



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA (PEQ-UFS)

JOSÉ ANDERSANDS FLAUZINO CHAVES

**CONTROLE PLANTWIDE DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÓLEO DE UM
FPSO DO PRÉ-SAL BRASILEIRO EMPREGANDO LÓGICA NEURO-FUZZY COM
OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMOS GENÉTICOS E CONTROLE OVERRIDE**

SÃO CRISTÓVÃO (SE)

2023

JOSÉ ANDERSANDS FLAUZINO CHAVES

**CONTROLE PLANTWIDE DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÓLEO DE UM
FPSO DO PRÉ-SAL BRASILEIRO EMPREGANDO LÓGICA NEURO-FUZZY COM
OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMOS GENÉTICOS E CONTROLE OVERRIDE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Francisco da Silva

SÃO CRISTÓVÃO (SE)

2023

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

C512c Chaves, José Andersands Flauzino
Controle *plantwide* do processo de tratamento de óleo de um FPSO do pré-sal brasileiro empregando lógica neuro-fuzzy com otimização por algoritmos genéticos e controle *override* / José Andersands Flauzino Chaves ; orientador Gabriel Francisco da Silva. - São Cristóvão, 2023.
182 f. :il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, 2023.

1. Inteligência artificial. 2. Aprendizado do computador. I. Silva, Gabriel Francisco da, orient. II. Título.

CDU 66:004.8

JOSÉ ANDERSANDS FLAUZINO CHAVES

**CONTROLE PLANTWIDE DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÓLEO DE UM
FPSO DO PRÉ-SAL BRASILEIRO EMPREGANDO LÓGICA NEURO-FUZZY COM
OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMOS GENÉTICOS E CONTROLE OVERRIDE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, como requisito final para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Sergipe.

Aprovado em 30 de Maio de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



GABRIEL FRANCISCO DA SILVA
Data: 31/05/2023 11:46:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Gabriel Francisco da Silva – Orientador

Universidade Federal de Sergipe

Documento assinado digitalmente



ROBERTO RODRIGUES DE SOUZA
Data: 01/06/2023 13:26:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Roberto Rodrigues de Souza - Examinador Interno ao PEQ/UFS

Universidade Federal de Sergipe

Documento assinado digitalmente



ROSIVANIA DA PAIXAO SILVA OLIVEIRA
Data: 06/06/2023 09:57:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Rosivânia da Paixão Silva Oliveira - Examinador Externo ao PEQ/UFS

Universidade Federal de Sergipe

DECLARAÇÃO DE VERSÃO FINAL

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química concluída no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Documento assinado digitalmente
 GABRIEL FRANCISCO DA SILVA
Data: 31/05/2023 11:48:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gabriel Francisco da Silva
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ
Universidade Federal de Sergipe - UFS

É concedido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) responsável pelo Curso de Mestrado em Engenharia Química permissão para disponibilizar, reproduzir cópia desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias.

Documento assinado digitalmente
 JOSE ANDERSANDS FLAUZINO CHAVES
Data: 06/06/2023 10:31:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

José Andersands Flauzino Chaves
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ
Universidade Federal de Sergipe - UFS

Documento assinado digitalmente
 GABRIEL FRANCISCO DA SILVA
Data: 31/05/2023 11:51:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gabriel Francisco da Silva
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ
Universidade Federal de Sergipe - UFS

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus que me deu energia e condições de concluir esse trabalho.

Aos meus pais, José Acácio e Maria do Socorro, que me incentivaram a continuar estudando como forma de atingir meus objetivos e me tornar uma pessoa melhor.

Aos meus irmãos Allyson, Andressa, Samilly e Gabriela que sempre foram pacientes e compreensivos para entender que minhas ausências em casa eram necessárias para finalização desse estudo.

Aos meus amigos que tiveram compreensão em todos os momentos que tive que me ausentar das confraternizações e lazer para me dedicar a esse estudo.

A empresa que trabalhei, Petrobras S.A., por fornecer as informações necessárias a elaboração desse estudo.

