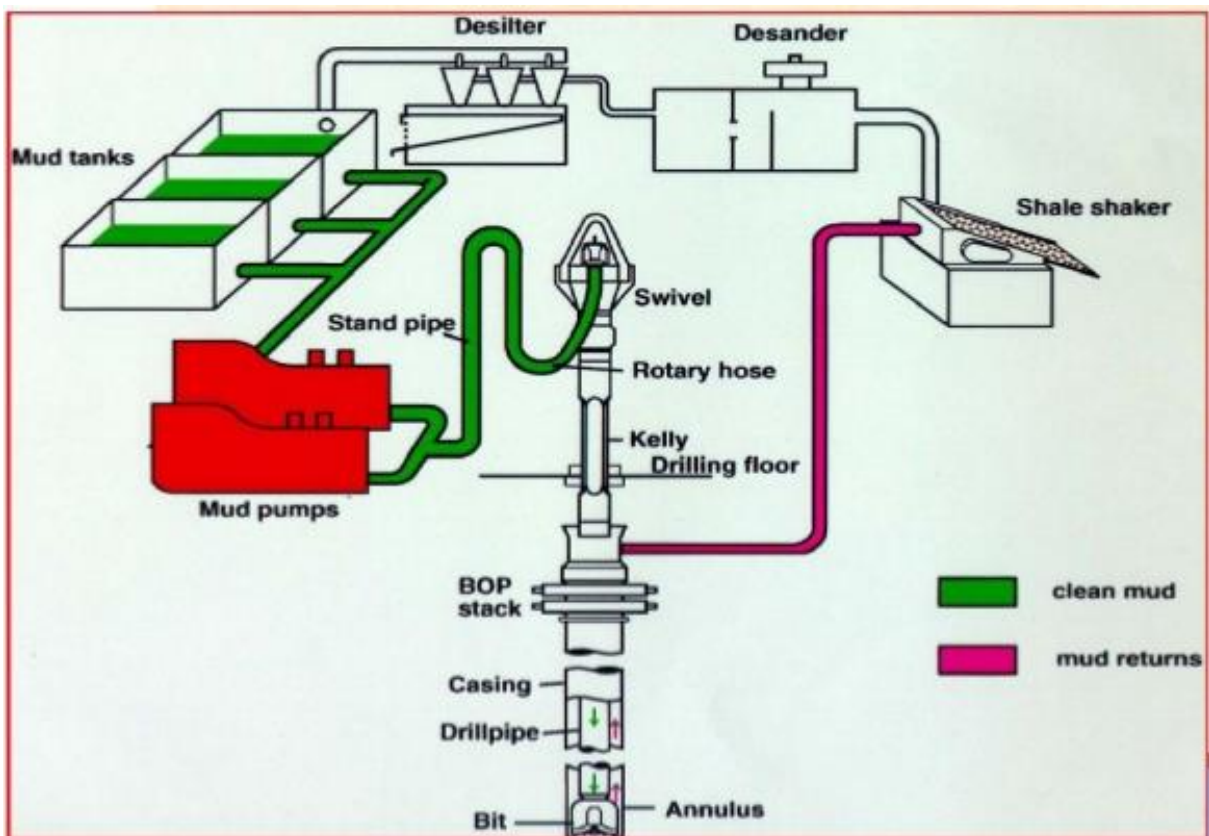


Figura 2. Fluxograma de processo de produção de fluido de perfuração

Fonte: ROSENANI, 2014

O fluido de retorno do poço com os fragmentos de rochas desloca-se por etapas de peneiramento de diversas granulometrias. Neste momento, são descritas as etapas ilustradas na figura 2.

Com o objetivo de separar os sólidos de maior granulometria, a peneira vibratória (*shale shaker*) é o primeiro estágio de separação de sólidos, como ilustrado na figura 3.



Figura 3. Peneira Vibratória
Fonte: GN Solids Control, 2010

Outras duas etapas de separação granulométrica de sólidos são os hidrociclones (*desander e desilter*) que podem separar sólidos da ordem de micron e do silte. As figuras 4 (a) e 4 (b) ilustram os separadores de sólidos por hidrociclones.

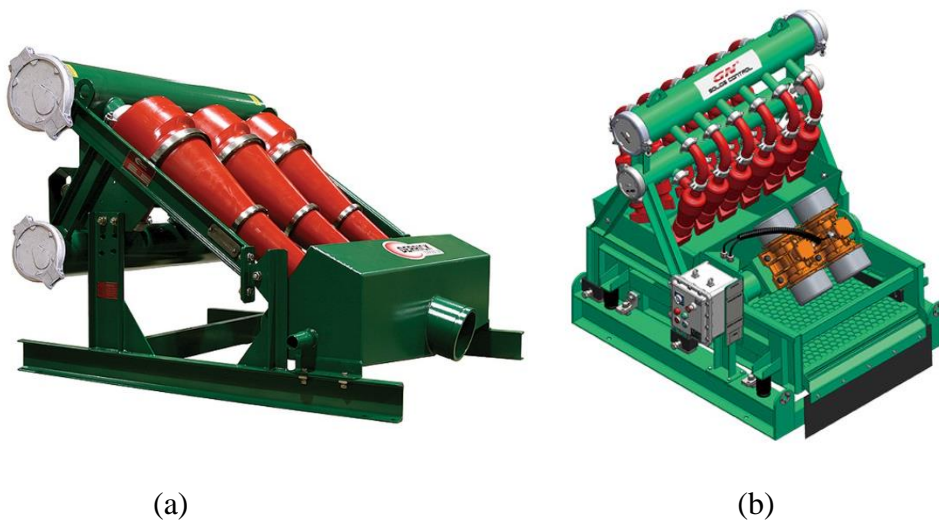


Figura 4. Hidrociclones – (a) Desander; (b) Desilter
Fonte: DERRICK, 2018

A próxima etapa, são os tanques de tratamento e armazenamento do fluido de preparação (*mud tanks*). É nesta etapa onde são coletadas as informações das propriedades químicas e físicas do fluido de perfuração, afim de se tomar ações de correção para retornar aos parâmetros iniciais e ser reutilizado no próprio poço de perfuração. A figura 5 ilustra um tanque de fluido de perfuração.



Figura 5. Tanque de fluido de perfuração Off Shore
Fonte: INDIAMART, 2018

Após realizadas as ações de correção das propriedades químicas e físicas do fluido de perfuração, pode-se retorna-lo a operação de perfuração do poço de petróleo pelas bombas de “lama” (*mud pump*). A figura 6 ilustra um equipamento de bombeamento de fluido de perfuração.



Figura 6. Bomba de recirculação (Mud Pump)
Fonte: SCHLUMBERGER, 2018

2.2.1. Medição da viscosidade em laboratório

Segundo Shiroma (2012), a fim de se determinar as propriedades de um fluido são realizados ensaios em equipamentos que permitem investigar as características materiais do fluido a partir de medições de tensão e deformação.

Os viscosímetros e reômetros são os equipamentos utilizados para medição das propriedades reológicas dos fluidos de perfuração.

Foi utilizado no presente trabalho o viscosímetro Fann 35A para medição da viscosidade aparente, conforme ilustrado na figura 7.



Figura 7. Viscosímetro Fann 35A
Fonte: FANN, 2016

Pode-se determinar a viscosidade aparente dos fluidos de perfuração em diferentes velocidades de rotação, Ω , e pela leitura de ângulo de deformação da mola, ' θ ', conforme mostrado na equação (2.1) fornecida pelo fabricante.

$$\mu_{ap} = \frac{300x\theta}{\Omega} \quad (2.1)$$

2.3. Lógica Fuzzy

O princípio da bivalência é a forma clássica de como as máquinas trabalham as variáveis de entrada e saída. A lógica de Boole e a tabela verdade, se propõem a simular entradas para obter respostas verdadeiras ou falsas. Conforme este princípio, os valores entre 0 e 1 são excluídos como repostas de um sistema.

Por outro lado, os sistemas inteligentes fornecem soluções apropriadas como resposta as situações problema apresentadas em sua entrada. A inteligência artificial está associada a comparação de uma pessoa que reconhece padrões, toma decisão e cumpre determinada atividade.

Considerando a existência de inúmeras possibilidades de repostas entre o '1' e o '0' (zero), a lógica *fuzzy* também chamada de lógica nebulosa ou difusa, trata dos graus de incerteza e de possibilidade do pensamento humano.

A lógica *fuzzy* é uma técnica que incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle (SHAW & SIMÕES, 2007).

Conforme o foco do presente trabalho, os operadores humanos do processo de produção e correção das propriedades reológicas do fluido de perfuração, lidam com um processo multivariável, de comportamento não linear, com tempo morto elevado e variante no tempo, baseados na experiência e na inferência do comportamento das variáveis do fluido de perfuração.

A lógica *fuzzy* pode capturar este conhecimento em um controlador *fuzzy*, possibilitando a implementação de um controlador computacional com desempenho equivalente ao do operador humano (SHAW & SIMÕES, 2007).

Em 1965, Lofti Zadeh publicou o artigo *Fuzzy Sets*, que ficou reconhecido como a origem da Lógica *Fuzzy*, onde foram definidas as ideias básicas dos conjuntos *fuzzy*, que trata o aspecto vago da informação, e operações entre conjuntos *fuzzy*, como união, interseção, inclusão, complemento, relação e convexidade (ZADEH, 1965).

A figura 8 ilustra um breve histórico da evolução da lógica *fuzzy*.

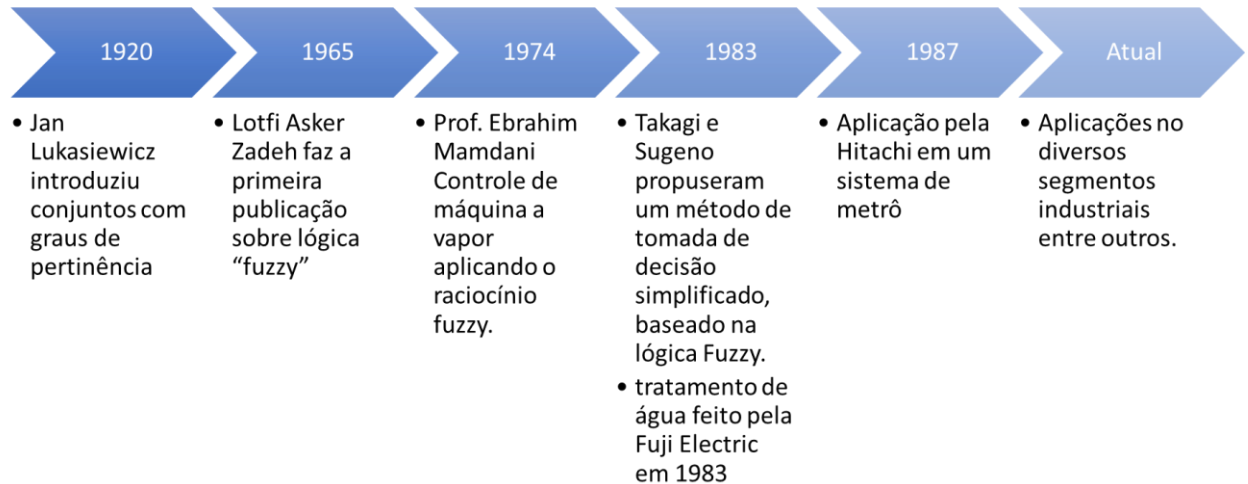


Figura 8. Breve histórico de evolução da lógica *fuzzy* e aplicações

Fonte: própria

2.3.1. Conjuntos *Fuzzy*

A teoria dos conjuntos nebulosos foi desenvolvida a partir de 1965 com os trabalhos de Lotfi Zadeh, professor na Universidade da Califórnia em Berkeley (SANDRI & CORREIA, 1999).

O básico sobre a teoria de conjuntos é a pertinência de um elemento x em um conjunto A , representada pelo símbolo ϵ :

$$x \in A \quad (2.2)$$

A função de pertinência de x no conjunto A é indicado conforme equação 2.3, sendo $\mu_A(x)$ uma função bivalente:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (2.3)$$

A propriedade fundamental da lógica convencional, ou booleana, é que a função de pertinência é bivalente. (SHAW & SIMÕES, 2007).

A figura 9 e 10 nos mostra uma comparação entre a função de pertinência bivalente e a multivalente. Na função bivalente os motoristas que ultrapassarem os 80 km/h são considerados infratores, simbolizado pela função de pertinência $\mu_A(x) = 1$. Já os motoristas que ficaram abaixo da velocidade limite de 80 km/h, não pertencem ao conjunto A , simbolizados por $\mu_A(x) = 0$, como ilustrado na figura 9.

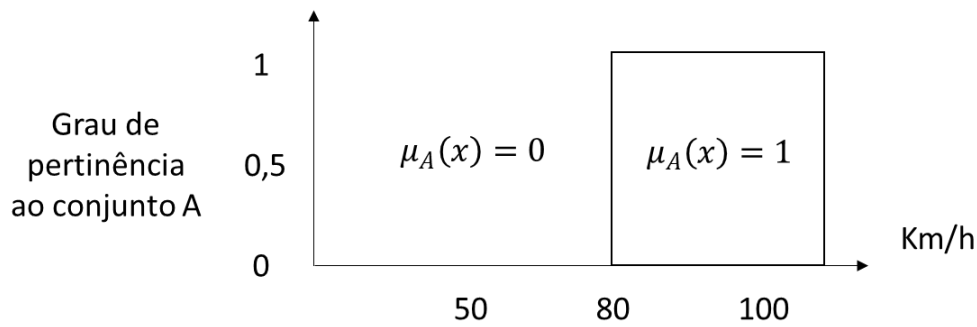


Figura 9. Exemplo de motoristas que violam o limite máximo de velocidade: Função de pertinência booleana

Fonte: SHAW & SIMÕES, 2007.

Na prática, os radares possuem um percentual de imprecisão, dos quais são considerados para emissão das infrações de trânsito, e os motoristas que estiverem um pouco acima dos 80km/h não necessariamente serão multados. A figura 9 ilustra a função de pertinência multivalente.

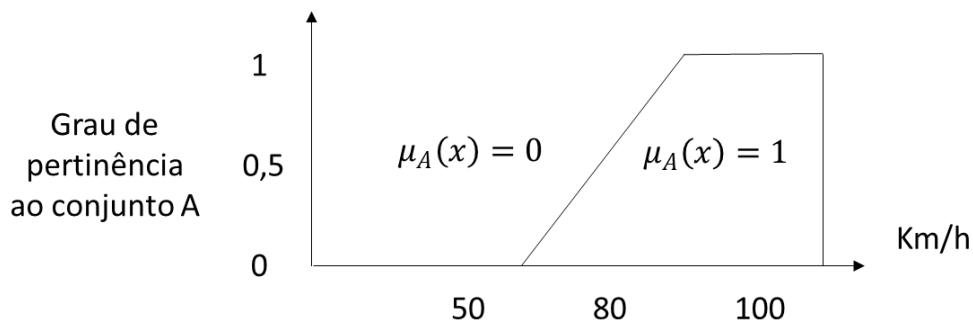


Figura 10. Exemplo de motoristas que violam o limite máximo de velocidade: Função de pertinência *fuzzy*

Fonte: SHAW & SIMÕES, 2007.

Registrando-se a velocidade de seis motoristas (tabela 1), e suas respectivas funções de pertinência ao grupo de infratores, pode-se notar que para uma função de pertinência *fuzzy* somente o motorista x_6 será multado.

Tabela 1. Velocidades e funções de pertinência *fuzzy* de motoristas

Velocidade dos Motoristas (km/h)	Funções de pertinência
$x_1 = 78,0$	$\mu_A(x_1) = 0,0$
$x_2 = 80,0$	$\mu_A(x_2) = 0,2$
$x_3 = 82,0$	$\mu_A(x_3) = 0,4$
$x_4 = 84,0$	$\mu_A(x_4) = 0,6$
$x_5 = 86,5$	$\mu_A(x_5) = 0,8$
$x_6 = 88,0$	$\mu_A(x_6) = 1,0$

Fonte: SHAW & SIMÕES, 2007.

A propriedade fundamental da lógica *fuzzy* é que a função de pertinência $\mu_A(x)$ possui todos os valores dentro do intervalo $[0,1]$. Isso significa que um elemento pode ser membro parcialmente de um conjunto, indicado por um fracionário dentro do intervalo numérico (SHAW & SIMÕES, 2007).

As principais funções de pertinência e suas funções matemáticas são apresentadas a seguir.

A função de pertinência triangular é ilustrada na figura 11, onde a , b e c são parâmetros escalares que representam os vértices do triângulo.

$$\mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2.4)$$

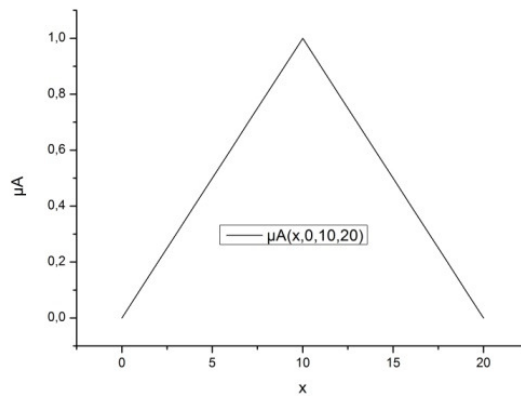


Figura 11. Função de pertinência triangular
Fonte: RACHID, 2018.

A Figura 12 ilustra a função trapezoidal, onde a , b , c e d são os quatro vértices do trapézio.

$$\mu_A(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2.5)$$

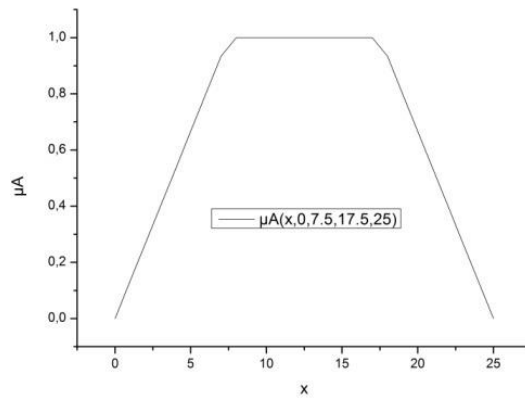


Figura 12. Função de pertinência trapezoidal
Fonte: RACHID, 2018.

A média c e o desvio padrão σ , são dois parâmetros que a função gaussiana possui, sendo definida por:

$$\mu_A(x, \sigma, c) = \exp\left[\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.6)$$

A figura 13 apresenta a representação da curva gaussiana.

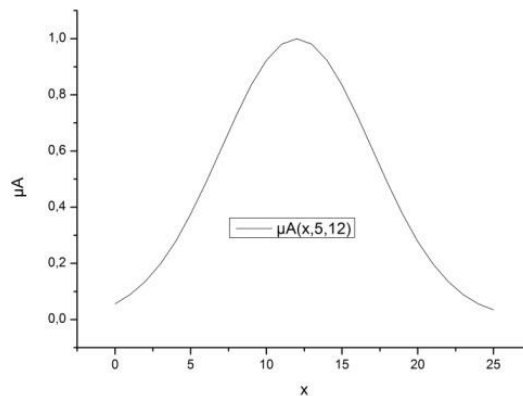


Figura 13. Função de pertinência gaussiana
Fonte: RACHID, 2018.

A figura 14 apresenta a função sigmoidal, que possui os parâmetros a e c , onde a é o parâmetro de inclinação e c é o ponto de inflexão da curva.

$$\mu_A(x, a, c) = \left[\frac{1}{1 + \exp(-a(x - c))} \right] \quad (2.7)$$

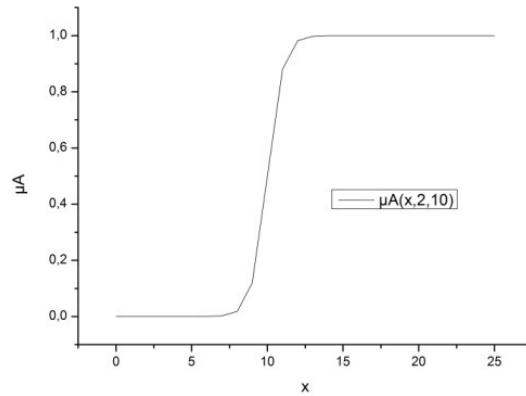


Figura 14. Função de pertinência sigmoideal
Fonte: RACHID, 2018.

A função sino possui três parâmetros a , b , e c , no qual 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 apresentada na Figura 15.

$$\mu_A(x, a, b, c) = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{x - c}{a} \right)^{2b}} \right] \quad (2.8)$$

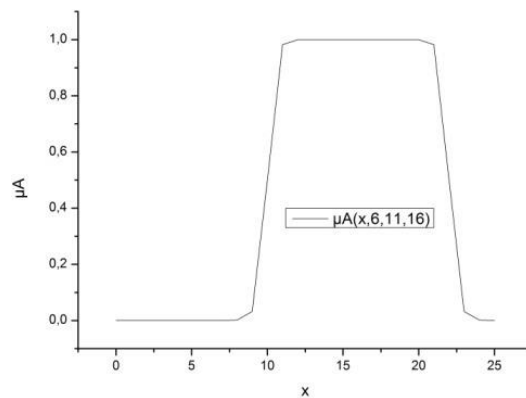


Figura 15. Função de pertinência sino
Fonte: RACHID, 2018.

2.3.2. Aspectos da Lógica Fuzzy

Segundo Barros e Bassanezi (Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática, 2006), “o principal sucesso da lógica fuzzy é devido ao seu caráter prático, já que possibilita conclusões a partir de proposições incertas”. Um exemplo de uma sentença em que se reconhece uma tomada de decisão a partir de uma premissa incerta é

(*) *Se a viscosidade é muito baixa e a taxa de variação da viscosidade é positiva então o nível de água deve ser zero e o nível de CMC deve ser baixo.*

A lógica clássica se realiza através de conectores “e”, “ou” e “não” e de implicações “se então...” criando sentenças com o formato geral:

Se V está no conjunto MB e dV está em P então H está em Z ou CMC está em B.

Tais conectores são definidos através de tabelas verdade.

Se admitirmos que os conjuntos de uma sentença sejam conjuntos fuzzy, como, por exemplo, MB é um conjunto fuzzy que traduz uma viscosidade muito baixa, então as sentenças lógicas precisam ter seus conectores e implicações redefinidos.

Lembrando que a definição das funções de pertinência de conjuntos fuzzy tem os seguintes conceitos envolvidos:

- um conjunto U clássico, por vezes chamado de *universo do discurso*, que aqui pode ser o conjunto que abrange as medidas envolvidas, ou seja, um subconjunto dos números reais;
- F é um subconjunto fuzzy;

e assim a função de pertinência do conjunto F será uma função do tipo: $\mu_F: U \rightarrow [0,1]$, como as trapezoidais, triangulares e demais já vistas aqui.

Na sentença 2.9 a expressão “viscosidade é muito baixa”, como detalhado mais adiante, informa que ela pertence ao conjunto fuzzy dado pela função de pertinência

$$\mu_{MB}(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq 0 \\ 1, & \text{se } 0 \leq x \leq 10 \\ \frac{20-x}{10}, & \text{se } 10 \leq x \leq 20 \\ 0, & \text{se } x \geq 20 \end{cases}, \quad (2.9)$$

enquanto que a expressão “taxa de variação é positiva” informa que ela pertence ao conjunto fuzzy dado pela função de pertinência

$$\mu_P(x) = \begin{cases} 0, & \text{sex} \leq 0,02 \\ \frac{x-0,02}{0,067-0,02}, & \text{se } 0,02 \leq x \leq 0,067 \\ \frac{1,33-y}{1,33-0,067}, & \text{se } 0,067 \leq x \leq 1,33 \\ 0, & \text{sex} \geq 1,33 \end{cases}. \quad (2.10)$$

Na construção dos conectores da lógica fuzzy o que ocorre, de fato, é uma extensão do que existia na lógica 0 e 1. Um detalhamento deste tema pode ser encontrado em Barros e Bassanezi (2006). Tais extensões ocorrem a partir das definições das normas e conormas.

A operação de t-norma constrói a definição do conector “e” e, no contexto deste trabalho, é considerada a t-norma:

$$\Delta: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (2.11)$$

$$(z_1, z_2) \rightarrow z_1 \Delta z_2 = \min\{z_1, z_2\}. \quad (2.12)$$

Assim a expressão “a viscosidade é muito baixa e a taxa de variação da viscosidade é positiva” se traduz na lógica fuzzy através da operação

$$\mu_{MB}(x) \Delta \mu_P(x) = \mu_{MB \cap P}(x) = \min\{\mu_{MB}(x), \mu_P(x)\}. \quad (2.13)$$

Uma t-norma deve cumprir as seguintes propriedades:

Condições de contorno:

$$1. \quad z_1 \Delta 0 = 0, \forall z_1 \in [0,1]; \quad (2.14)$$

$$2. \quad z_1 \Delta 1 = z_1, \forall z_1 \in [0,1]; \quad (2.15)$$

Comutatividade:

$$3. \quad z_1 \Delta z_2 = z_2 \Delta z_1; \quad (2.16)$$

Associatividade:

$$4. \quad (z_1 \Delta z_2) \Delta z_3 = z_1 \Delta (z_2 \Delta z_3); \quad (2.17)$$

Monotonicidade:

$$5. \quad \text{Se } z_1 \leq z_2 \text{ e } z_3 \leq z_4 \text{ então } z_1 \Delta z_3 \leq z_2 \Delta z_4; \quad (2.18)$$

A operação de t-conorma constrói a definição do conector “*ou*” e , no contexto deste trabalho, é considerada a t-conorma:

$$\nabla: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (2.19)$$

$$(z_1, z_2) \rightarrow z_1 \nabla z_2 = \max\{z_1, z_2\}. \quad (2.20)$$

Assim a expressão “*a viscosidade é muito baixa ou a taxa de variação da viscosidade é positiva*” se traduz na lógica fuzzy através da operação

$$\mu_{MB}(x) \nabla \mu_P(x) = \mu_{MB \cup P}(x) = \max\{\mu_{MB}(x), \mu_P(x)\}. \quad (2.21)$$

Uma t-conorma deve cumprir as seguintes propriedades:

Condições de contorno:

$$1. \quad z_1 \nabla 0 = z_1, \forall z_1 \in [0,1]; \quad (2.22)$$

$$2. \quad z_1 \nabla 1 = 1, \forall z_1 \in [0,1]; \quad (2.23)$$

Comutatividade:

$$3. \quad z_1 \nabla z_2 = z_2 \nabla z_1; \quad (2.24)$$

Associatividade:

$$4. \quad (z_1 \nabla z_2) \nabla z_3 = z_1 \nabla (z_2 \nabla z_3); \quad (2.25)$$

Monotonicidade:

$$5. \quad \text{Se } z_1 \leq z_2 \text{ e } z_3 \leq z_4 \text{ então } z_1 \nabla z_3 \leq z_2 \nabla z_4; \quad (2.26)$$

Uma negação pode ser definida através do complemento, isto é,

$$\eta: [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (2.27)$$

$$z \rightarrow \eta(z) = 1 - z. \quad (2.28)$$

Assim, para a função de pertinência do conjunto fuzzy F dada por μ_F , define-se a função de pertinência para o conjunto fuzzy que seja a negação de F representado por F' por

$$\mu_{F'}(x) = 1 - \mu_F(x). \quad (2.29)$$

2.3.3. Controlador *Fuzzy*

A estrutura básica de um controlador *fuzzy* é ilustrada na figura 16, onde se enfatizam os seguintes blocos funcionais:

- Interface de fuzzificação;
- base de conhecimento;
- procedimento de inferência (lógica e tomada de decisões);
- interface de desfuzzificação.

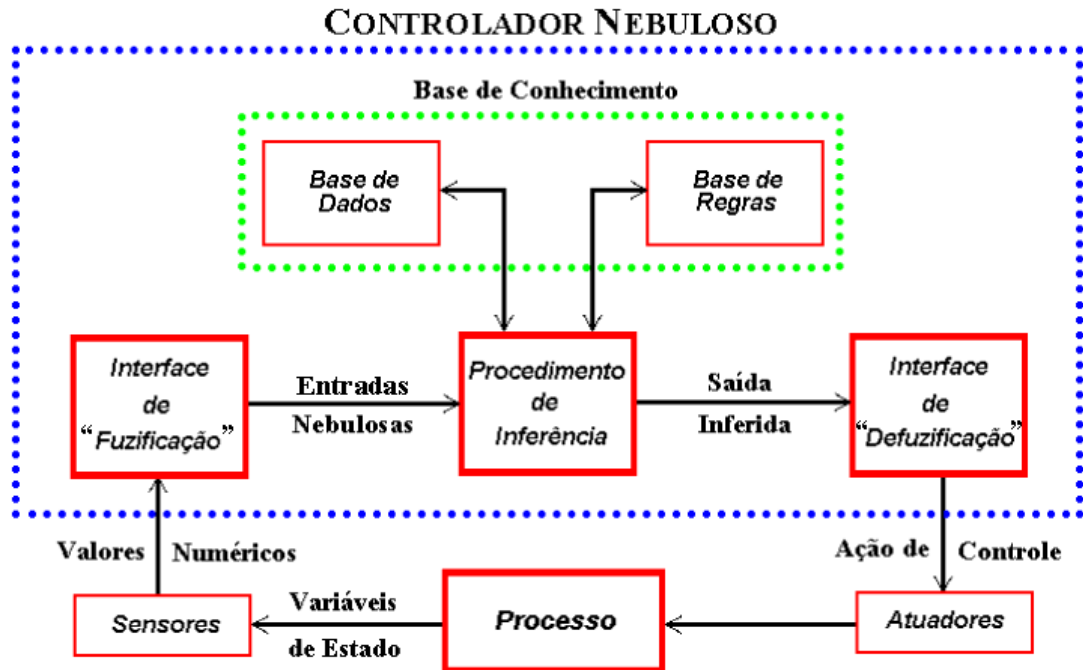


Figura 16. Estrutura de um Controlador Nebuloso
Fonte: (SANDRI & CORREIA, 1999).

2.3.3.1. Funções da Interface de fuzzificação

A interface de fuzzyficação é responsável por transformar as variáveis do domínio de discurso do mundo, que utiliza números reais, para as variáveis do domínio *fuzzy*, que utiliza números *fuzzy*.

Sensores ou dispositivos computadorizados enviam sinais das grandezas físicas ou informações para interface de fuzzificação, onde são convertidos para linguagem *fuzzy* linguística.

As funções de pertinência geradas no processo de fuzzificação possuem amplitude vertical $[0,1]$, estão associadas a uma variável linguística e no eixo horizontal está o domínio de discurso dos números reais da variável temperatura, dado como exemplo na figura 17.

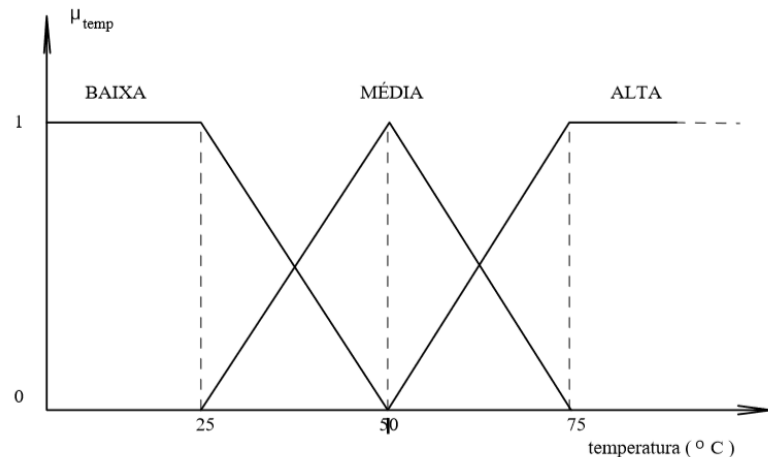


Figura 17. Função de pertinência – exemplo temperatura
 Fonte: (GOMIDE e GUDWIN, 1994).

O grau de precisão de um controlador *fuzzy* está associado ao número de conjuntos *fuzzy* (funções de pertinência) utilizadas no processo de fuzzificação, cabendo ao projetista do sistema de controle definir junto ao especialista do processo, quais variáveis e conjuntos *fuzzy* linguísticos a serem utilizados. Um número entre 2 e 7 conjuntos *fuzzy* linguísticos é um número prático.

Estudos demonstram que um aumento de 5 para 7 conjuntos *fuzzy* aumentam em 15% a precisão, entretanto, o aumento para além de 7 não tem contribuição significativa, aumentando assim o esforço computacional e processamento destes dados.

Outro fator é a superposição, um compromisso mínimo de 25% e máximo de 75% foram determinados experimentalmente como adequados, e um compromisso de 50% é razoável, pelo menos para uma aplicação em teste de controle em malha fechada. (SHAW & SIMÕES, 2007).

2.3.3.2. A Base de Conhecimento

A base de conhecimento é formada pela base de dados e pela base de regras *fuzzy*. Na base de dados estão armazenadas as variáveis discretas do universo de discurso em suas funções de pertinência. Na base de regras estão as estratégias e objetivos de controle que utilizam as funções de pertinência da base de dados para realizar as implicações lógicas por meio de um modelo de inferência.

A base de regras possui a estrutura conforme modelo abaixo:

Se <antecedente 1> **então** <consequente>

Considere o exemplo:

Se <temperatura da água: baixo> **então** <sistema aquecimento: alto>

O exemplo demonstra a estrutura da base de regras na utilização do termo “Se” temperatura da água estiver em nível baixo, sendo isto a condição (antecedente) e a implicação (então) é elevar o nível do sistema de aquecimento para ponto “alto”.

Para construção da base de regras com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), é possível a utilização dos operadores lógicos “E” e “OU” nas variáveis linguísticas do antecedente e do consequente.

As regras devem ser utilizadas tanto quanto necessárias, assim definidas no projeto de controle com entrevista do especialista do processo, utilizando-se para isto as variáveis linguísticas *fuzzy*.

2.3.3.3. Procedimento de Inferência

Tem por objetivo simular tomadas de decisão humana. Está incorporada na estrutura de inferência da base de regras. Na literatura encontra-se dois modelos de inferência, o clássico e o modelo baseado em interpolação.

No modelo clássico são encontrados dois métodos, de Mamdani e o de Larsen, enquanto no modelo de interpolação são os métodos de Takagi-Sugeno e o de Tsukamoto.

O modelo Mamdani de inferência se diferencia do modelo de Larsen, conforme mostrado nas equações 2.30 e 2.31.

$$T(a, b) = \min(a, b), I = \min(a, b) \text{ e } \nabla(a, b) = \max(a, b) - \text{Mamdani} \quad (2.30)$$

$$T(a, b) = a * b, I = a * b \text{ e } \nabla(a, b) = \max(a, b) - \text{Larsen} \quad (2.31)$$

O modelo de Mamdani utiliza a intercessão entre as áreas $I = \min(a, b)$ para inferência, conforme mostrado na figura 18, onde a função de pertinência A_1 e B_1 produzem C_1 , e A_2 e B_2 produzem C_2 . A agregação entre C_1 e C_2 é visto em C' , que utiliza o critério de área máxima, fazendo a superposição entre as áreas.

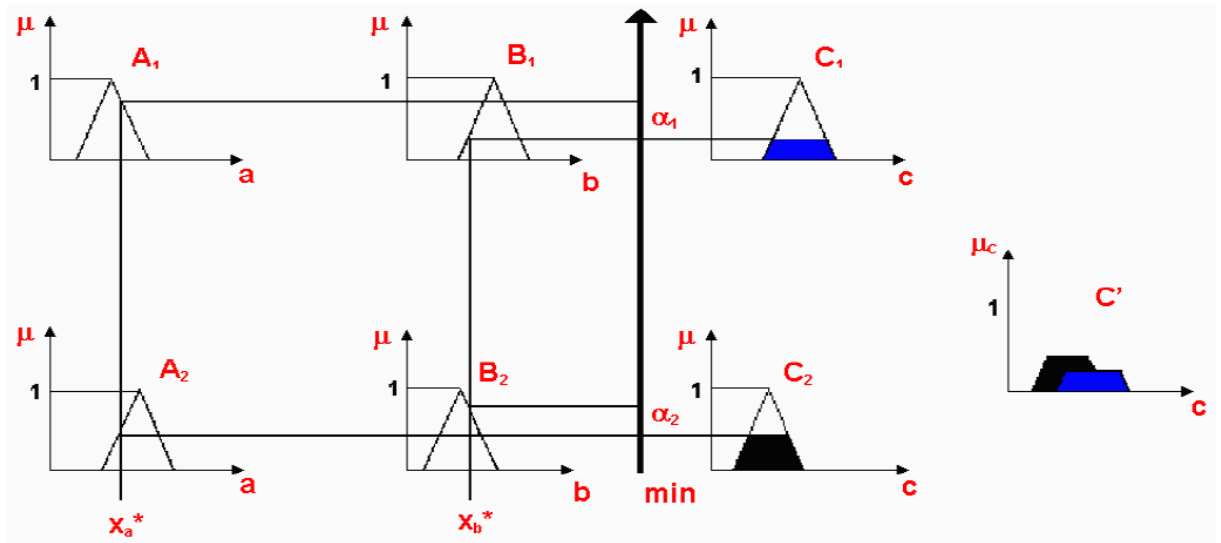


Figura 18. Modelo clássico de Mamdani.

Fonte: (SANDRI & CORREIA, 1999).

O modelo de Larsen se diferencia do modelo de Mamdani ao utilizar o valor do ponto máximo da intercessão entre áreas ($I = a * b$) para compor a inferência. A agregação entre os resultados C_1 e C_2 resultam na superposição de áreas em C' . Isto pode ser visto na figura 19.

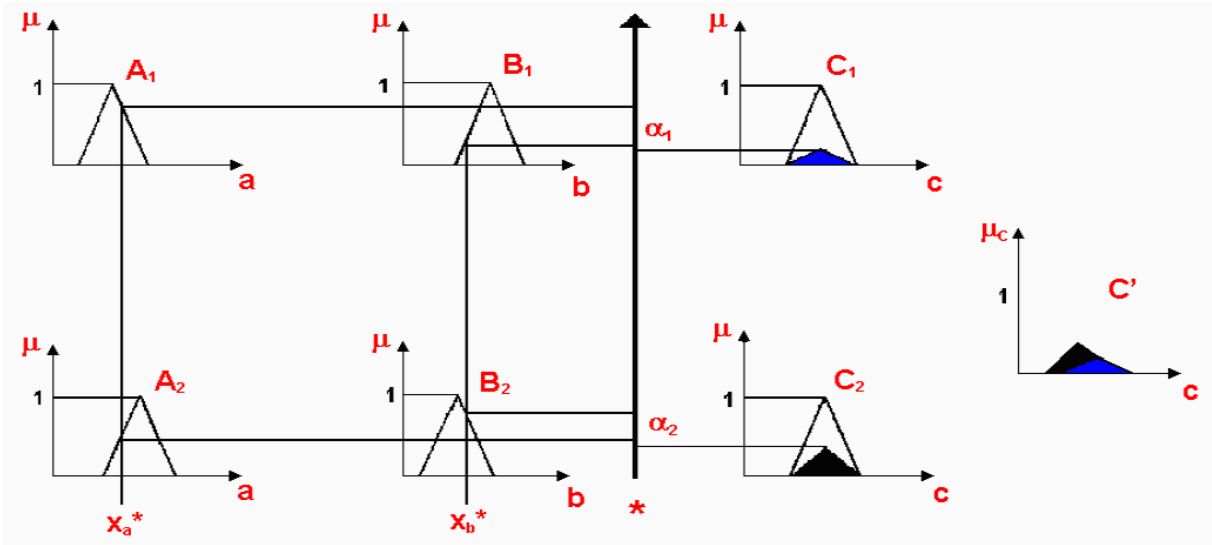


Figura 19. Modelo clássico de Larsen.
 Fonte: (SANDRI & CORREIA, 1999).

Segundo Rachid 2018, nos modelos de interpolação, cada conclusão é dada por uma função estritamente monotônica, usualmente diferente para cada regra.

O presente trabalho utiliza o modelo de Mamdani como método de inferência incorporado à base de regras *fuzzy*.

2.3.3.4. Interface de Defuzzificação

No processo de defuzzificação, os valores do domínio do universo *fuzzy* são convertidos para os valores discretos que utiliza os números reais. A defuzzificação pode ser obtida por meio destes métodos que são muito utilizados: (a) Centro da Área (*C-o-A*); (b) Centro do Máximo (*C-o-M*) e (c) Média do Máximo (*M-o-M*). Neste trabalho foi aplicado o método de defuzzificação *C-o-A*.

A defuzzificação pelo centro da área *C-o-A* ou também conhecido como centro de gravidade, é obtido pela equação 2.32, dos quais define a forma da saída do controlador *fuzzy*. Ele calcula o centróide, ou Centro de Área que é composta pela união de todas as contribuições das funções de pertinência das regras.

$$u^* = \frac{\sum_{j=1}^N u_i \mu_{OUT}(u_i)}{\sum_{j=1}^N \mu_{OUT}(u_i)} \quad (2.32)$$

Conforme Shaw e Simões (2007), $\mu_{OUT}(u_i)$ é a área de uma função de pertinência modificada pelo resultado da inferência *fuzzy*, u_i é a posição do centróide da função de pertinência individual; tal equação calcula o centróide composto, para o qual contribuem as duas funções de pertinência.

Erros podem ocorrer quando o método de defuzzificação pelo Centro de Área (*C-o-A*) for utilizado em funções de pertinência não estiverem em superposição ou quando mais de uma regra tiver o mesmo resultado, causando uma superposição que não será apropriadamente calculada.

2.3.3.5. Eficiência e Vantagens na Aplicação do Controle *Fuzzy*

Segundo Shaw e Simões (2007), as aplicações da estratégia de controle por lógica *fuzzy* tem maior eficiência quando implementadas devido aos seguintes pontos principais:

- As estratégias de controle *fuzzy* nascem da experiência e experimentos, em vez de modelos matemáticos. A implementação linguística é muito mais rápida e efetiva;
- as estratégias de controle *fuzzy* envolvem um grande número de entradas e saídas;
- comparadas com soluções convencionais de controle, a lógica *fuzzy* é frequentemente mais eficiente, ao se comparar a codificação e o tempo computacional de execução.

O uso da lógica *fuzzy* como estratégia de controle, será sempre bem sucedida quando:

- Ocorrer ajustes em máquinas com objetivo de redução de perdas e de matéria prima, como função de julgamento de um operador;
- O sistema depender de habilidades do operador e de atenção;
- Um parâmetro de um processo afetar outro parâmetro de outro processo. Um exemplo é o controle de duas variáveis simultaneamente, como velocidade e ângulo de um elevador de container;
- Um processo possa ser modelado linguisticamente, ou seja, pelas expressões verbais e não matematicamente;
- Um controlador *fuzzy* possa ser utilizado como um sistema aconselhador a um operador humano.

2.4. Aplicações da Lógica *Fuzzy*

Este presente trabalho tem como objetivo dar continuidade as pesquisas de controle de parâmetros de fluidos de perfuração do Laboratório de Escoamento de Fluidos – LEF na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, e de acordo com a revisão da literatura encontra-se um título sob tema do controle da densidade utilizando lógica *fuzzy* no processo de produção de fluido de perfuração para poços de petróleo. Os outros trabalhos e estudos encontrados tratam de aplicações em outras áreas, utilizando a tecnologia *fuzzy*.

2.4.1. Controlador *Fuzzy* Aplicado no Setor de Petróleo e Polímeros

Rachid (2018) desenvolveu um sistema automatizado de controle da densidade de fluidos de perfuração, fazendo uma comparação de desempenho entre o uso da tecnologia *fuzzy* e o controle convencional proporcional Integral (PI). O sistema foi programado sobre a plataforma do *software LabVIEW®*. Os resultados mostraram que, embora os critérios de avaliação utilizados não tenham fornecido uma resposta conclusiva, os aspectos operacionais e econômicos indicaram a superioridade do controlador *Fuzzy*-PI.

Gomes (2016) desenvolveu um sistema de análise e gerenciamento de riscos em projetos de perfuração direcional com base na captação de conhecimento tácito de especialistas, além de levar em consideração os dados históricos dos modos de falha que se apresentam nos projetos de perfuração horizontal direcional. Para efeito quantitativo a ferramenta utilizada foi o Sistema de Inferência *Fuzzy* (SIF). O resultado da inferência do modelo quantitativo implicou na quantificação do risco global dos projetos, numa escala de 1 a 10. Também foi possível

simplificar a operação, fornecendo de forma ágil informações sobre o risco e facilitando o processo decisório dos gestores e construtores.

Wakabayashi (2007) buscou comprovar a potencialidade da aplicação de controladores PI-*fuzzy* em reatores de polimerização semi-batelada, com trajetórias de set-points (valor de referência) pré-definidas, tendo os parâmetros das funções de pertinência e fatores de escala determinados pelo método de sintonia ótima. Os resultados obtidos comprovam a potencialidade da abordagem do controle PI-*fuzzy* para reatores de polimerização semi-batelada com set-point variável. Os ajustes das regras e dos parâmetros das funções de pertinência mostraram-se capazes de produzir um bom desempenho em relação às trajetórias de set-point especificadas, tendo-se, inclusive, redução de *overshoot* (sobre-sinal) na temperatura.

2.4.2. Controladores Fuzzy Aplicados no Controle de Pressão

Barreto et al. (2017) desenvolveram um trabalho de aplicação do controlador *fuzzy* que manteve maior precisão no controle, estabilidade no decorrer da operação e pressurização eficiente de um sistema de abastecimento, e observaram que a tecnologia *fuzzy* foi capaz de alcançar objetivos distintos, e como consequência da eficiência aplicada, uma redução dos custos de manutenção.

Bezerra (2009) apresentou um sistema *fuzzy*, que foi desenvolvido no ambiente *LabVIEW*®, para o controle piezométrico de sistemas de distribuição de água por meio do uso simultâneo de válvulas de controle e conversores de frequência acoplados a conjuntos motor-bomba, visando à economia de água e energia elétrica. Pode-se concluir que o desempenho do sistema *fuzzy* se mostrou satisfatório, podendo ser implementado facilmente em outros sistemas de distribuição de água similares, a fim de proporcionar redução do consumo de água e energia elétrica, diminuição nos custos de manutenção e aumento do grau de confiabilidade dos procedimentos.

2.4.3. Controladores Fuzzy Aplicados no Controle de Temperatura

Schiassi (2008) desenvolveu um sistema de inferência *fuzzy*, com o objetivo de prever o aumento da temperatura corporal (ATC) em frangos de corte ($2,8 \pm 0,1$ kg) aos 90 minutos de exposição térmica, sob diferentes condições de estresse térmico agudo. O sistema *fuzzy* foi estruturado com base em três variáveis de entrada: temperatura do ambiente (tbs), umidade relativa (UR) e velocidade do ar (V), sendo que o nível de desconforto térmico, sofrido pelas aves, foi classificado por meio da variável de saída, ATC. A inferência *fuzzy* foi realizada por meio do método de Mamdani, que consistiu na elaboração de 45 regras e a defuzzificação por meio do método do Centro de Gravidade. As operações *fuzzy* foram realizadas no ambiente computacional MATLAB® 6.5. Além de fornecer resultados promissores, a metodologia *fuzzy* apresenta potencial considerável de aplicação na área de ambiência avícola.

Vidal, Landim e Costa (2012) desenvolveram um trabalho que descreve uma aplicação de lógica *fuzzy* para controle de temperatura em uma Planta Industrial de uma grande empresa automobilística do Sul Fluminense. A lógica *fuzzy* é uma técnica de Inteligência Artificial e tem sido reconhecida com mais uma ferramenta para engenharia utilizada no controle industrial. Foram discutidos ao longo do trabalho a descrição do equipamento, que consta de uma “casa de ar” em uma cabine robotizada, abordando seu funcionamento, características, problemas e soluções. O trabalho se encerra concluindo que o sistema submetido ao controle *fuzzy* responde

perfeitamente ao processo no qual foi instalado, mantendo a variável temperatura dentro dos valores de set-point e tolerância.

3 MATERIAIS E MÉTODOS.

É apresentado neste capítulo a descrição dos materiais e equipamentos utilizados para montagem da unidade experimental e o viscosímetro tubular, assim como a metodologia adotada na determinação e controle da viscosidade aparente do fluido base água.

3.1. Unidade Experimental

Para a parte laboratorial foi montada a unidade experimental para uso no controle automático de viscosidade de fluidos de perfuração no Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani – LEF/UFRRJ. Foram realizadas adaptações e instalação de novos equipamentos que são abordados neste capítulo.

3.2. Montagem, adaptação e evolução

Um breve histórico sobre a unidade experimental utilizada neste presente trabalho, que é uma atualização realizada no equipamento, sendo desenvolvido por este trabalho e constituindo-se a terceira fase do período evolutivo.

Tudo começou com Barbosa (2016) e a construção da unidade experimental, cujo objetivo foi o desenvolvimento de uma célula de filtração com operação automática. A figura 20 ilustra a primeira unidade experimental.

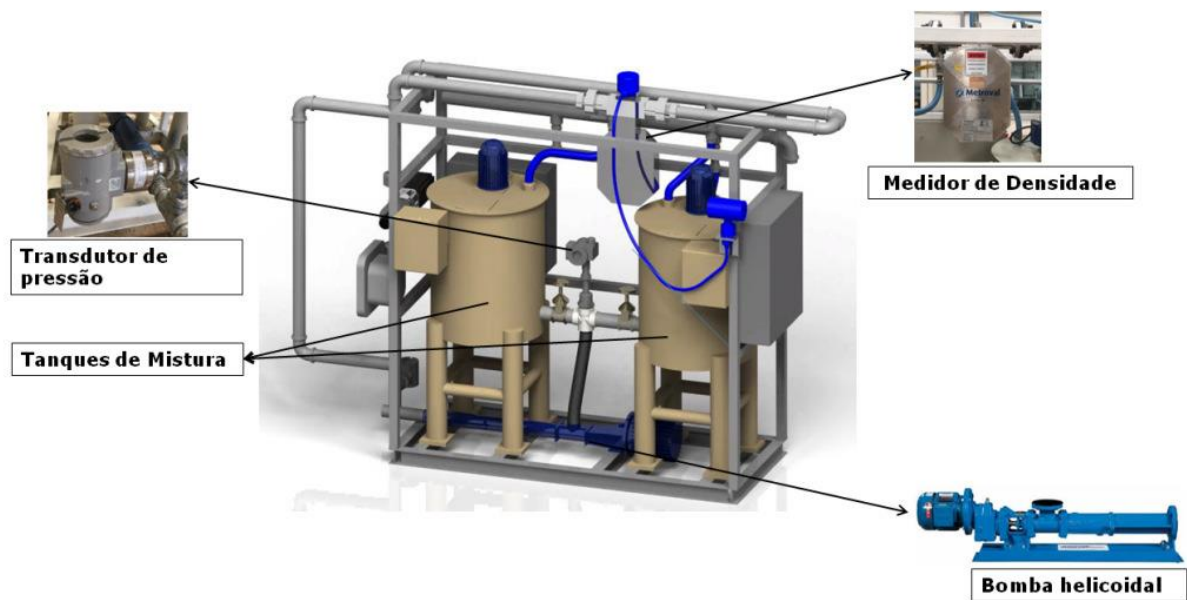


Figura 20. Unidade de filtração com operação automática.
Fonte: Barbosa (2016).

Na figura 21 é apresentado o diagrama P&ID - Tubulação e Diagrama de Instrumentação, onde observa-se 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.

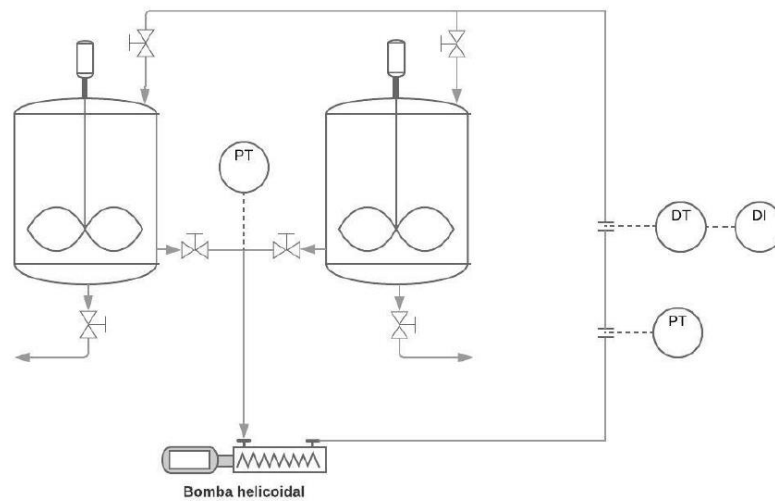


Figura 21. Diagrama P&ID da unidade de filtração automática.
Fonte: RACHID (2018).

Rachid (2018) utilizou a primeira estrutura existente e adaptou-a para o uso em controle de densidade automática de fluidos de perfuração. Dentre as principais adaptações destacam-se, a utilização de apenas um tanque de mistura. As adaptações feitas nesta unidade 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 pode ser visto no diagrama P&ID da figura 22.

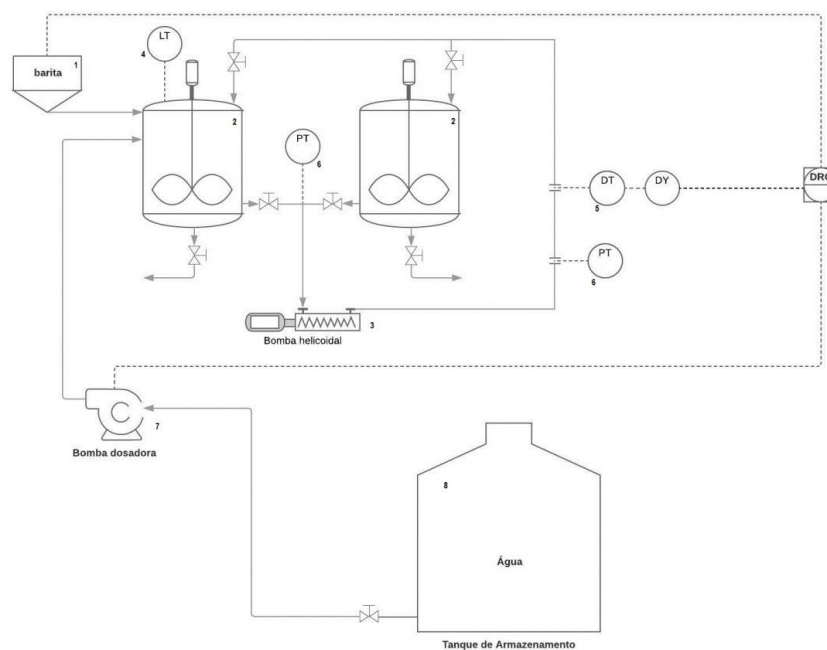


Figura 22. Diagrama P&ID da unidade de preparo de fluidos de perfuração: 1) Alimentador de sólidos; 2) Tanque de mistura; 3) Bomba helicoidal; 4) Sensor de nível; 5) Medidor de densidade; 6) Transdutor de pressão; 7) Bomba dosadora de água; 8) Tanque de armazenam
Fonte: RACHID (2018)

Entre 2018 e 2019 foram realizadas adaptações pelo autor, na unidade experimental montada por Rachid (2018), para viabilizar o uso no controle automático da viscosidade do fluido de perfuração.

A estrutura básica de equipamentos, como bomba helicoidal, uso de um tanque de mistura, dosador de sólidos, bomba dosadora de água foram mantidas conforme ilustrado no diagrama de processo da figura 23.

A figura 23 também nos mostra que o fluido foi preparado no tanque 02 onde um misturador está constantemente acionado. Do tanque H₂O vem a água pelo acionamento da bomba dosadora H₂O para o tanque 02. O fluido de perfuração percorre um *loop* de recirculação pelo acionamento da bomba helicoidal, onde neste circuito, o fluido passa por diversos instrumentos a fim de mensurá-lo, e por meio do controlador, realizar as correções utilizando a adição de água pelo circuito da bomba dosadora ou de viscosificante pelo acionamento do alimentador de sólidos acoplado ao tanque 02. O tanque-01 serve como armazenamento de fluido, caso seja necessário.

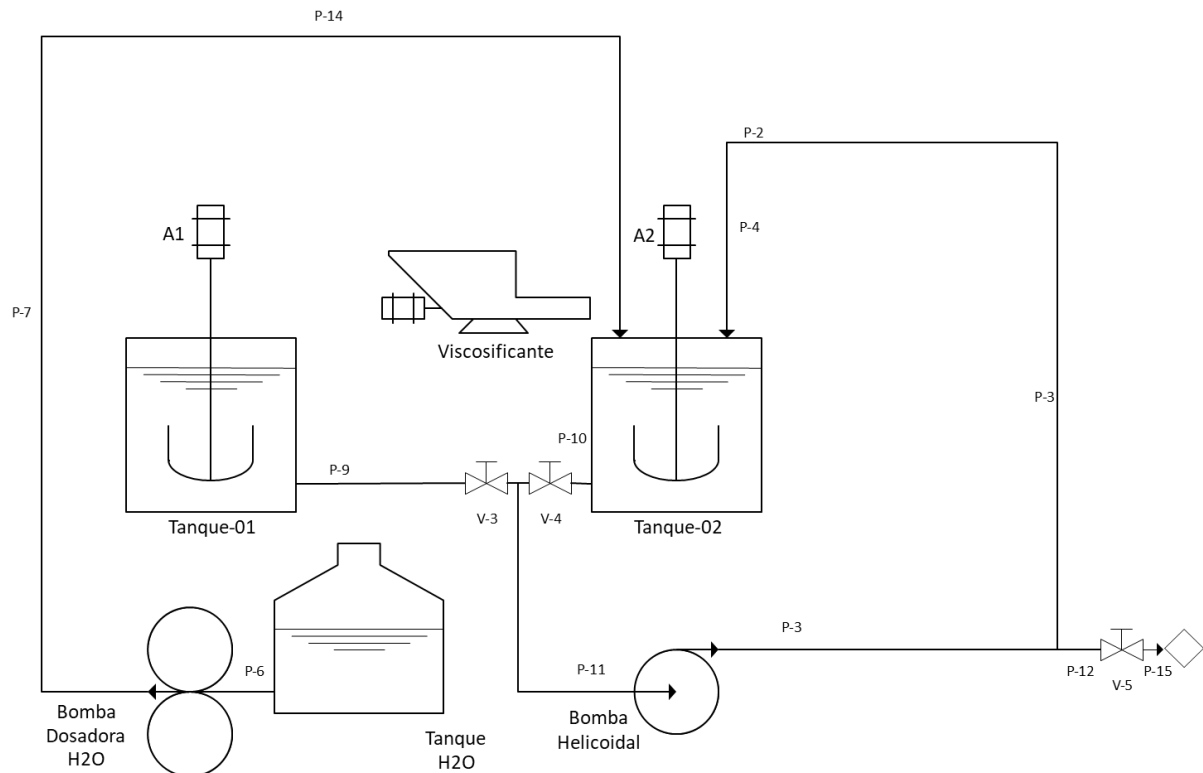


Figura 23. Diagrama de Processo da unidade experimental.
Fonte: própria.

Destacam-se neste momento as adaptações realizadas neste trabalho para o uso da unidade experimental na medição e controle da viscosidade:

- A aplicação do viscosificante Carboximetilcelulose - CMC pelo dosador de sólidos;
- A construção de 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.

- Revisão da parte elétrica da unidade experimental, e inclusão dos circuitos de instrumentação e conexão com o controlador lógico programável CLP, *National Instruments*.

A realização da adaptação para medição e controle da viscosidade não exclui a operacionalidade da unidade experimental em realizar o controle da densidade, com isso para trabalhos futuros será possível realizar a medição e controle das variáveis densidade e viscosidade simultaneamente, restando apenas, em análise preliminar, a instalação de mais uma dosadora de sólidos, incluindo sua parte elétrica e de controle.

Dos principais instrumentos e equipamentos utilizados no fluxo de processo, pode-se focar no fluxo de circulação do fluido (figura 24), iniciado pela bomba PMP 02 que passa pelos instrumentos de transmissor de pressão diferencial (PDT-09) e transmissor indicador de vazão (FIT-08) que compõem o circuito de medição de viscosidade e retorna ao tanque T02. A mistura é realizada pelo misturador M2. As correções da variável controlada viscosidade, são realizadas pela adição de CMC pelo dosador D01 ou pela bomba dosadora de água PMP 01.

O Nível é indicado 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 é medida pelo transmissor de temperatura (TT-03). A densidade mantida constante durante todo o processo de medição é enviada pelo transmissor indicador de densidade (DIT-05). Um ponto de purga 'P' é viabilizado pelo acionamento manual da válvula V-5 e se faz necessário para retirada de fluido quando alcançado o nível máximo dos tanques.

A figura 24 ilustra o diagrama P&ID da unidade experimental atualizada 2019.

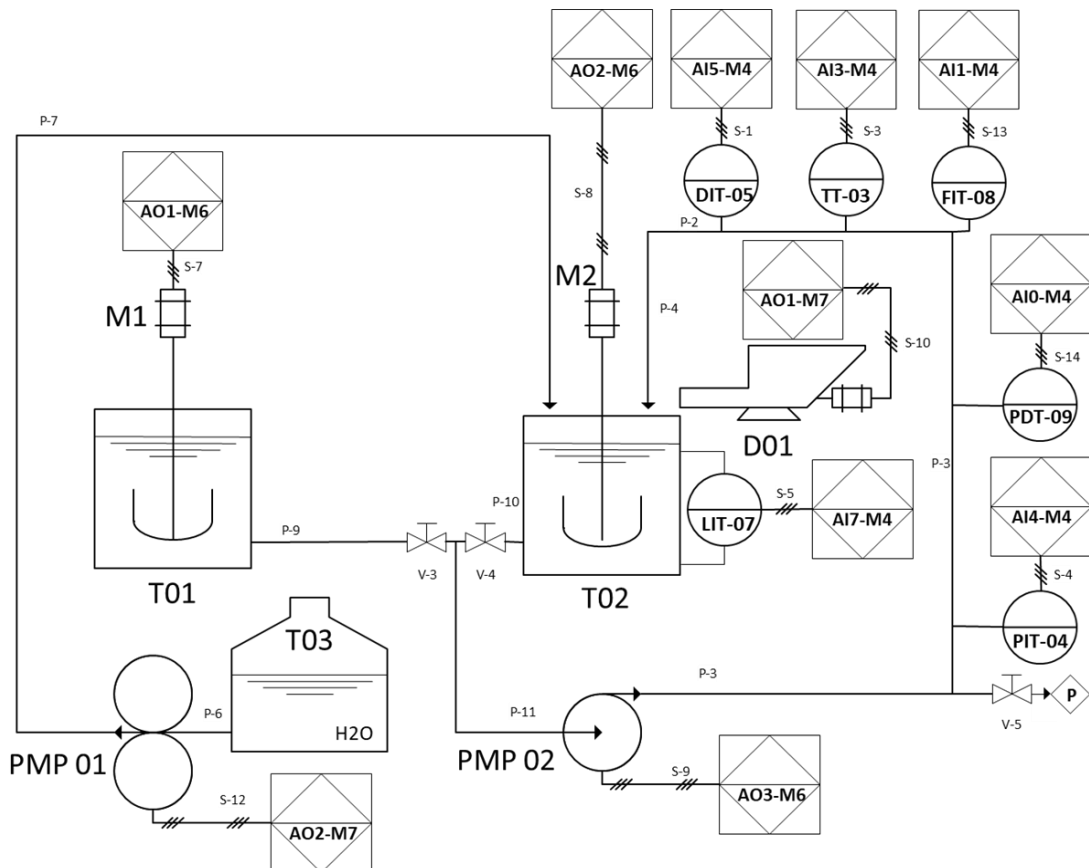


Figura 24. Diagrama de Processo da unidade experimental atualizada 2019.

Fonte: própria.

Legenda da simbologia de instrumentação representados na figura 24:



- Entrada analógica 1, conectada no módulo 4 (cartão analógico) do CLP.



- Saída Analógica 3, conectada no módulo 6 (cartão analógico) do CLP.



- Sinal analógico elétrico S13 – pela tecnologia utilizada são 4 a 20 mA.



- Instrumento localizado no campo – Neste símbolo é representado o transmissor indicador de vazão (FIT-08)

3.3. Descrição dos Equipamentos e Instrumentos

A unidade de preparação de fluidos de perfuração é exposta em fotos das figuras 25 e 26, onde é possível apontar seus principais equipamentos e instrumentos, descrevendo suas capacidades e características.

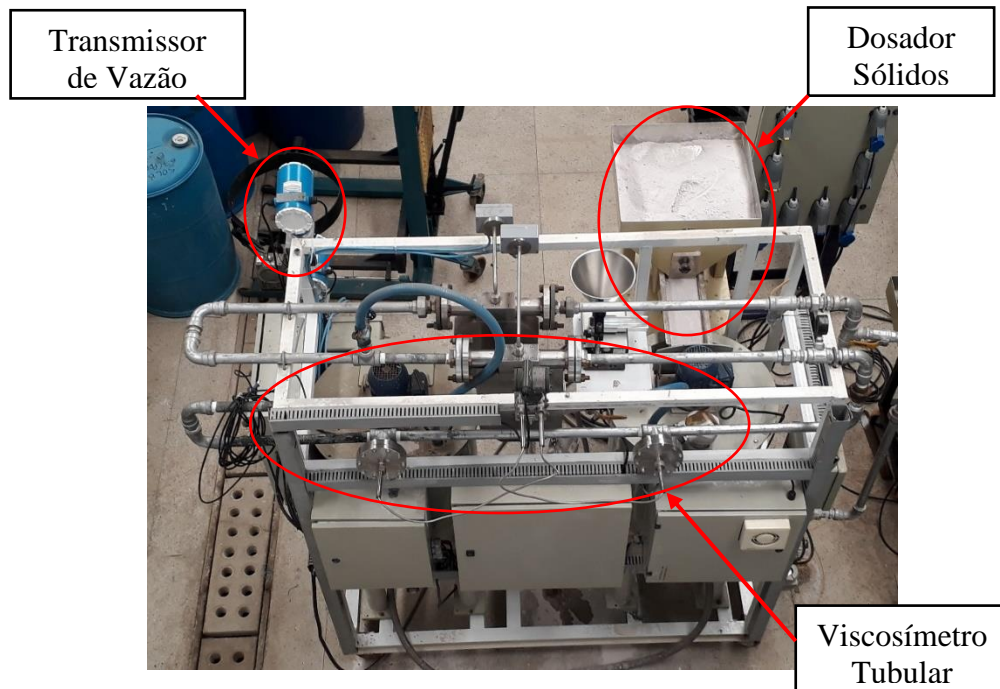


Figura 25. Foto da unidade de preparo de fluido de perfuração – Visão Superior.
Fonte: própria.

A Figura 26 nos mostra uma visão a parte de traz da unidade experimental, e coloca em evidencia outros componentes.

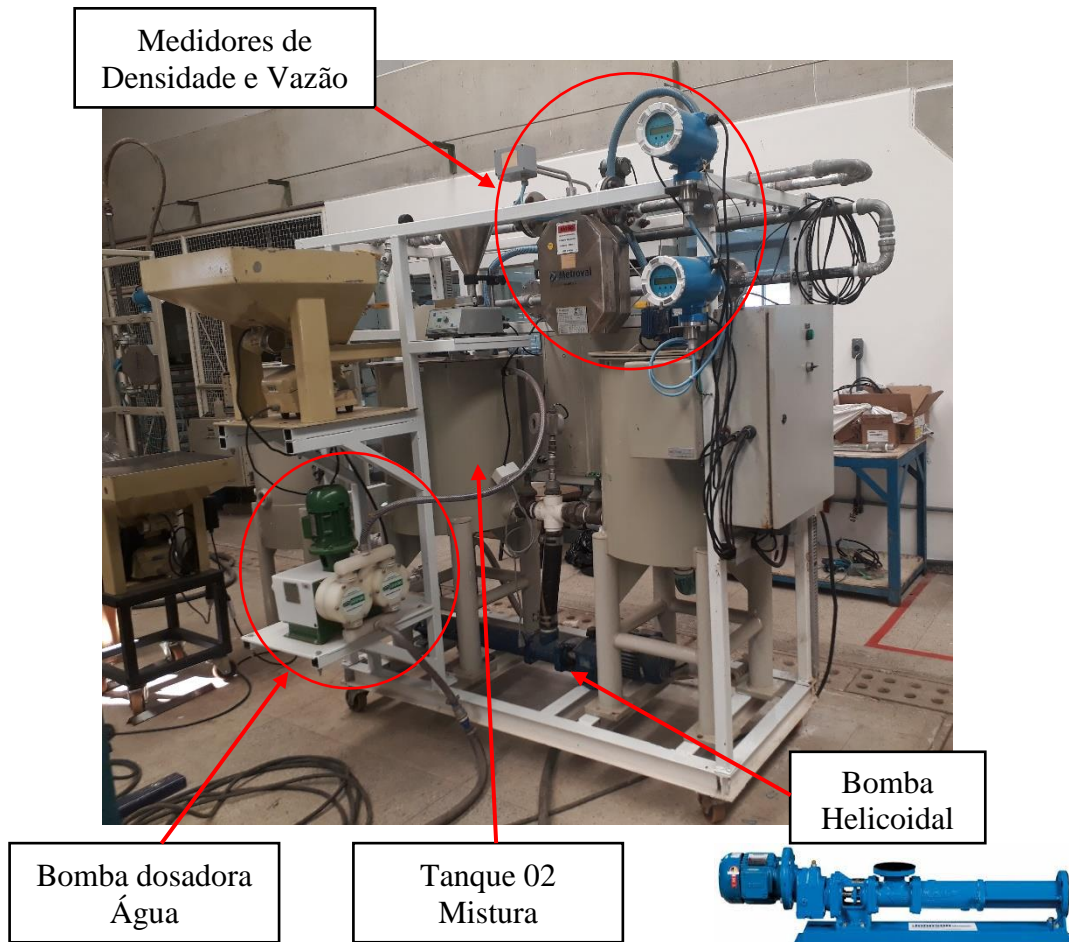


Figura 26. Foto da unidade de preparo de fluido de perfuração – Visão traseira.
Fonte: própria.

A unidade experimental é dotada de uma bomba helicoidal de deslocamento positivo, fabricante Weatherford, motor Metalcorte, rotação 1700 rpm e potência 1,5 cv. Essa bomba é responsável por circular o fluido no *loop* fechado com o objetivo de permitir a medição da viscosidade.

A leitura de pressão da unidade é realizada com o transdutor de pressão manométrica da SMAR, modelo LD291, com range de 9 a 360 psi. Os dados de pressão de recalque da linha foram coletados para fins de monitoramento. A bomba helicoidal é ilustrada na Figura 27 e o transdutor de pressão na Figura 28. (RACHID, 2018)



Figura 27. Bomba Helicoidal.
Fonte: RACHID (2018).



Figura 28. Transmissor indicador de Pressão (PIT-04).

Fonte: RACHID (2018).

A leitura da densidade e a vazão é realizada por instrumentos distintos e idênticos. A instalação de dois instrumentos para medição de densidade e vazão, se dá pela característica do instrumento de fornecer somente uma saída analógica de uma variável, ou densidade ou vazão (volumétrica / mássica). As medições destas variáveis são realizadas por meio de um medidor mássico da Metroval, com saída analógica, modelo RHM20, instalado no *loop* de recirculação do fluido e ilustrado na Figura 29. Os medidores de vazão e densidade são do mesmo modelo.



Figura 29. Transmissor indicador de densidade (DIT-05) e Vazão (FIT-08).

Fonte: própria

O tanque de mistura utilizado para o preparo do fluido de perfuração (Figura 30 a) 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 do fluido e um agitador mecânico (Figura 30 b) do fabricante Mixtura Equipamentos Hidráulicos Ltda., modelo MIX159L, motor Weg, potência 0,5 cv (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 30 (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 30. Tanque de mistura (a), Agitador mecânico (b) e Transmissor Indicador Nível (c).
Fonte: própria

A bomba dosadora do tipo diafragma da marca Grabe (figura 31), de capacidade 1450 l/h, motor Siemens com rotação de 1670 rpm e potência 0,5 cv, é a responsável pela alimentação do tanque de mistura e está conectada a um tanque de armazenamento de água de 1500L (figura 32) também da marca Grabe.



Figura 31. Bomba dosadora de água
Fonte: Própria



Figura 32. Tanque de 1500L de água
Fonte: (RACHID,2018).

O dosador alimentador de sólidos é o responsável pela dosagem de CMC no tanque de mistura. Na unidade experimental utiliza-se o dosador de sólidos do fabricante MVL Vibradores, tipo F.010, conforme mostrado na figura 33.



Figura 33. Dosador de sólidos vibratório fabricante MVL.
Fonte: RACHID (2018)

Foi mantido parte da instalação elétrica dos quadros de comando que fazem a alimentação elétrica dos equipamentos. A bomba dosadora de água PMP 01, bomba helicoidal PM 02 e o Misturador M2 são todos alimentados por inversores de frequência da marca WEG modelo CFW08, todavia o dosador de sólidos D01 possui circuito eletrônico de comando do próprio fabricante. Os quadros estão dispostos nos painéis ilustrados na figura 34.



Figura 34. Quadros de comando e força da unidade experimental (acima) e seus interiores (abaixo).

Fonte: RACHID (2018) - adaptado

3.4. O Viscosímetro Tubular

Para medição da variável viscosidade efetiva, foi decido pelo uso do viscosímetro tipo tubular. O arranjo físico do viscosímetro tubular é composto pela instalação de um sensor de pressão diferencial (PDT) e um sensor de vazão (FIT), que fornecem dados on-line destas variáveis ao controlador que calcula a viscosidade por meio do algoritmo de cálculo programado no *software LabVIEW*®. A figura 35 ilustra o arranjo esquemático dos instrumentos na linha de processo e a figura 36 o equipamento instalado na unidade experimental. No apêndice A, figura 69, é ilustrado a programação do algoritmo de cálculo da viscosidade efetiva no *LabVIEW*®.

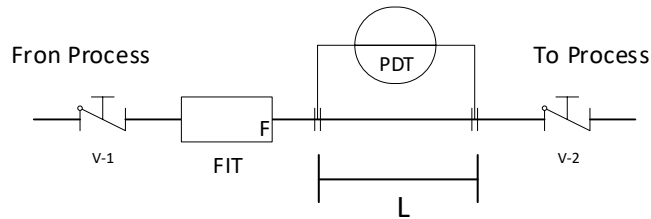


Figura 35. Viscosímetro tipo tubular - adaptado
Fonte: MAGALHÃES FILHO, et al (2017)

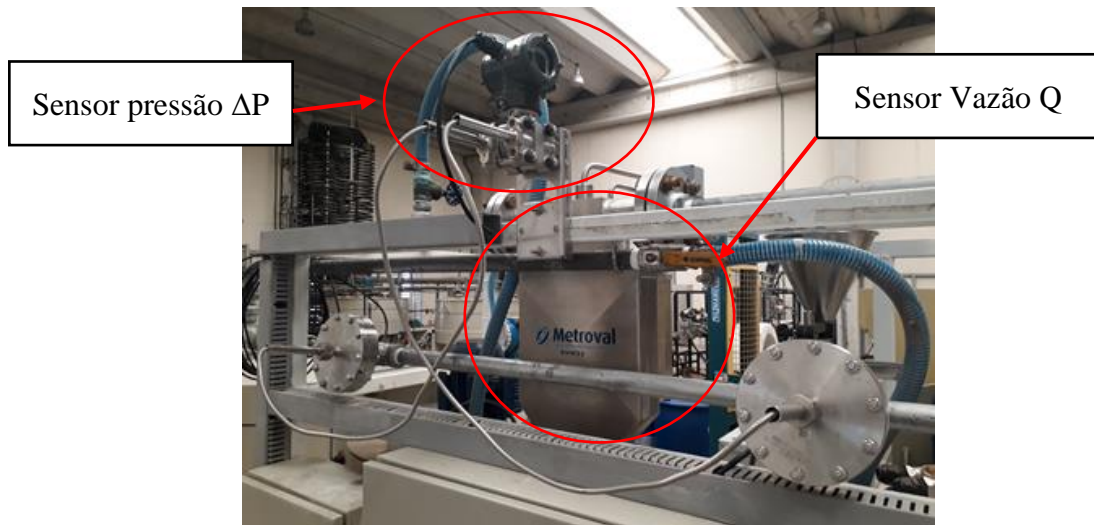


Figura 36. Arranjo físico viscosímetro tipo tubular – Foto
Fonte Própria

Segundo o XXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados ENEMP (1999), a viscosidade efetiva μ_{ef} pode ser encontrada pela medição da vazão, e do diferencial de pressão entre dois pontos montados a uma distância L (figura 35) em um trecho reto de tubulação destinada ao viscosímetro. A equação de viscosidade efetiva μ_{ef} pode ser vista na equação 3.1.

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

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 (3.1) é utilizada no programa *LabVIEW*® para medição da viscosidade efetiva.

Outro ponto importante para o bom funcionamento do viscosímetro tubular, é que o escoamento seja laminar. Para isto utiliza-se a equação de Reynolds para a fins de dimensionamento do viscosímetro.

Quando o fluido passa a ter um comportamento não-Newtoniano, o conceito do número de Reynolds se mantém, sendo a viscosidade dinâmica substituída pela viscosidade efetiva, neste caso o número de Reynolds recebe o complemento de generalizado PEREIRA (2006).

A equação do número de Reynolds generalizado é mostrado equação (3.2).

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

Considerando L=0,9m; D=1"; a uma vazão constante de Q=1m³/h; e uma viscosidade efetiva mínima de 0,01 (kg/m.s) ou 10 cP; pode-se calcular o número de Reynolds:

$$Re_G = \frac{1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * \frac{1}{3600} \left[\frac{m^3}{s} \right] * \pi * (1 * 0,0254)^2 \left[m^2 \right] * (1 * 0,0254) \left[m \right]}{0,01 \left[\frac{kg}{m.s} \right]} \quad (3.3)$$

$$Re_G = 1393,14 \quad (3.4)$$

Com este resultado, do número de Reynolds encontrado abaixo de 2000, representando um escoamento laminar, define-se então a vazão de operação dos testes em Q=1m³/h e viscosidade mínima de 10cP.

Para realização do controle da vazão da bomba de recirculação do fluido de perfuração, foi necessário o uso de controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo), pois devido a variação da viscosidade efetiva, o conjunto moto bomba sofria alterações de rotação pela continua variação no comportamento de escoamento do fluido. A figura 37 ilustra a programação no software *LabVIEW*® do controlador PID.

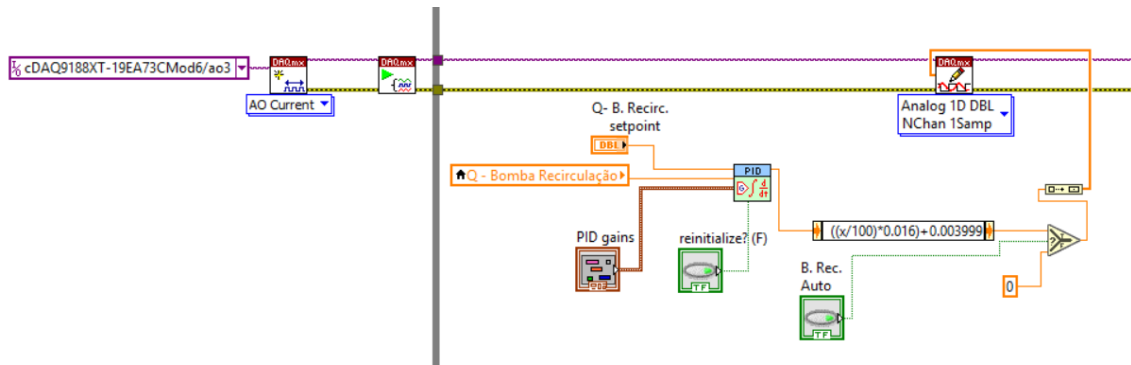


Figura 37. Programação no software *LabVIEW*® do controlador PID.
Fonte: própria

Conforme MAGALHÃES FILHO, *et al* (2017) a Tensão de cisalhamento nas paredes da tubulação em sentido radial pode ser calculada pela equação (3.5)

$$\tau(r) = \frac{\Delta P * R}{2 * L} \quad (3.5)$$

Então, calcula-se a taxa de deformação (equação 3.6) utilizando as equações 3.5 e 3.1:

$$\gamma = \frac{\tau(r)}{\mu_{ef}} \quad (3.6)$$

$$\gamma = \frac{\frac{\Delta P * R}{2 * L}}{\frac{\pi * R^4}{8 * Q} * \left(-\frac{\Delta P}{L}\right)} \quad (3.7)$$

$$\gamma = \frac{4 * Q}{\pi * R^3} \quad (3.8)$$

$$\gamma = \frac{4 * \frac{1}{3600} \left[\frac{m^3}{s} \right]}{\pi * (0,5 * 0,0254)^3 [m^3]} \quad (3.9)$$

$$\gamma = 172,66 \text{ s}^{-1} \quad (3.10)$$

O resultado esposto na equação (3.10) define o ponto de operação aproximado da taxa de escoamento do fluido de perfuração, sendo importante a manutenção da vazão em 1m³/h afim de obter medições de viscosidade apenas pela alteração da tensão de cisalhamento que é diretamente proporcional ao ΔP medido no transmissor de pressão diferencial (PDT).

3.4.1. Aferição do Viscosímetro Tubular

A aferição do viscosímetro *on-line* (tubular) foi realizada comparando-se os valores da viscosidade efetiva medidos via *software LabVIEW*® com os valores encontrados pelo uso do viscosímetro Fann 35A. A figura 38 ilustra o gráfico de comparação entre os viscosímetros.

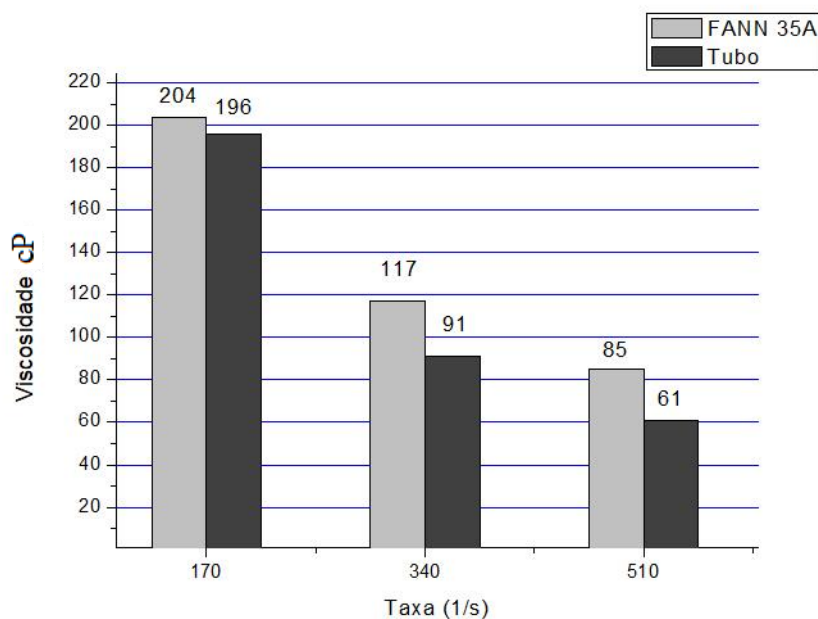


Figura 38. Comparação entre viscosímetros on-line e de bancada Fann 35A.

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 também como o número de Reynolds. A taxa escoamento na operação da unidade de preparo de fluidos de perfuração foi de aproximadamente 170 s^{-1} .

Considerando a proporção inversa entre a vazão e a viscosidade efetiva, a uma taxa $\gamma = 172,66 \text{ s}^{-1}$, aferiu-se $\mu_{ef} = 196 \text{ cP}$ no viscosímetro tubular, então a uma taxa $\gamma = 170 \text{ s}^{-1}$, obtém-se o valor de $\mu_{ef} = 199 \text{ cP}$. Tomando como base a leitura do instrumento de bancada Fann 35A, o erro de medição foi de aproximadamente 2,45% em uma taxa de escoamento de $\gamma = 170 \text{ s}^{-1}$.

3.5. Sistema de Controle e Aquisição de Dados

O sistema de controle é composto por um CLP (Controlador Lógico Programável) em arquitetura modular, chassis, fonte de alimentação 24VDC, CPU, módulo de comunicação *ethernet*, módulos de entrada e saída digitais e módulos de entrada e saída analógicas. A figura 39 ilustra o CLP da *National Instruments*.



Figura 39. CLP *National Instruments* – Chassis Modular
Fonte: *National Instruments*

No CLP da unidade experimental, os módulos 3 e 4 são as entradas analógicas que recebem sinais de 04 a 20 mA dos instrumentos transmissores localizados na unidade experimental. Os módulos 6 e 7 são as saídas analógicas que emitem sinal de controle de 4 a 20mA para os inversores de frequência. Os módulos 1 e 2 são entradas e saídas digitais, respectivamente. A figura 40 ilustra um módulo analógico do CLP da *National Instruments*.



Figura 40. Placa NI-DAQ de aquisição de dados.
Fonte: *National Instruments*

O CLP e seus módulos e acessórios foram instalados no quadro de comando, dos quais foi realizado a manutenção e atualização dos circuitos elétricos. O resultado pode ser visto na figura 41.

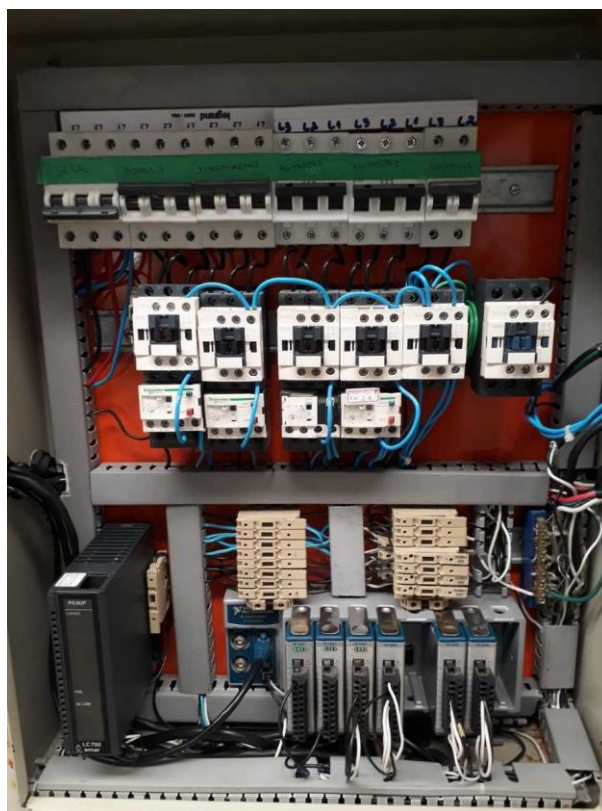


Figura 41. Quadro de comando com CLP instalado.
Fonte: própria

3.5.1. Sistema Supervisório

O sistema supervisório e de programação da lógica foi desenvolvida para se operacionalizar a unidade de preparação de fluidos de perfuração de forma automática. O controle da viscosidade efetiva é realizado por medição da diferença de pressão e da vazão por instrumentos montados no viscosímetro tubular, onde fornecem dados em tempo real.

Após realizada a aquisição desses dados pelos módulos e canais analógicos do CLP, pelo algoritmo de cálculo é encontrado o valor da viscosidade e da variação da viscosidade no tempo. Estes são os dados de entrada para o programa de controle *fuzzy*, onde essas informações são fuzzificadas e de acordo com o *set-point* desejado, a base de regras e o modelo de inferência, é emitida uma saída defuzzificada no domínio de discurso dos números reais (4 a 20mA) que comandam os elementos finais de controle, como bombas e dosadores.

A figura 42 nos mostra a tela de supervisório elaborada para monitoramento e controle da unidade experimental

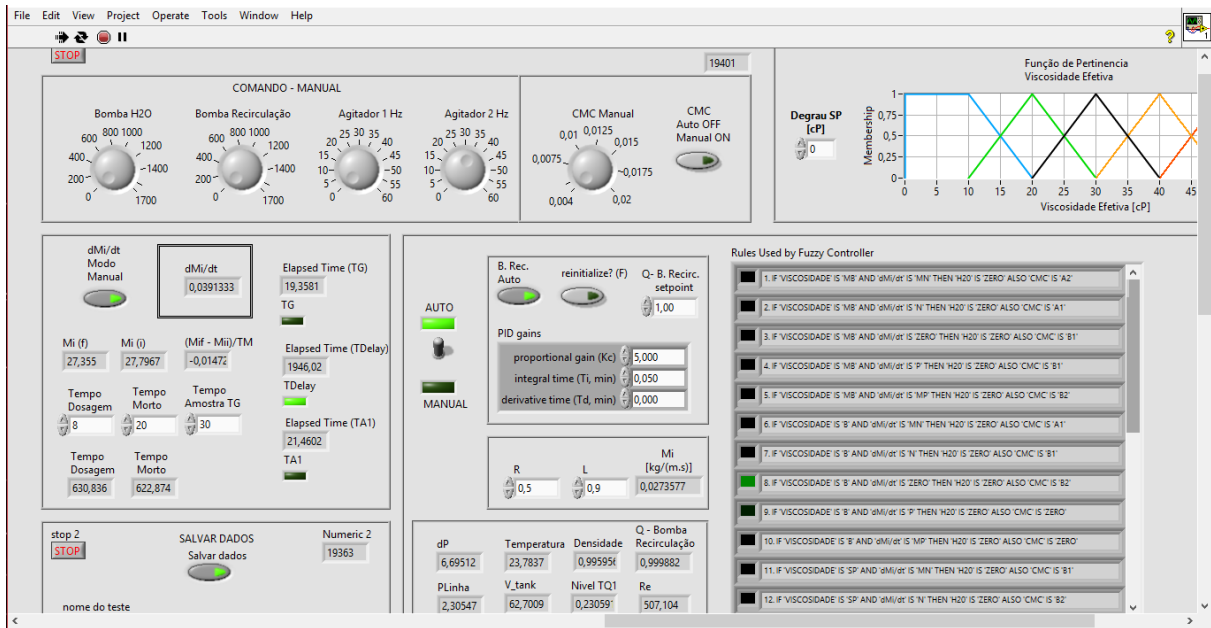


Figura 42. Tela de supervisor elaborada para monitoramento e controle da unidade experimental.
Fonte: própria

O *loop* de controle utilizando o controlador *fuzzy* é mostrado na figura 41, onde do processo vem as informações por sensores, dos quais são comparados com o *set-point* e emite-se um sinal de erro e_k e um Δe_k que passa pela fuzzificação, base de regras e defuzzificação. Após esse processo alcança-se o elemento final de controle, que são: o dosador de CMC e o dosador de água. A figura 43 ilustra o *loop* de controle *fuzzy* utilizado.

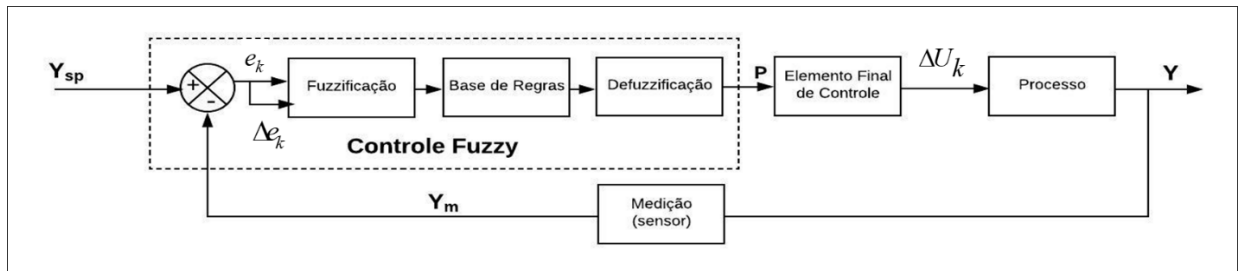


Figura 43. *Loop* de controle *fuzzy*.
Fonte: SEBORG (2011)

3.6. Metodologia Experimental

Para verificação do desempenho do controlador *fuzzy* em testes de controle da viscosidade de fluido de perfuração com a operação da unidade experimental, foi adotado o procedimento experimental conforme é mostrado na figura 44.

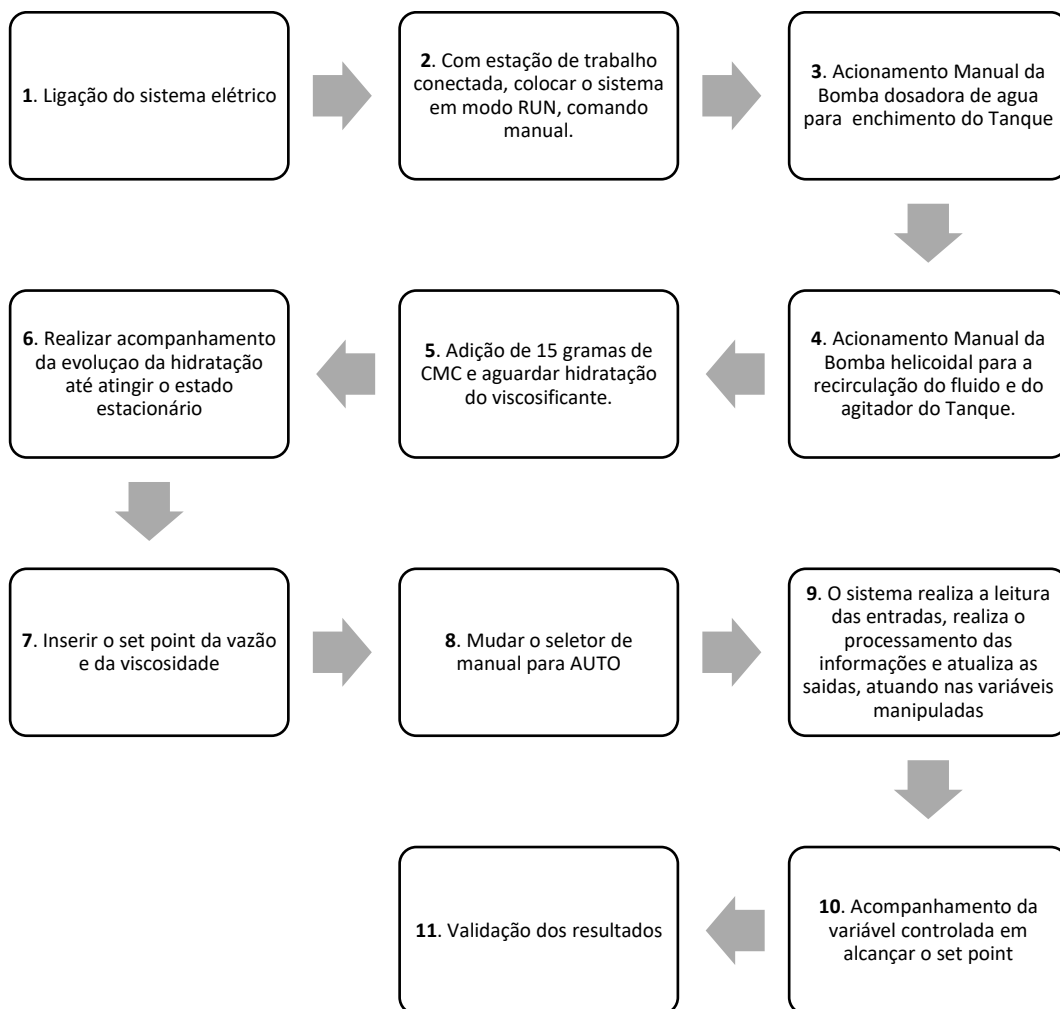


Figura 44. Procedimento experimental para controle da viscosidade efetiva.

1. Ligação do sistema elétrico:

Ligação dos disjuntores que alimentam os circuitos de força e comando da unidade experimental.

2. Modo RUN:

Com a estação de trabalho (*notebook*) conectada ao módulo de comunicação do CLP por meio de cabo ethernet, realizar o acionamento do seletor RUN no painel supervisor do *LabVIEW*®, e com seletor Manual / AUTO no modo Manual.

3. Acionamento manual da bomba dosadora:

Considerando a condição inicial sem fluido no tanque de mistura, faz-se necessário o enchimento do tanque com o acionamento manual do seletor Bomba H₂O. O nível mínimo de operação deve ser de 0,10 metros para não haver aspiração de ar pela sucção da bomba helicoidal.

4. Acionamento manual da bomba de recirculação e do agitador:

Com o acionamento manual, da bomba de recirculação e do agitador, torna-se possível a passagem do fluido pelo sistema de medição, e a verificação preliminar do funcionamento dos instrumentos e acionadores.

5. Adição de CMC:

Com o fluido em circulação e agitação, adiciona-se 15g de CMC, com intensão de elevar a viscosidade do fluido acima de 10cP para se ter leitura confiável do viscosímetro tubular, que tem sua precisão comprometida operando abaixo deste valor.

6. Acompanhamento da evolução da hidratação do CMC:

Após a adição de CMC no tanque, é necessário acompanhar a evolução da hidratação do CMC via monitoramento no supervísório. Este processo leva em média, de 15 a 30 minutos, para que a variável alcance o estado estacionário, sendo este o tempo morto do processo.

7. Set point vazão e viscosidade:

Com o alcance do estado estacionário na hidratação do fluido, utiliza-se os seletores no painel supervísório para inserir o valor da vazão desejada e da viscosidade. A viscosidade tem seu set point pré-determinado pelas funções de pertinência da etapa de fuzzificação e pela da base de regras, a alteração poderá ser realizada pelo seletor degrau SP no painel supervísório, que altera simultaneamente todos os valores das funções de pertinência de entrada proporcionalmente.

8. Mudar o seletor para AUTO:

Ao colocar a unidade experimental no modo automático, a bomba de circulação passa a ser comandada pelo controlador PID, que possui set point determinado na etapa anterior, e inicia-se a operação do controlador *fuzzy*.

9. Sistema em modo de operação automático:

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 supervísório e realizando a atuação nas variáveis manipuladas.

Segundo a programação *fuzzy* e de lógica realizada, o sistema de controle terá as seguintes atuações de operação:

- Variável controlada abaixo do set point:
 - Sistema de controle realiza dosagem de CMC em intensidade modulável e tempo fixo.
- Variável controlada dentro do set point:
 - Sistema não realiza ação na saída de controle.
- Variável controlada acima do set point:
 - Sistema de controle realiza dosagem de água em intensidade e tempos moduláveis.

10. Acompanhamento da variável controlada em alcançar o set point:

É realizado o monitoramento de variável controlada, a fim de se conferir o funcionamento do sistema de controle no alcance do set point.

11. Validação dos Resultados:

A partir do acompanhamento gráfico da medição da viscosidade ao longo do tempo, é verificado o alcance do objetivo em controlar a viscosidade de forma automatizada no processo de preparo do fluido de perfuração.

4 MODELAGEM E CONTROLE *FUZZY* DA VISCOSIDADE

Apresenta-se neste capítulo a estratégia de controle utilizada no experimento, a parte qualitativa e quantitativa da programação *fuzzy* com as funções de pertinência das entradas e saídas, a base de regras e as inferências realizadas na programação do controlador *fuzzy* da unidade de preparo de fluido de perfuração e controle da viscosidade. Ao final são apresentados exemplos de operação do programador *fuzzy*, dada as entradas e sucedendo as respostas de saída do controlador, obtidos pela simulação da variável controlada viscosidade acima, abaixo e dentro do *set point*.

4.1. Estratégia de Controle

Para controle da viscosidade no preparo do fluido de perfuração, utilizou-se a carboximetilcelulose (CMC) como sólido viscosificante, 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 (NOBREGA e AMORIM, 2015).

O objetivo da estratégia de controle adotada neste trabalho, tem como base a atenção a duas variáveis que são, a viscosidade efetiva e a variação dessa viscosidade no tempo (velocidade). A viscosidade, quando medida e comparada com o *set-point*, obtém-se a amplitude do erro $e(t)$, e conforme a programação da base de regras do controlador *fuzzy*, tem-se a ação de controle sobre a variável manipulada.

A variação da viscosidade no tempo, entra para moderar ou acentuar da ação de controle estabelecida diante da amplitude erro $e(t)$.

Com esta proposta o sistema de controle da viscosidade fica menos vulnerável as mudanças impostas por agentes externos, como no exemplo em que, dosando-se uma quantidade de CMC, o controlador estará realizando o monitoramento da viscosidade e da taxa de variação desta variável, caso não tenha alcançado o *set point*, após decorrido o tempo de hidratação será realizada mais uma dosagem, baseada no erro e na velocidade do erro.

4.2. Função de Pertinência

O *LabVIEW*® possui uma interface de programação *fuzzy* para inserir o número de entradas e saídas, selecionar o tipo de função de pertinência utilizada em cada variável, além de ser possível determinar a amplitude das variáveis e das funções de pertinência. A figura 45 nos mostra a interface de programação.

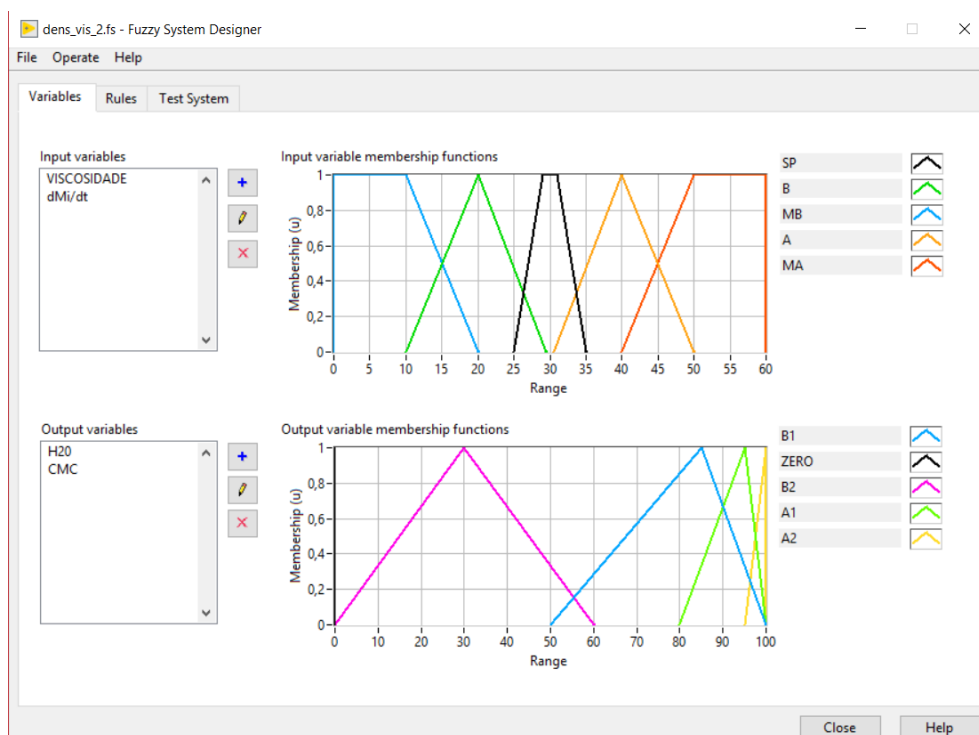


Figura 45. Procedimento experimental para controle da viscosidade efetiva.

4.2.1. Funções de Pertinência de Entrada

A declaração das funções de pertinência de entrada e seu universo de discurso (limites), podem ser vistos na tabela 2.

Tabela 2. Variáveis de entrada da base de dados *fuzzy*.

Variável de Entrada	Escala	Número de funções de pertinência
VISCOSIDADE	0 a 60 [cP]	5
dMi/dt	-2 a 2 [cP/s]	5

Na tabela 3 encontram-se as variáveis linguísticas do universo de discurso *fuzzy* e sua relação com o universo de discurso do mundo dos números reais, considerando o limite operacional de cada função de pertinência da viscosidade efetiva. A variável viscosidade possui forma trapézoidal com set point declarado entre 29 e 31cP.

Tabela 3. Parametrização das funções de pertinência da entrada viscosidade.

Função de Pertinência Viscosidade	Formato	Pontos (cP)
MB – Muito Baixo	Trapézio	0 ; 0 ; 10 ; 20
B - Baixo	Triangulo	10 ; 20 ; 29,5
SP – Set Point	Trapézio	25 ; 29 ; 31 ; 35
A - Alto	Triangulo	30,5 ; 40 ; 50
MA – Muito Alto	Trapézio	40 ; 50 ; 60 ; 60

Para realização da mudança de set point nas funções de pertinência de entrada da viscosidade, foram utilizados blocos da programação do *LabVIEW*® que fazem a leitura dos valores da viscosidade, depois acrescentam ou reduzem o valor do *set point*, e por fim, outro bloco escreve novamente na base de dados os novos valores das funções de pertinência, modificando assim, o valor central onde se encontra o *set point*. A figura 46 ilustra o formato das funções de pertinência que cobrem a variável viscosidade e no apêndice, figura 68 é ilustrado a programação dos blocos no *software LabVIEW*®.

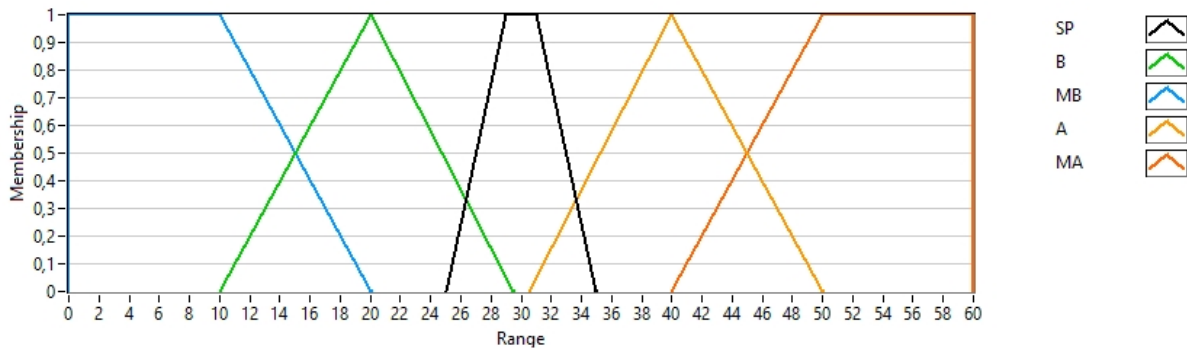


Figura 46. Funções de pertinência da viscosidade efetiva.

A forma de escrita da variação de viscosidade no tempo “ dM_i/dt ” ($d\mu/dt$) está expressa desta maneira, pois a utilização de caracteres especiais não faz parte da sintaxe de programação do *LabVIEW*®.

A tabela 4 informa os limites das funções de pertinência da taxa de variação da viscosidade.

Tabela 4. Parametrização das funções de pertinência taxa de variação da viscosidade.

Função de Pertinência dM_i/dt	Formato	Pontos
MN – Muito Negativo	Trapézio	-2 ; -2 ; -1,33 ; -0,67
N - Negativo	Triângulo	-1,33 ; -0,67 ; -0,02
ZERO	Trapézio	-0,67 ; -0,01 ; 0,01 ; 0,67
P - Positivo	Triângulo	0,02 ; 0,67 ; 1,33
MP – Muito Positivo	Trapézio	0,67 ; 1,33 ; 2 ; 2

A figura 47 ilustra o formato das funções de pertinência que envolvem a variável taxa de variação da viscosidade dM_i/dt ($d\mu/dt$).

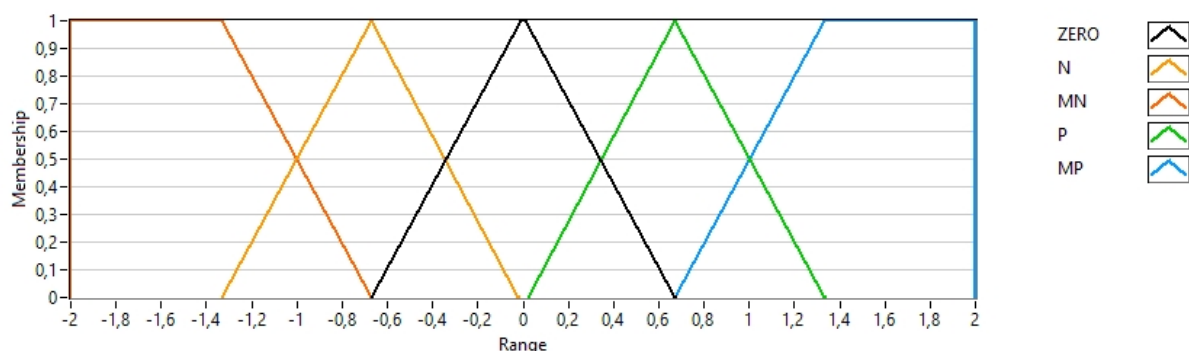


Figura 47. Funções de pertinência de dM_i/dt .

4.2.2. Funções de Pertinência de Saída

A tabela 5 nos mostra as variáveis de saída, escala e o número de funções de pertinência da dosagem de água e CMC. Com a viscosidade dentro do *set point* (SP) e com zero de velocidade de variação, não são adicionados nem água, nem CMC. A saída CMC foi expressa em mili-Ampères (mA), mas seus limites correspondem de 0 a 75% da capacidade operacional do dosador de sólidos. Devido ao alto poder viscosificante da CMC, as funções de pertinência (CMC) foram parametrizadas com limite máximo de 75% em razão da alta capacidade de dosagem do equipamento.

Tabela 5. Variáveis de saída da base de dados *fuzzy*.

Variável de Saída	Escala	Número de funções de pertinência
H2O	0 a 100 [%]	5
CMC	0,004 a 0,016 [mA] Equivalente a: 0 a 75 [%]	5

Na tabela 6 encontram-se as variáveis linguísticas do universo de discurso *fuzzy* e sua relação com o universo de discurso do mundo dos números reais, considerando o limite operacional de cada função de pertinência da dosagem de água.

Tabela 6. Parametrização das funções de pertinência da dosagem de água.

Função de Pertinência H2O (Água)	Formato	Pontos
ZERO	<i>Singleton</i>	0
B2 – Baixo (nível 2)	Triangulo	0 ; 30 ; 60
B1 – Baixo (nível 1)	Triangulo	50 ; 85 ; 100
A1 – Alto (nível 1)	Triangulo	80 ; 95 ; 100
A2 – Alto (nível 2)	Triangulo	95 ; 100 ; 100

A figura 48 ilustra o formato das funções de pertinência que cobrem a variável saída para bomba dosadora de água.

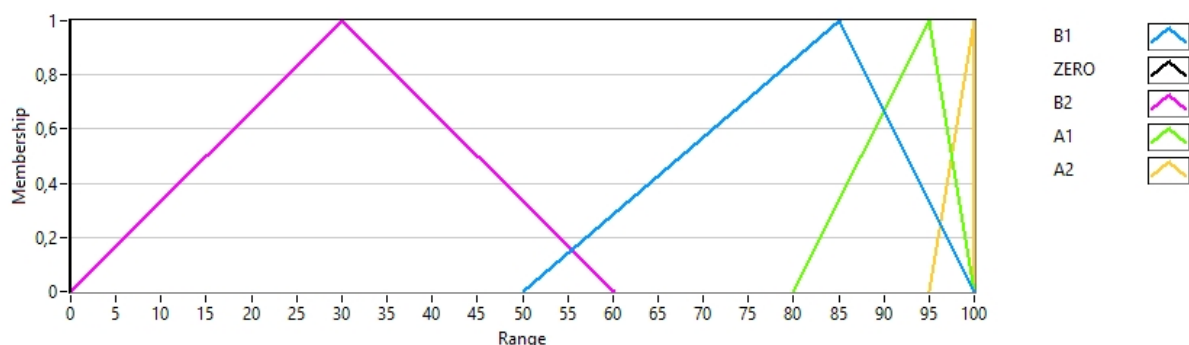


Figura 48. Funções de pertinência da bomba dosadora de água.

Na tabela 7 encontram-se as variáveis linguísticas do universo de discurso *fuzzy* e sua relação com o universo de discurso do mundo dos números reais, considerando o limite operacional de cada função de pertinência da dosagem de CMC.

Tabela 7. Parametrização das funções de pertinência da dosagem de CMC.

Função de Pertinência CMC	Formato	Pontos
ZERO	Singleton	0,004
B2 – Baixo (nível 2)	Triangulo	0,004 ; 0,0055 ; 0,0085
B1 – Baixo (nível 1)	Triangulo	0,0055 ; 0,0085 ; 0,0115
A1 – Alto (nível 1)	Triangulo	0,0085 ; 0,0115 ; 0,014
A2 – Alto (nível 2)	Triangulo	0,0115 ; 0,0145 ; 0,016

A figura 49 ilustra o formato das funções de pertinência que cobrem a variável saída para o dosador de sólidos CMC.

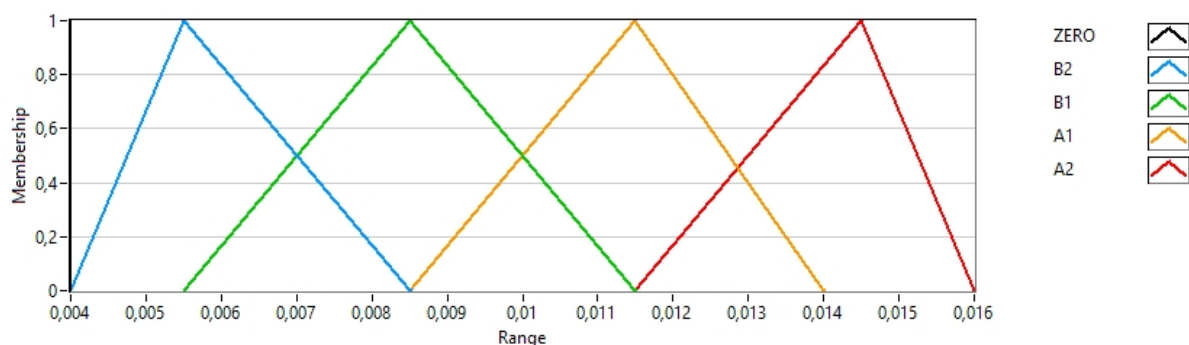


Figura 49. Funções de pertinência da dosagem de CMC.

4.3. Base de Regras

A base de regras tem como fundamento o formato de lógica das implicações, como por exemplo: SE <condição> então <consequência>. É pela base de regras que se define 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 ou mapa de regras *fuzzy* é a base de inteligência do controlador *fuzzy*, onde se relacionam as condições dadas pelas entradas, a tomadas de decisão e as ações nas

saídas do controlador. A figura 50 é o mapa de regras da operação da unidade experimental de preparo de fluidos no controle dos parâmetros da viscosidade efetiva, e foi de grande importância para construção da lógica de controle, dos quais, de outra forma, não seria possível cobrir um número tão alto de possibilidades.

dMi/dt Visc	MN		N		Zero		P		MP	
	ZERO	A2	ZERO	A1	ZERO	B1	ZERO	B1	ZERO	B2
MB	ZERO	A2	ZERO	A1	ZERO	B1	ZERO	B1	ZERO	B2
B	ZERO	A1	ZERO	B1	ZERO	B2	ZERO	ZERO	ZERO	ZERO
S.P	ZERO	B1	ZERO	B2	ZERO	ZERO	B2	ZERO	B1	ZERO
A	ZERO	B2	ZERO	ZERO	B2	ZERO	B1	ZERO	A1	ZERO
MA	ZERO	ZERO	B1	ZERO	B1	ZERO	A1	ZERO	A2	ZERO
SAÍDAS	H2O	CMC	H2O	CMC	H2O	CMC	H2O	CMC	H2O	CMC

Figura 50. Matriz de regras *fuzzy* da unidade experimental controle de viscosidade.

Pelo uso da matriz de regras *fuzzy* foi possível escrever as diversas regras *fuzzy* que abrangem as ações de saída, mediante as condições de entrada. Foram 25 regras programadas conforme lista abaixo.

1. se 'viscosidade' é 'MB' e 'dMi / dt' é 'MN' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'A2'
2. se 'viscosidade' é 'MB' e 'dMi / dt' é 'N' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'A1'
3. se 'viscosidade' é 'MB' e 'dMi / dt' é 'ZERO' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'B1'
4. se 'viscosidade' é 'MB' e 'dMi / dt' é 'P' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'B1'
5. se 'viscosidade' é 'MB' e 'dMi / dt' é 'MP' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'B2'
6. se 'viscosidade' é 'B' e 'dMi / dt' é 'MN' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'A1'
7. se 'viscosidade' é 'B' e 'dMi / dt' é 'N' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'B1'
8. se 'viscosidade' é 'B' e 'dMi / dt' é 'ZERO' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'B2'
9. se 'viscosidade' é 'B' e 'dMi / dt' é 'P' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'ZERO'
10. se 'viscosidade' é 'B' e 'dMi / dt' é 'MP' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'ZERO'
11. se 'viscosidade' é 'SP' e 'dMi / dt' é 'MN' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'B1'
12. se 'viscosidade' é 'SP' e 'dMi / dt' é 'N' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'B2'
13. se 'viscosidade' é 'SP' e 'dMi / dt' é 'ZERO' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'ZERO'
14. se 'viscosidade' é 'SP' e 'dMi / dt' é 'P' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'ZERO'
15. se 'viscosidade' é 'SP' e 'dMi / dt' é 'MP' então 'h20' é 'B1' também 'cmc' é 'ZERO'
16. se 'viscosidade' é 'A' e 'dMi / dt' é 'MN' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'B2'
17. se 'viscosidade' é 'A' e 'dMi / dt' é 'N' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'ZERO'
18. se 'viscosidade' é 'A' e 'dMi / dt' é 'ZERO' então 'h20' é 'B2' também 'cmc' é 'ZERO'
19. se 'viscosidade' é 'A' e 'dMi / dt' é 'P' então 'h20' é 'B1' também 'cmc' é 'ZERO'
20. se 'viscosidade' é 'A' e 'dMi / dt' é 'MP' então 'h20' é 'A1' também 'cmc' é 'ZERO'

21. se 'viscosidade' é 'MA' e 'dMi / dt' é 'MN' então 'h20' é 'ZERO' também 'cmc' é 'ZERO'
22. se 'viscosidade' é 'MA' e 'dMi / dt' é 'N' então 'h20' é 'B1' também 'cmc' é 'ZERO'
23. se 'viscosidade' é 'MA' e 'dMi / dt' é 'ZERO' então 'h20' é 'B1' também 'cmc' é 'ZERO'
24. se 'viscosidade' é 'MA' e 'dMi / dt' é 'P' então 'h20' é 'A1' também 'cmc' é 'ZERO'
25. se 'viscosidade' é 'MA' e 'dMi / dt' é 'MP' então 'h20' é 'A2' também 'cmc' é 'ZERO'

A figura 51 nos indica onde é programado a base de regras do controlador *fuzzy* no LabVIEW®.

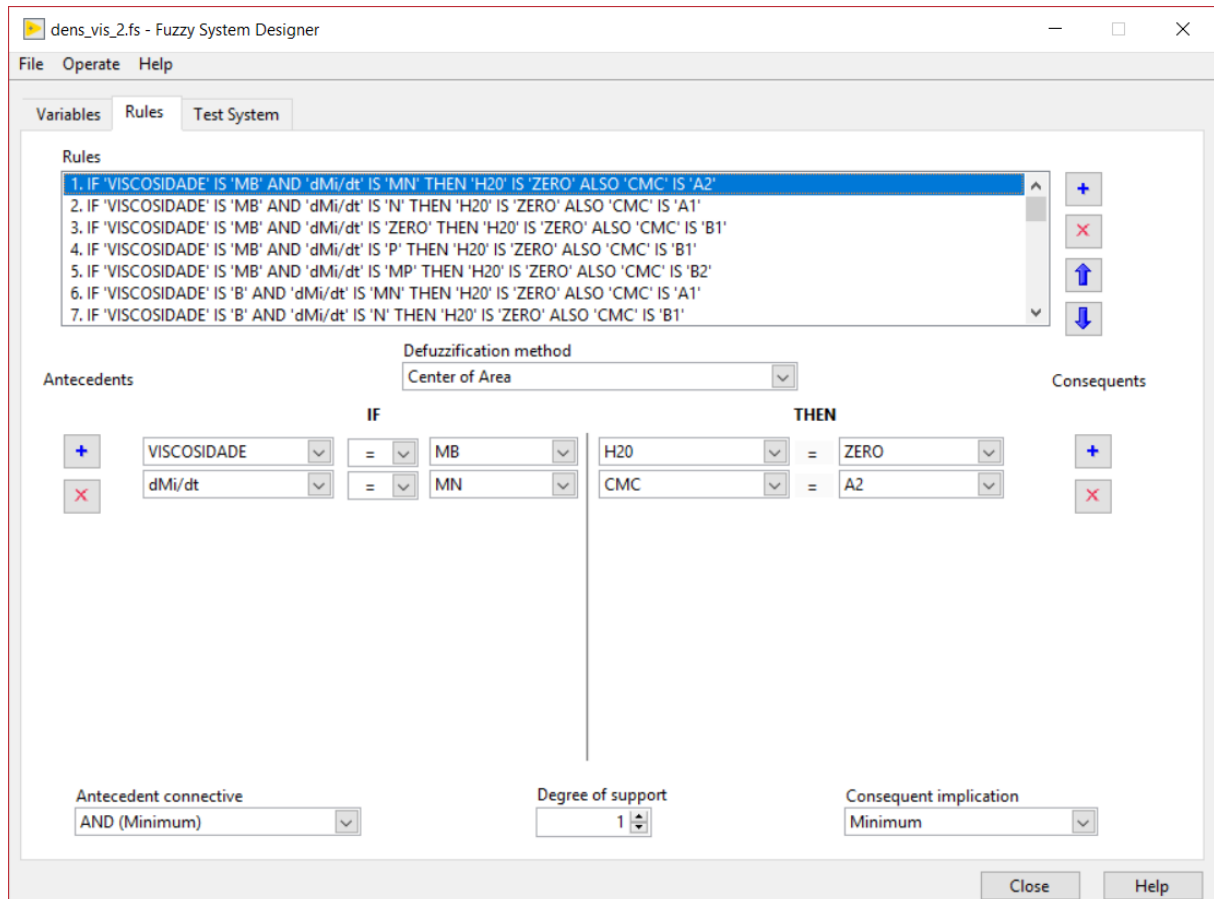


Figura 51. Programação da base de regras no LabVIEW®.

4.4. Exemplo de Operação da Lógica *Fuzzy* no LabVIEW®

O software LabVIEW® oferece a funcionalidade da simulação do programa de controle *fuzzy*, o que colaborou para análise do comportamento do controlador *fuzzy*, permitindo o aprimoramento das regras e das funções de pertinência para o controle da viscosidade efetiva do fluido de perfuração.

Para uma dada condição de operação simulada e ilustrada na figura 52, a viscosidade está dentro do *set point* e não há variação da variável controlada na entrada, então a saída de água e de CMC são Zero. A regra acionada é a 13 (quadro inferior da figura) com peso de 1.

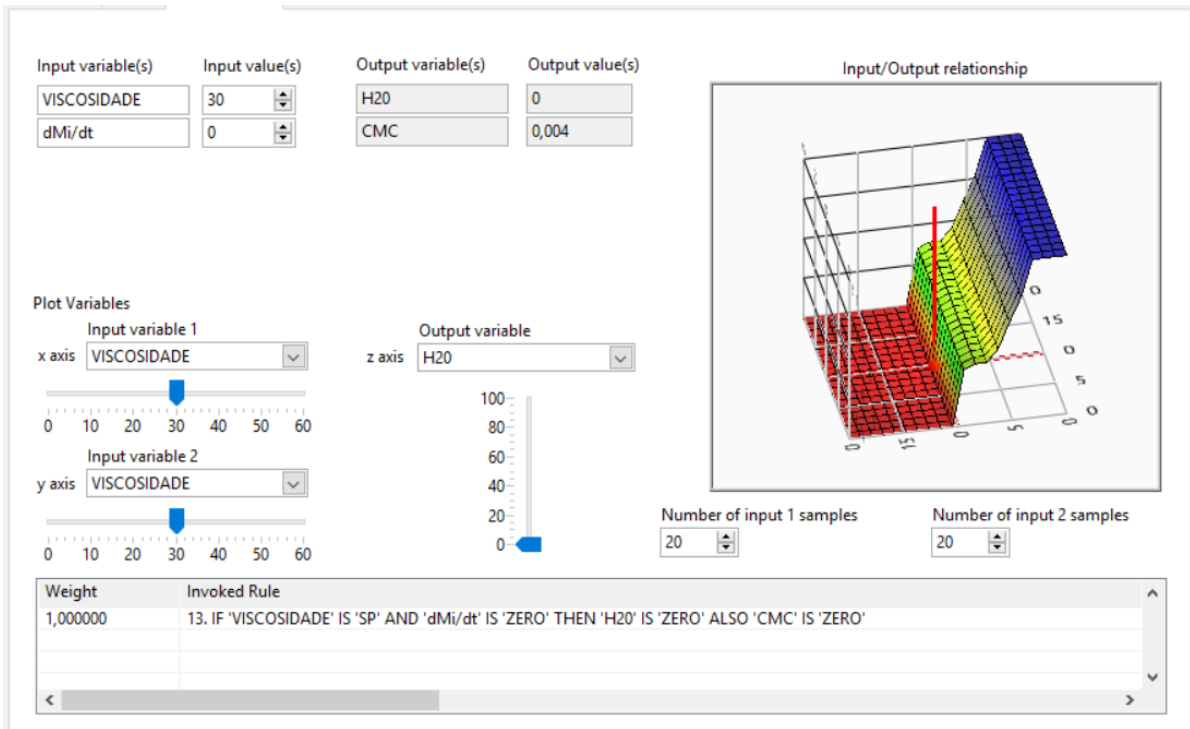


Figura 52. Teste de operação da lógica *fuzzy* em set point.

Conforme figura 53, para a condição de operação simulada da viscosidade abaixo do *set point* em 20cP e variação dMi/dt zero, a regra acionada é a 8, e saída de CMC está em 5,5mA (correspondente a 9,4%).

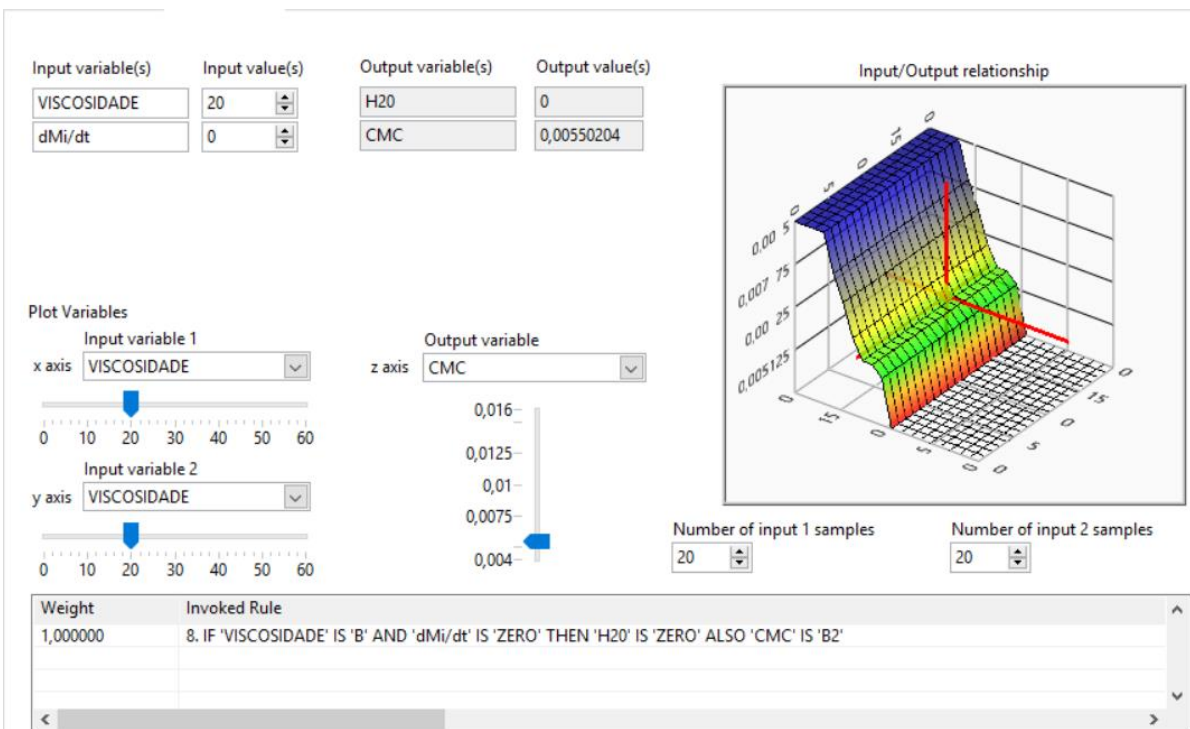


Figura 53. Teste de operação da lógica *fuzzy* abaixo do set point.

Para a condição de operação simulada da viscosidade acima do *set point* em 40cP e variação dMi/dt zero, a regra acionada é a 18, e saída de água está em 30%. A figura 54 ilustra a operação *fuzzy* com viscosidade acima do *set point*.

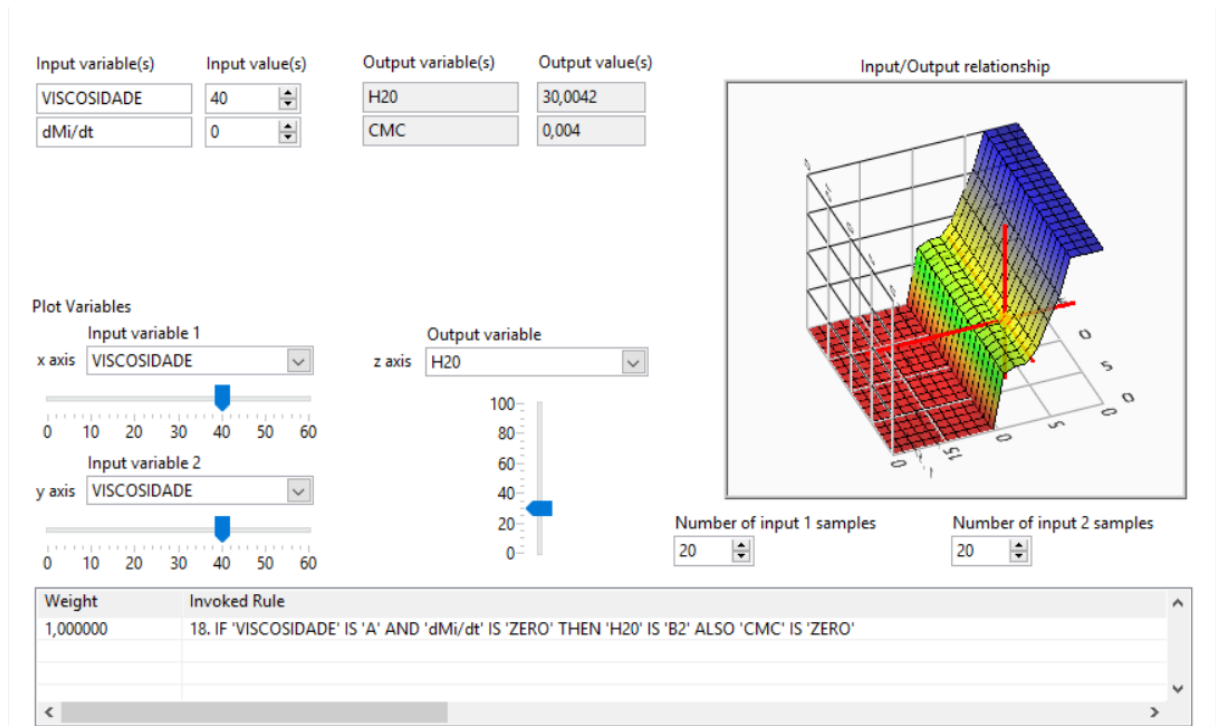


Figura 54. Teste de operação da lógica *fuzzy* acima do *set point*.

Esta simulação do controle *fuzzy* demonstra o comportamento da unidade experimental em operação, mas por outro lado, a tarefa da programação nos oferece a oportunidade do contínuo aperfeiçoamento, seja pela observação do comportamento reológico do fluido ou pela experiência captada do especialista do processo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados na unidade experimental de preparo de fluido de perfuração, onde a estratégia de controle pode ser avaliada pelo desempenho do controlador, em problemas do tipo regulador e do tipo servo. Ao final, foi realizado a discussão dos resultados.

5.1. Desempenho do Controlador *Fuzzy* em Problema do Tipo Regulador

O desempenho do controlador *fuzzy* no controle da viscosidade efetiva do fluido de perfuração nos problemas do tipo regulador, podem ser visualizados nesta seção, onde são apresentados resultados de dois testes reguladores: A perturbação com aplicação de água e aplicação de CMC.

Ao final de cada seção de testes, são realizadas as observações sobre o desempenho e problemas apresentados.

5.1.1. Perturbação com Aplicação de Água

Com o objetivo de replicar um degrau negativo como perturbação e reduzir a viscosidade a níveis próximos a 10 cP, foi misturado 40 litros de água ao fluido que se encontrava em 30 cP. Essa manobra não foi realizada com controlador no modo automático, pois com o fluido sendo aplicado em etapas, em modo automático, seria capaz de ocorrer uma correção imediata e ao mesmo tempo precoce para o objetivo do teste, além da impossibilidade física, de se adicionar esse volume de água de uma só vez na unidade experimental.

Com isso, colocou-se a unidade em modo manual, adicionou-se o volume total de água em etapas, com o fluido em agitação e circulação. Monitorando-se a viscosidade e sua taxa de decaimento, o controlador foi colocado em modo automático, liberando a ação de controle *fuzzy* sobre o processo.

A figura 55 ilustra uma queda acentuada da viscosidade efetiva até aproximadamente os 100 segundos, devido a homogeneização do fluido de perfuração que teve aplicação de água. A CMC, dosada ao fluido de perfuração pela ação do controlador *fuzzy* no início da operação automática, passou pelo período de hidratação até que a viscosidade efetiva alcançou o tempo de subida de 731s (29 cP), e de 766s para o tempo de acomodação com 29,42 cP (critério de 2%), tendo flutuação em torno do ponto central do set point (30 cP), visto que o set point é uma função de pertinência trapezoidal com valores entre 29 e 31cP.

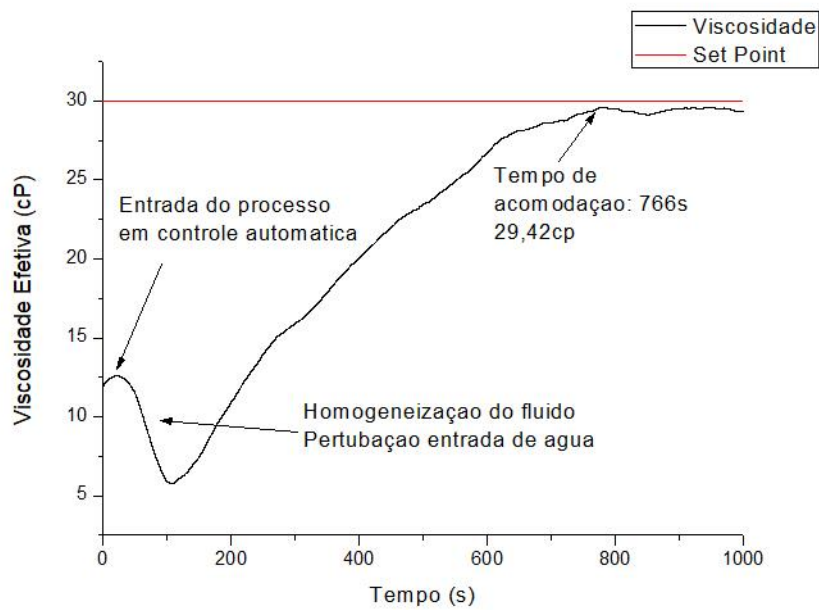


Figura 55. Gráfico de viscosidade e set point do teste regulador - perturbação com aplicação de água.

A figura 56 ilustra o momento da dosagem de CMC e de Água, realizado pelo controlador *fuzzy*. No tempo de 919s, foi acionado CMC com o dosador operando a 12% da capacidade, devido a sensibilidade do sistema de monitoramento em detectar uma leve e momentânea tendência de elevação da viscosidade.

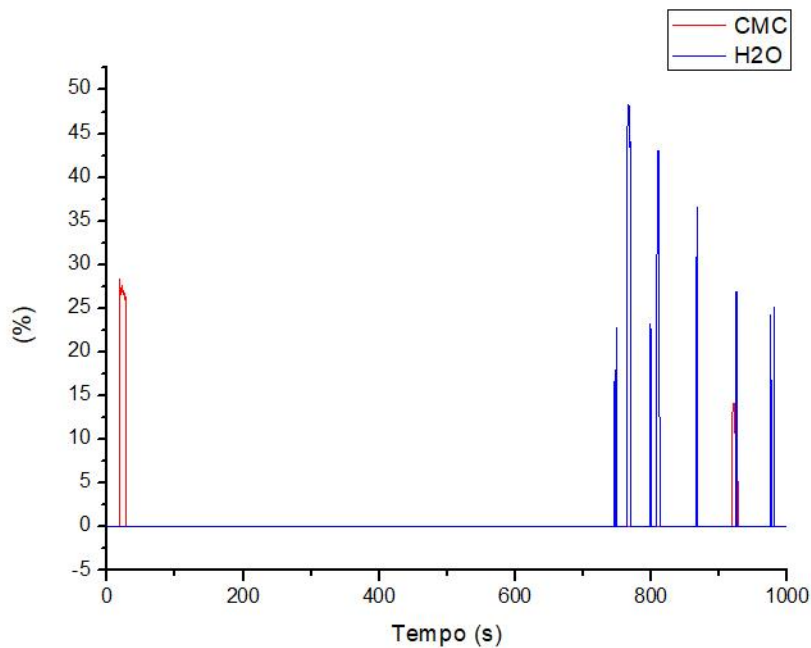


Figura 56. Gráfico de dosagem de CMC e água do teste regulador - perturbação com aplicação de água.

A figura 57 ilustra a ação de controle *fuzzy*, com dosagem de CMC, logo no início da operação do sistema em modo automático. Após decorrer da hidratação da CMC no fluido de perfuração, chegou-se ao tempo de acomodação em 766s. Com a taxa indicando tendência a ultrapassagem do set point, e pela sensibilidade gerada pela parametrização das funções de pertinência, foi dosado água a todo momento que a taxa de variação da viscosidade estivesse com tendência positiva.

No período estacionário a variável viscosidade efetiva ficou dentro dos limites do set-point, demonstrando que a ação de controle *fuzzy* para o teste regulador, com perturbação degrau negativa com aplicação de água foi bem sucedida. Foi realizada uma leve redução da sensibilidade, alterando-se valores das funções de pertinência em torno do *set point*, para aperfeiçoamento e maior precisão.

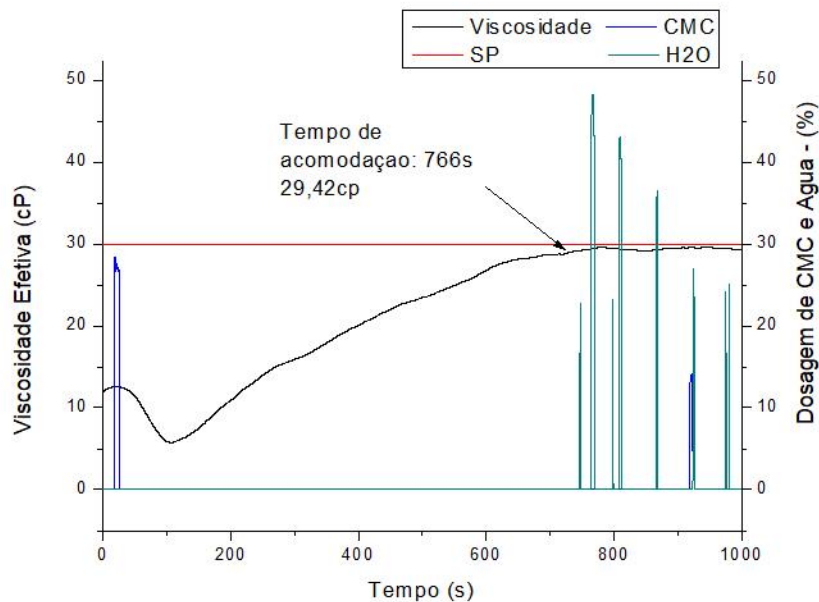


Figura 57. Gráfico com todas as variáveis medidas sobrepostas do teste regulador - perturbação com aplicação de água.

Como os gráficos que reúnem todas as variáveis, possuem escalas próximas assim como na figura 57, foi possível a realização da união dessas variáveis para análise.

5.1.2. Perturbação com Aplicação de CMC

Ao término do teste com aplicação de água, a viscosidade do fluido de perfuração ficou estabilizada dentro da faixa do *set point* (30 ± 1 cP) estabelecido na função de pertinência SP da viscosidade. Com o controlador ainda em modo automático, aos 2215 segundos foi adicionado 10g de CMC na condição de função degrau positiva como perturbação ao processo.

Na figura 58 e 60 é possível visualizar a viscosidade efetiva do fluido de perfuração em uma curva positiva alcançando o limite superior do set point que é de 31cP aos 2460s, então logo após, alcança 31,72cP, e retorna a faixa do set point aos 2942s, totalizando 482s no período transitório, o que gerou um máximo sobressinal de 5,55%. Após a realização do controle, a variável ficou dentro da faixa do set point por mais 184s (cerca de 3min), o controlador foi

posto no modo manual, e realizou-se a retirada de fluido do tanque gerando um erro de leitura do viscosímetro tubular, justificando a queda brusca na leitura da variável controlada a partir dos 3126s.

Neste momento, cabe a observação, de que para se realizar a redução da viscosidade do fluido, há a necessidade de injeção de grande quantidade água, e por isso foi necessário em alguns momentos a retirada do excesso de fluido do tanque. A retirada foi realizada pela saída disponível, que é uma válvula ligada ao circuito da bomba de recirculação do fluido, onde, no momento em que é realizado, faz cair a pressão na linha, gerando um erro na leitura do viscosímetro tubular.

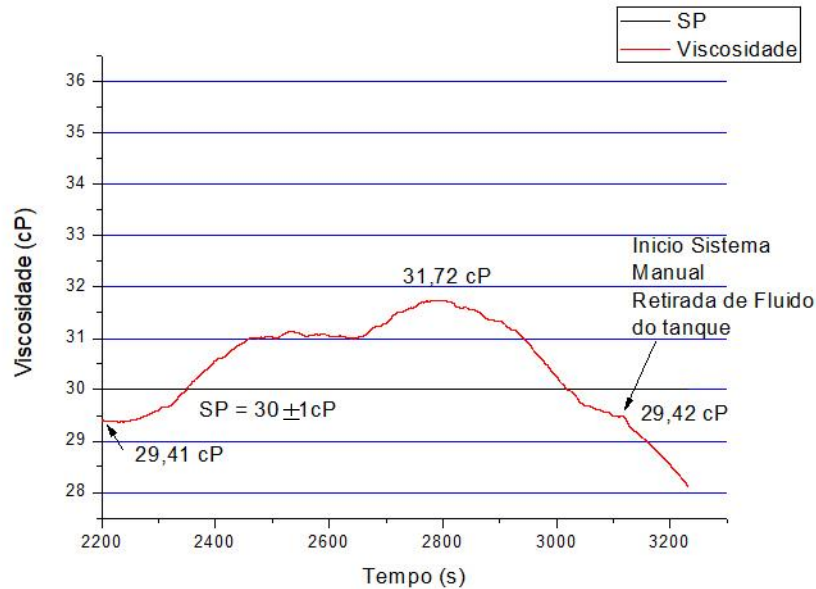


Figura 58. Gráfico de viscosidade e set point do teste regulador - perturbação com aplicação de CMC.

Na figura 59 pode ser visto a ação de controle do controlador *fuzzy* em dosar água para manter a variável controlada dentro da faixa de set point estabelecida. Nenhuma dosagem de CMC foi registrada neste teste.

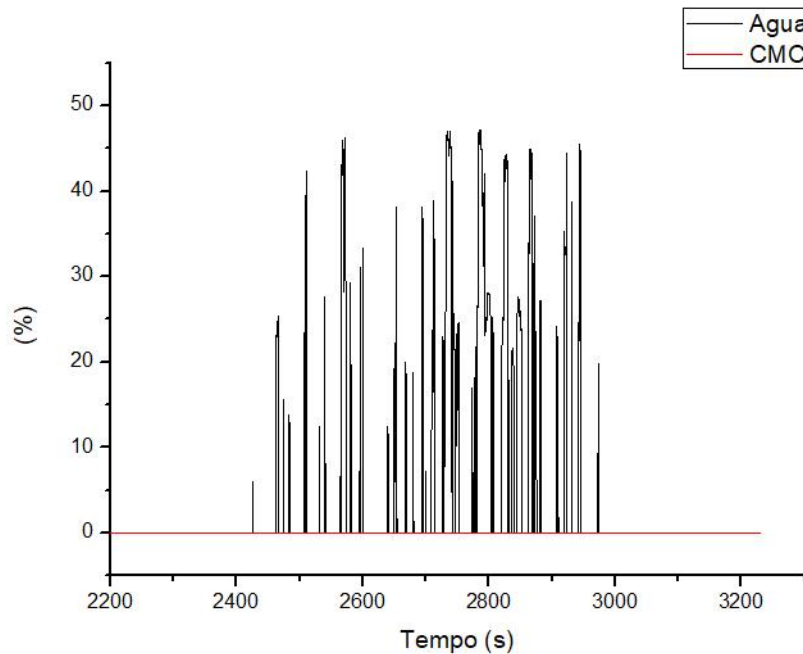


Figura 59. Gráfico de dosagem de CMC e água do teste regulador - perturbação com aplicação de CMC.

O ciclo completo entre a aplicação do degrau de perturbação com CMC e o controle da viscosidade com a dosagem automática de água, realizada pela ação do controlador *fuzzy* podem ser visualizados na figura 60, que ilustra todas as variáveis medidas e sobrepostas.

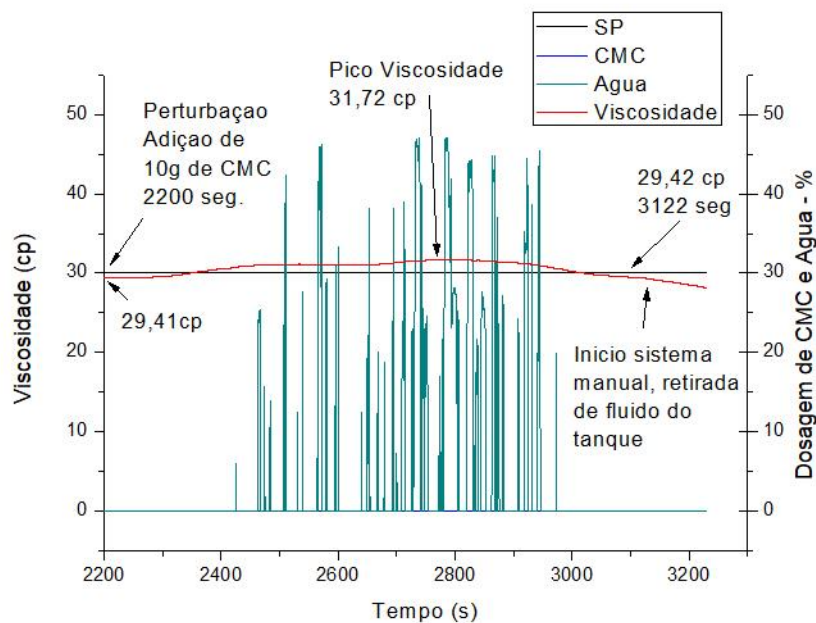


Figura 60. Gráfico com todas as variáveis medidas sobrepostas do teste regulador - perturbação com aplicação de CMC.

Os resultados do uso do controlador *fuzzy* no problema tipo regulador com perturbação degrau água e CMC, demonstram que a tecnologia *fuzzy* apresenta resultados dentro da margem estabelecida e sendo sua aplicação adequada ao controle com problemas do tipo regulador.

5.2. Desempenho do Controlador *Fuzzy* em Problema do Tipo Servo

Nesta seção o controlador *fuzzy* é avaliado na capacidade de dirimir os problemas do tipo servo. Para tal, o fluido foi mantido dentro da tolerância da faixa do set point ($30 \pm 1\text{cP}$), aplicando-se a função degrau na variável controlada em $+5\text{cP}$ e após a estabilização, retornando com -5cP . Lembrando-se que o set point é uma função de pertinência trapezoidal, logo a faixa em torno de 5cP foi de $\pm 1\text{cP}$.

Com o controlador no modo automático, foi realizado a mudança de set point de $30 \pm 1\text{cP}$ para $35 \pm 1\text{cP}$, onde devido a essa mudança, o controlador iniciou a dosagem de CMC, e assim pode-se observar o período transitório em que a hidratação da CMC eleva o valor medido da viscosidade efetiva ao novo patamar.

Logo após, pela necessidade de retirada do fluido de perfuração do tanque, há um erro de medição da variável, que ao fim desta operação, se estabilizou dentro da faixa do novo set point em 34cP . Assim, novamente o set point foi reduzido para $30\text{cP} \pm 1\text{cP}$. A figura 61 ilustra a operação de variação do set point.

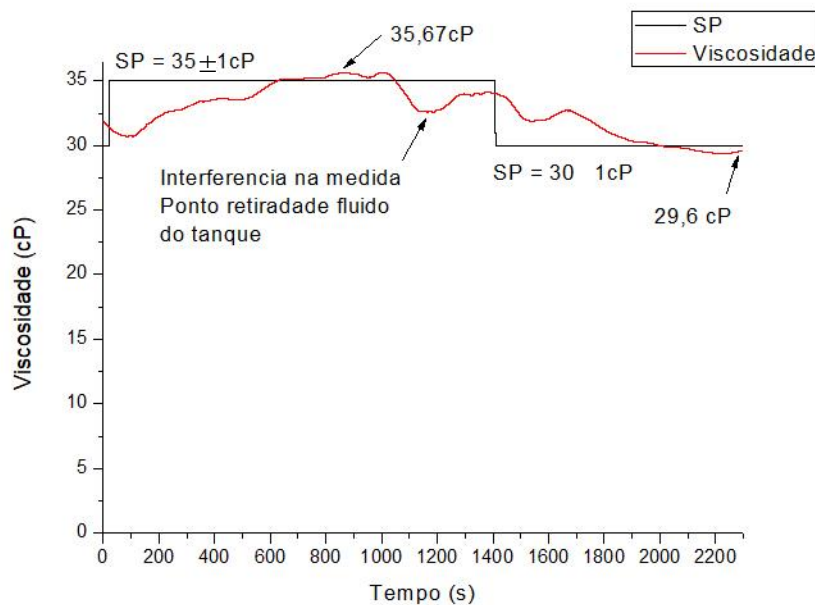


Figura 61. Gráfico de viscosidade e set point do teste problema do tipo servo

Com a mudança negativa do set point, o controlador iniciou a dosagem de água com modulação de amplitude e tempo de adição, e observa-se a redução não linear da viscosidade até atingir a estabilidade dentro do set point de $30\text{cP} \pm 1\text{cP}$.

A figura 62 ilustra a ação de controle na dosagem de CMC na variação positiva, e de água na variação negativa do set point.

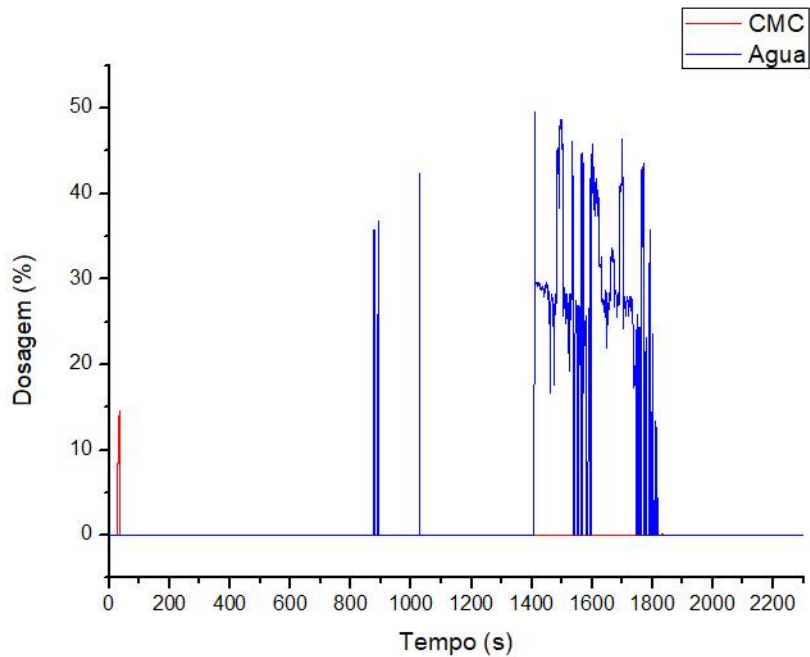


Figura 62. Gráfico de dosagem de CMC e água do teste problema tipo servo

Na figura 63, pode-se observar com mais detalhe a ação do controlador *fuzzy* em dosar CMC no início da operação, seguido da mudança da viscosidade até alcançar o tempo de acomodação com 578s (aproximadamente de 10 minutos), permanecendo dentro da faixa de set point por mais 422s conforme ilustra o gráfico. Detectada pelo controlador uma tendência (taxa de variação) de aumento da viscosidade, uma dosagem de água foi realizada para manter a viscosidade dentro da faixa de set point de $35\text{cP} \pm 1\text{cP}$.

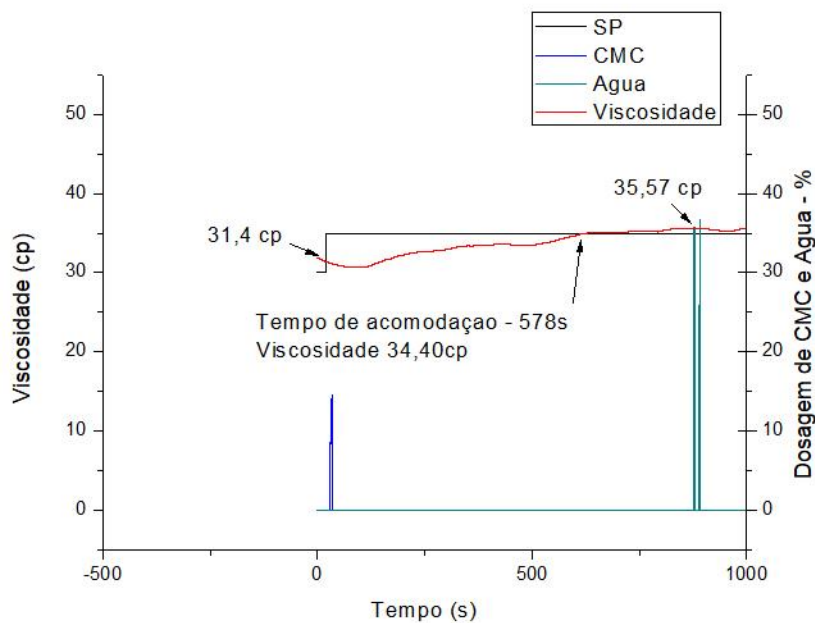


Figura 63. Gráfico com todas as variáveis medidas sobrepostas de teste problema tipo servo – 1ª etapa

Dando continuidade a análise da curva, após a estabilização da viscosidade, e antes de iniciar o teste de descida, em aproximadamente 1000s, foi realizada uma retirada de fluido do perfuração do tanque de mistura, se antecedendo a possíveis problemas de interrupção de teste por extrapolação de nível de tanque, pois nesta etapa haveria muita injeção de água.

Com isso está apontado no gráfico da figura 64, o momento em que é causado um erro na leitura fornecida pelo viscosímetro tubular, devido a queda de pressão na linha de recirculação do fluido de perfuração.

No encerramento da manobra de retirada parcial do fluido de perfuração do tanque, aguardou-se a estabilização da viscosidade que apresentou valor de 34cP, e assim procedendo, aplicou-se o degrau negativo no set point, retornando-o para $30\text{cp} \pm 1\text{cP}$. Imediatamente o controlador *fuzzy* iniciou a dosagem de água que se encerrou ao se atingir novamente o set point com tempo de acomodação de 454s.

Nota-se pelas curvas de dosagem, a modulação da amplitude de dosagem de água mediante ao valor do erro e sua taxa de variação. A medida em que se aproxima do set point a amplitude de dosagem diminuiu.

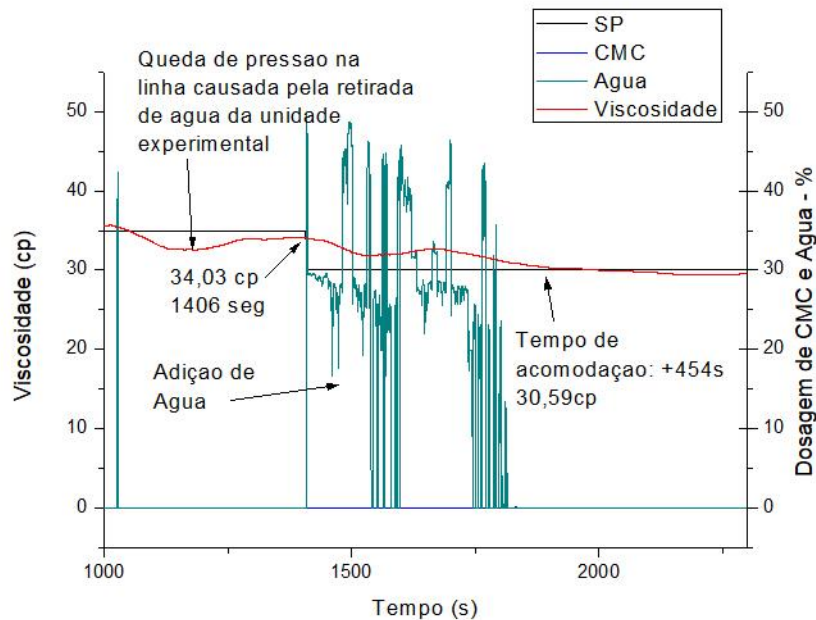


Figura 64. Gráfico com todas as variáveis medidas sobrepostas de teste problema tipo servo – 2ª etapa

Na figura 65 pose-se visualizar o gráfico com todas as variáveis medidas sobrepostas, contendo as ações de controle e curva de reação da viscosidade efetiva de toda operação.

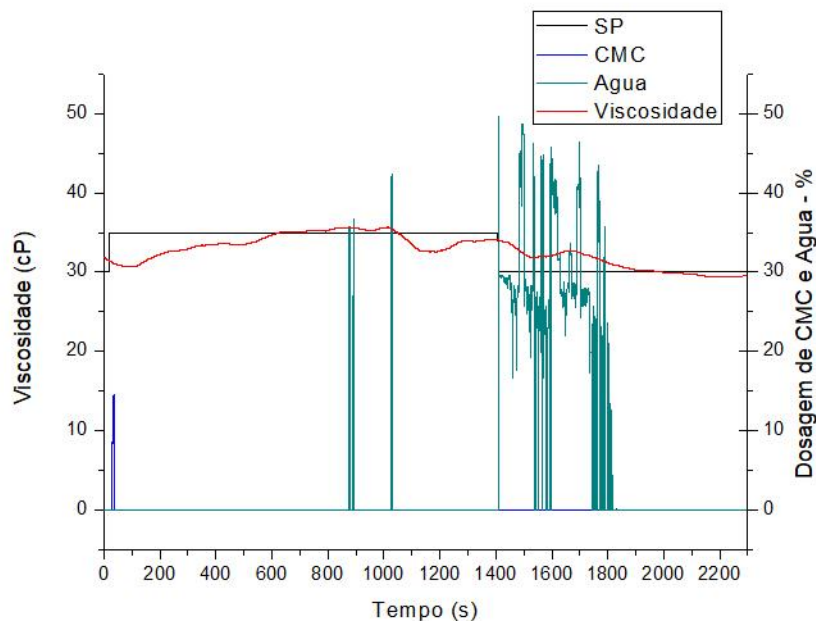


Figura 65. Gráfico com todas as variáveis medidas sobrepostas do teste problema tipo servo.

No teste com problemas do tipo servo, o controlador *fuzzy* acionou as saídas de dosagem de CMC e água conforme parametrização das funções de pertinência e o mapa de regras da base de conhecimento, onde obteve êxito em manter a viscosidade dentro do set point. A exceção se fez pela manobra manual realizada na retirada do excesso do fluido de perfuração para dar continuidade ao teste, mas que foi realizado num período em que a variável estava estabilizada, não gerando prejuízos ao desempenho do controlador na última etapa do teste.

5.3. Discussão dos Resultados

O controle da viscosidade efetiva do fluido de perfuração realizado pelo controlador *fuzzy*, programado no software *LabVIEW*®, foi testado na capacidade de manter a variável controlada dentro da faixa de set point, com valor mínimo de 30cP e máximo de 31cP.

O controle da variável viscosidade com uso de CMC carboximetilcelulose, tem alto grau de complexidade devido ao seu elevado tempo morto (tempo de hidratação) que variou entre 12 e 30 minutos nos testes.

A solução adotada, foi realizar a programação do controlador *fuzzy* com as entradas de erro e da variação do erro da viscosidade, onde a quantificação das dosagens de água e CMC, próximas do ideal, foram possíveis.

O tempo de hidratação da CMC e de diluição de água no fluido de perfuração, foram determinantes para se registrar os tempos de subida e descida da viscosidade ao encontro do set point, e constitui-se de um grande desafio de controle. O alto poder viscosificante da CMC, foi outro desafio para a dosagem do produto, que precisou de várias interferências nos parâmetros das funções de pertinência.

O limite entre homogeneizar o fluido, que possui viscosidade variável, e o de iniciar um processo de aeração deste fluido no agitador foi outro fator crítico que afetou muitas horas de teste, pois com a aeração do fluido, os gases dissolvidos se acumularam nas câmaras sensoras do transmissor de pressão diferencial do viscosímetro tubular.

As funções de pertinência e regras *fuzzy* foram aperfeiçoadas ao longo dos testes pela observação do comportamento do processo como um todo, comprovando também, que a

importância do conhecimento do operador e especialista do processo são fatores determinantes para o aumento da precisão e aprimoramento da base de conhecimento do controlador *fuzzy*.

Foi cumprido o objetivo do teste para o problema do tipo regulador com aplicação de água e CMC, assim como também para o problema do tipo servo, mantendo estabilizada a variável controlada viscosidade dentro do intervalo do set point.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido um sistema de controle da viscosidade efetiva da solução de carboximetilcelulose e água utilizada em fluidos de perfuração, com uso da tecnologia *fuzzy*, testado em uma unidade experimental e avaliado seu desempenho.

Neste trabalho, a revisão da literatura apresentou o sistema de perfuração de poços de petróleo, assim como o processo de produção de fluidos de perfuração, demonstrando a importância da preservação de seus parâmetros dentro dos limites operacionais. Foram também descritas as bases da tecnologia *fuzzy* e seus princípios, onde se enquadra perfeitamente ao completar aspectos imprecisos no raciocínio lógico utilizados pelos seres humanos (SHAW & SIMÕES, 2007).

Uma unidade experimental foi construída para realizar testes automáticos de filtração no LEF/UFRRJ, logo após, passou por alterações para uso no controle da densidade de fluido de perfuração até chegar a este momento, adaptada para o controle da viscosidade efetiva, sem perder a capacidade para futuramente controlar ambas as variáveis. A unidade experimental é composta por tanque de mistura com agitador acoplado, bomba de deslocamento positivo para circulação do fluido de perfuração, dosador vibratório de sólidos para o viscosificante, bomba dosadora de água, sistema de aquisição e controle de processos, instrumentação para medição de vazão, nível pressão, temperatura e densidade. Os pontos fundamentais para da modificação foram a instalação de um novo circuito de tubulações para permitir a construção de um viscosímetro tubular. Para montagem do viscosímetro foram instalados um sensor de pressão diferencial e um sensor de vazão, que transmitem informações on-line para serem usadas em algoritmo de cálculo e se obter o valor da viscosidade efetiva. Foi realizado uma revisão completa da parte elétrica e instrumentação da unidade, eliminando-se pontos de fragilidade para operação. A construção da unidade experimental permitiu a realização do preparo de fluido de perfuração, onde o sistema de controle e aquisição de dados composto pelo CLP da *National Instruments*, e o software *LabVIEW*® demonstrou-se confiável, robusto e de grande precisão, mostrando-se apropriado para o uso no estudo do controle *fuzzy*.

Na modelagem e controle *fuzzy*, foi detalhado como foram parametrizadas as funções de pertinência, que são as bases da interface entre o domínio do mundo dos números reais e o domínio dos números *fuzzy*. Foi apresentado o mapa de regras, onde pelo método de inferência Mandani, pode-se conceber a base de regras que compõe a base da “inteligência” *fuzzy*. Destaca-se a opção da estratégia de controle em realizar o controle *fuzzy* com as entradas de viscosidade e a sua taxa de variação no tempo, o que permitiu trabalhar a programação *fuzzy* de modo a minimizar os problemas causados pelo alto tempo morto gerado pela hidratação da CMC carboximetilcelulose que atua como viscosificante do fluido de perfuração.

Foram realizados ensaios classificados por problemas do tipo regulador e tipo servo. Nos problemas do tipo regulador, foram aplicados água e posteriormente CMC na qualidade de uma função degrau para perturbar o sistema, observando seu comportamento e ações do controlador sobre o processo. A dosagem de água na diluição do fluido de perfuração, com objetivo de controle em diminuir a viscosidade, tem comportamento de reposta não linear, com variação percebida imediatamente após aplicação. Já o comportamento do processo com a dosagem de CMC, passa pelo desafio de se ter um tempo morto elevado, onde a quantidade dosada fez toda a diferença. Nesta etapa foi observado que a estratégia de controle foi apropriada e absorveu os problemas causados pelas perturbações, fazendo com que a variável controlada estivesse estável, e retornando para faixa do set point. O controlador *fuzzy* conseguiu tempo de acomodação de 766 segundos para perturbação com água, e 482 segundos para estabilizar a viscosidade que teve perturbação por aplicação de CMC.

No problema do tipo servo foi modificado o valor de set point para cima (+ 5cP) e depois para baixo (- 5cP). Novamente o controlador *fuzzy* se mostrou apropriado nas ações para

solução do problema do tipo servo, dosando com precisão as quantidades necessárias de CMC e posteriormente água, trazendo a variável controlada para faixa do set point. Para o problema do tipo servo, o controlador *fuzzy* conseguiu com que o processo chegasse a estabilidade no tempo de acomodação de 578s na subida e de 454s na descida do set point.

De modo geral, o controle da viscosidade de fluidos de perfuração é um grande desafio devido a sua característica de estar em constante mudança durante o processo de produção, e destaca-se neste cenário a filosofia *fuzzy* que tem uma proposta complementar ao convencional, alcançando espaços antes não atingidos pelos controladores tradicionais. O controlador *fuzzy* alcançou os resultados previstos, demonstrando ser uma ferramenta da inteligência artificial de grande potencial para continuidade a pesquisa de controle de processo de produção de fluidos de perfuração para o setor de petróleo.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de continuidade da pesquisa envolvendo o controle *fuzzy* aplicados ao processo de produção dos fluidos de perfuração, sugere-se realizar a aplicação desta tecnologia no controle de ambas as variáveis densidade e viscosidade. Isto representa um grande desafio devido a sua interação no que tange a correção das variáveis controladas, onde a ação de controle de correção para uma pode significar sair do set point na outra.

Com relação a busca por melhoria de controle, estabilidade e tempos de resposta, sugere-se as ações subsequentes:

- Aumentar o número de funções de pertinência, melhorando a precisão;
- Otimização da base de regras;
- Criar um controle que relacione a variação da viscosidade com a velocidade do misturador, a fim de se prevenir a aeração do fluido de forma automática.

Na busca de melhorias para unidade experimental, sugere-se:

- Montar estrutura e instalar um segundo dosador de sólidos para controle da densidade e viscosidade;
- Montar uma estrutura para selar a entrada das câmaras sensoras do transmissor diferencial de pressão utilizado no viscosímetro tubular e assim prevenir contra o depósito de sólidos e acúmulo de gases que podem interferir no funcionamento do instrumento;
- Instalar outra saída para retirada do excesso de fluido, fora da linha de circulação da bomba helicoidal para não precisar paralisar o controle para realizar esta operação;
- Operacionalizar o segundo tanque para aumento da capacidade.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, R. F., Desenvolvimento de uma célula de filtração com operação automática para monitoramento de dados *online*. Seropédica, RJ. 2016.

BARRETO, Victor et al. Desenvolvimento de lógica *Fuzzy* para controle de pressão em sistemas de abastecimento. **Hydro**, São Paulo - SP, v. 129, 29 set. 2017. Disponível em: <http://www.arandanet.com.br/revista/hydro/materia/2017/09/21/desenvolvimento_de_logica.html>. Acesso em: 19 jul. 2019.

BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. **Tópicos de lógica fuzzy e biomatemática**. Campinas: Comissão de Publicações IMECC/UNICAMP, 2006. (Coleção IMECC, Textos didáticos, v. 5).

BEZERRA, Saulo de Tarso Marques. **Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia**. 2009. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - Pb, 2009. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/teses/teses/tese_saulo.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2019.

BISPO, Vitor Diego da Silva. **Desenvolvimento de um Sensor Virtual para Estimativa da Viscosidade Aparente de Fluidos de Perfuração à Base de Água**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, Fevereiro de 2014.

CAENN, R.; CHILLINGAR, G. V. Drilling fluids: State of the art. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 14, n. 3-4, p. 221-230, 1996.

DERRICK: Catálogo de Produtos. 2018. Disponível em: <<http://derrick.com/Products/>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

FANN: Modelo 35A. 2016. Manual do Fabricante. Disponível em: <<https://www.fann.com/content/dam/fann/Manuals/Model%2035%20Viscometer.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

GN SOLIDS CONTROL: Vibration Motor for Shale Shaker. 2010. Disponível em: <<http://www.gn-decanter-centrifuge.com/mud/vibration-motor-for-shale-shaker>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

GODOI, Maurício; CARNIER, Theo. **GEOPOLÍTICA DO PETRÓLEO**: Empresa brasileira desenvolve broca de diamante para pré-sal utilizando tecnologia aeroespacial. 2010. Disponível em: <<https://geopoliticadopetroleo.wordpress.com/2010/07/28/empresa-brasileira-desenvolve-broca-de-diamante-para-pre-sal-utilizando-tecnologia-aeroespacial/>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

GOMES, Mário Batista. **Proposta de um Roadmap para Avaliação de Riscos em Projetos de Perfuração Direcional Horizontal**. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2016

GOMIDE, F.A.C, GUDWIN, R.R. Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica *Fuzzy*. **SBA Controle & Automação**, Vol.4 n°3, setembro-outubro 1994.

GUIMARÃES, I. B.; ROSSI, L. F. S. **Estudo dos constituintes dos fluidos de perfuração: proposta de uma formulação otimizada e ambientalmente correta**. 4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás (PDPETRO). Campinas – SP, 2007.

INDIAMART: Mild Steel Offshore Mud Tank. 2018. Catálogo de Produtos. Disponível em: <<https://www.indiamart.com/proddetail/offshore-mud-tank-4475108730.html>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

LEITE, M. S., Estudo comparativo do desempenho de controladores *fuzzy* e convencional aplicados em um bioprocessos. Campinas, SP. 2007.

MAGALHÃES FILHO, S. da C. et al. STUDY OF CONTINUOUS RHEOLOGICAL MEASUREMENTS IN DRILLING FLUIDS. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. Rio de Janeiro - Rj, p. 775-788. jul. 2017.

MAMDANI, E. H., Application of *fuzzy* logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. IEEE, Transactions on Computers, Vol.C-26, No. 12, 1977.

NI LabVIEW ®. 2013. Software Versão: 13.0

NOBREGA, K. C.; AMORIM, L. V.. Influência da massa molar de CMC no comportamento reológico e de filtração de suspensões argilosas. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 360, p. 399-408, dez.2015. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S036669132015000400399&lng=pt&nrm=iso>. Acessos em 20 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613601904>.

PEREIRA, F. A. R. **Escoamento laminar de líquidos não newtonianos em seções anulares: estudos de CFD e abordagem experimental**. 2006. 229 p. Dissertação (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RACHID, Anderson da Silva. **Modelagem e Controle *Fuzzy* da Densidade de Fluidos de Perfuração**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, agosto de 2018.

ROSENANI, Raja. **SLIDE SHARE: Drilling and Production**. 2014. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/rajarosenani/drilling-and-producing-well>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

SANDRI, S., CORREA, C., Lógica Nebulosa. V Escola de Redes Neurais, Promoção: Conselho Nacional de Redes Neurais, pp. c073-c090, ITA, São José dos Campos, SP. 1999.

SCHIASSI, Leonardo et al. METODOLOGIA FUZZY APLICADA À AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA TEMPERATURA CORPORAL EM FRANGOS DE CORTE. **REVISTA ENGENHARIA NA AGRICULTURA - REVENG**, Viçosa, MG, v. 16, n. 2, set. 2008. ISSN 2175-6813. Disponível em: <<https://periodicos.ufv.br/ojs/reveng/article/view/11>>. Acesso em: 18 ago. 2019. doi:<https://doi.org/10.13083/reveng.v16i2.15>.

SCHLUMBERGER: CMP 1600 Mud Pump. Catálogo de Produtos. Disponível em: <<https://www.products.slb.com/rig-equipment/mud-pumps-mixing-processing/mud-pumps/cmp-1600-mud-pump>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

SEBORG, D., E.; EDGAR, T., F.; MELLICHAMP, D., A.; DOYLE, F., J., Process, dynamics and control, 3^o ed., Wiley, 2011.

SHAW, I. S., SIMÕES, M. G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 2a edição, 2007.

SHIROMA, P. H. **Estudo do comportamento reológico de suspensões aquosas de bentonita e CMC: influência da concentração do NaCl** 2012. 130 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

SOUZA, B. A., Desenvolvimento de Controlador Multivariável *Fuzzy* Aplicado em um Processo de Destilação de Óleo Fúsel. Campinas, SP. 2015.

TAKAGI, T., SUGENO, M. *Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. smc-15, n. 1, p. 116-143, 1985.

THOMAS, J. E. **Fundamentos da Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

VARGAS, Mariana Lima do Vale. **USO DE MODELOS NEURONAISS ASSOCIADOS A ALGORITMOS EVOLUTIVOS DE OTIMIZAÇÃO COMO SUPORTE À PREPARAÇÃO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO**. Monografia (Graduação). Departamento de Engenharia Química do Instituto de Tecnologia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, dezembro de 2017.

VIDAL, Leonardo de Carvalho; LANDIM, Wellington Carlos de Almeida; COSTA, Alessandro Pires. Aplicação de Lógica *Fuzzy* no Controle de Plantas Industriais. In: SEGET - SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 2012, Resende-RJ

WAKABAYASHI, Claudio. **ANÁLISE E CONTROLE FUZZY DE PROCESSOS: ESTUDO DE CASO EM UM REATOR DE POLIMERIZAÇÃO**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2007.

XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS ENEMP, 27., 1999, Campos do Jordão - SP. **Anais...** Campos do Jordão - SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Química, 1999. 1 v.

ZADEH, L. A., *Fuzzy sets*. Information and Control, v. 8, 1965.

APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO NO LABVIEW®

Sistema de aquisição de dados:

Responsável pela aquisição das informações das entradas vindas dos instrumentos de medição na unidade experimental - Densidade do fluido, medição do nível e pressão da linha de requalque da bomba helicoidal; vazão da bomba de recirculação e medição da pressão diferencial DP do viscosímetro tubular conforme figura 66.

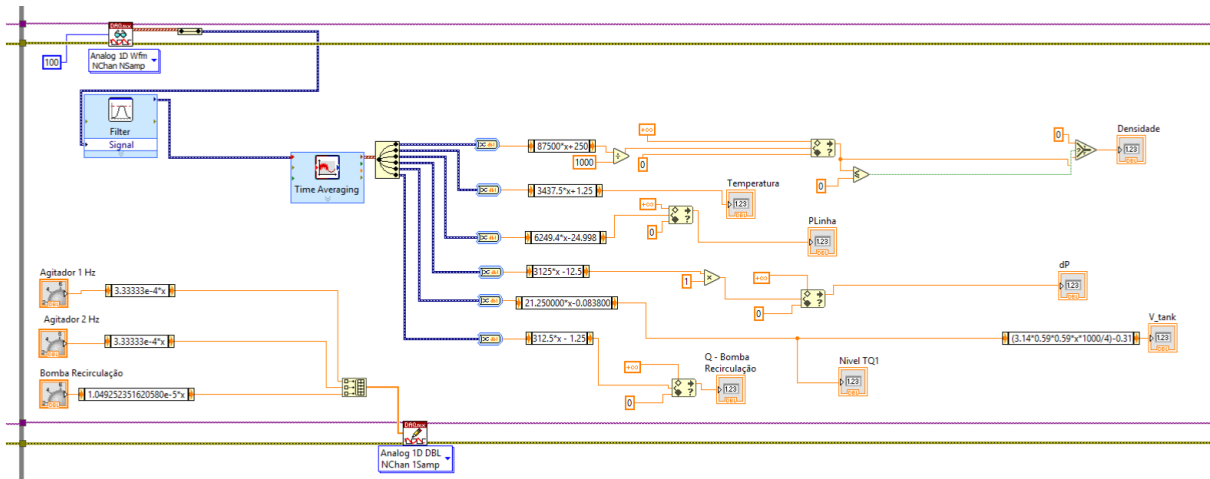


Figura 66. Programação no LabVIEW - Sistema de aquisição de dados

Blocos do controlador fuzzy

São blocos de programação no LabVIEW responsáveis pela leitura das regras (IF THEN) e por executar as regras (MIMO), conforme figura 67.

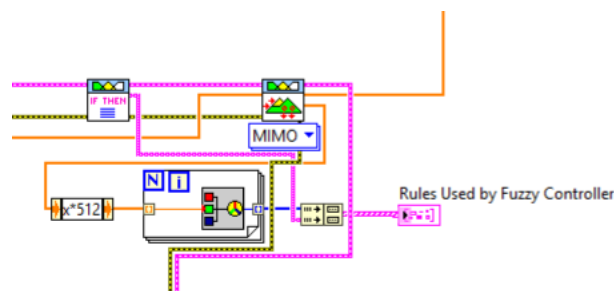


Figura 67. Blocos do controlador fuzzy

Blocos responsáveis pela mudança no set point no teste servo

São compostos por blocos com função de leitura das regras atuais (imagem do bloco com óculos), soma dos valores que são acrescentados, e escrita das novas funções de pertinência na base de regras (imagem do bloco com caneta), conforme figura 68.

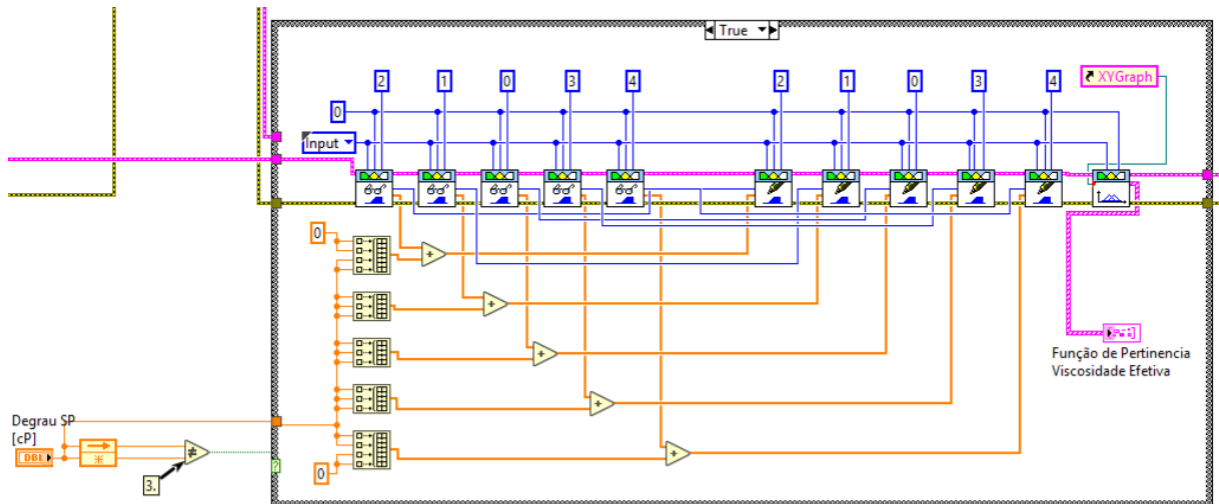


Figura 68. Blocos responsáveis pela mudança no set point no teste servo

Algoritmo de cálculo em blocos da viscosidade.

Com a informação de vazão da bomba de circulação, diferença de pressão no trecho reto de linha L e raio R da tubulação é possível o cálculo da viscosidade efetiva conforme figura 69.

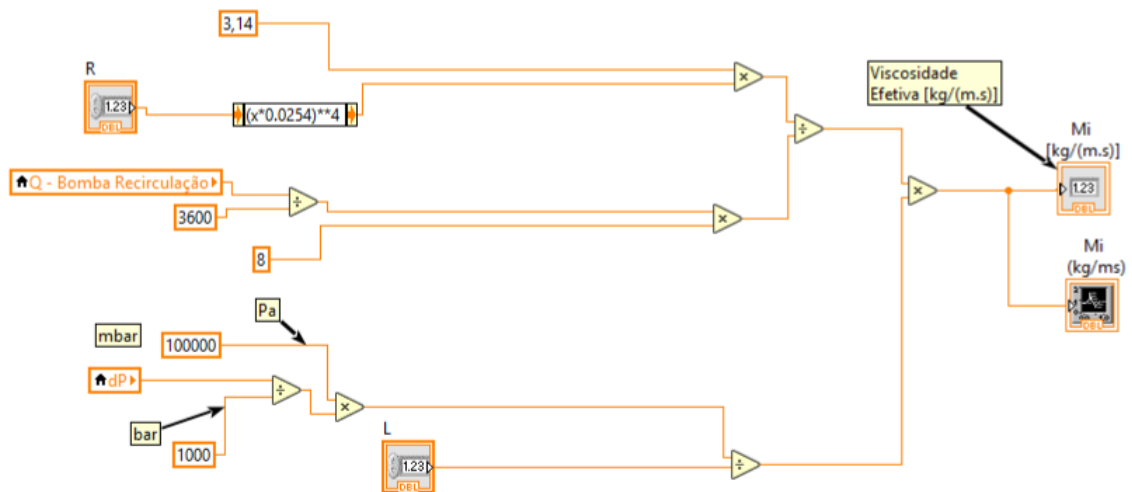


Figura 69. Algoritmo de cálculo em blocos da viscosidade.