Ao professor Gabriel Francisco da Silva por ter me orientado com muita atenção e dedicação a fim de realizarmos esse trabalho com qualidade.

A UFS e Governo Federal por fornecerem a estrutura e programa necessários a realização da minha formação como mestre de forma gratuita e com qualidade.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que fizeram parte dessa etapa da minha vida que me traz muito orgulho e felicidade.

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”

Walter S. Landor.

RESUMO

Com a demanda crescente por combustíveis e com a perspectiva de exaustão das jazidas de petróleo convencionais em todo o mundo é necessário viabilizar a produção de petróleo nos ambientes mais hostis e complexos existentes. Um desses ambientes é o Pré-sal brasileiro, dotado de diversos desafios tecnológicos para a sua produção, como a elevada lâmina d'água que o recobre e pela composição dos fluídos produzidos que contêm altos teores de N_2 e CO_2 . Paralelamente a este cenário, observamos o surgimento da 4ª revolução industrial, também chamada de Indústria 4.0, e que surge acompanhada da aplicação de inteligência artificial e machine learning como formas de viabilizar a produção industrial na sua máxima eficiência com segurança e controle. Nesse trabalho é proposto a utilização de técnicas avançadas de automação e controle de processos por meio de: Controle Plantwide, Lógica Fuzzy, Sistemas Especialistas, Redes Neurais, Algoritmos Genéticos, Gain Scheduling Control e Controle Override. Primeiro foi elaborada uma modelagem do tipo não linear e de parâmetros concentrados do processo de tratamento de óleo de um FPSO (Floating, Production, Storage and *Offloading*) que hoje opera no pré-sal brasileiro pela Petrobras, no Simulink® do Matlab®, validada a partir da comparação com os dados reais da planta de processo e de seu projeto. Em seguida, feito o projeto e implementado as malhas de controle dos equipamentos modelados e simulados utilizando a técnica de controle Plantwide para avaliar a forma mais produtiva do processo ser controlado com base nas formas de controle da alimentação da planta, dos seus ciclos e das restrições impostas pela saída do processo a partir de lógica neuro-fuzzy, sistema especialista e controle override. Além disso, foi proposto a automação e controle da abertura dos chokes dos poços via lógica fuzzy e redes neurais, e a automação do setpoint dos separadores parametrizados por um estudo feito em algoritmos genéticos com sistema especialista. Com esse trabalho, foi possível encontrar um modelo de produção em que a planta opera com maior estabilidade e rentabilidade, com um aumento da receita financeira de forma significativa para o processo de produção de petróleo do FPSO em análise e, com isso, obtendo um resultado bem melhor que o previsto inicialmente. Como perspectiva futura fica a aplicação dessa tecnologia também para o tratamento do gás e água da plataforma e de aplicação de fluidodinâmica computacional para evolução dos sistemas criados.

Palavras-chave: inteligência artificial; machine learning; processamento em FPSO.

ABSTRACT

With the growing demand for fuels and with the prospect of exhaustion of conventional oil deposits around the world, it is necessary to make oil production viable in the most hostile and complex existing environments. One of these environments is the Brazilian pre-salt, which has several technological challenges for its production, such as the high water depth that covers it and the composition of the produced fluids that contain high levels of N₂ and CO₂. In parallel with this scenario, we observe the emergence of the 4th industrial revolution, also called Industry 4.0, which is accompanied by the application of artificial intelligence and machine learning as ways to enable industrial production at its maximum efficiency with safety and control. This work proposes the use of advanced automation and process control techniques through: Plantwide Control, Fuzzy Logic, Expert Systems, Neural Networks, Genetic Algorithms, Gain Scheduling Control and Override Control. First, a non-linear and concentrated parameter modeling of the oil treatment process of an FPSO (Floating, Production, Storage and *Offloading*) that currently operates in the Brazilian pre-salt by Petrobras was elaborated, using the Simulink® of Matlab®, validated from the comparison with the real data of the process plant and its design. Then, the project was made and the control loops of the modeled and simulated equipment were implemented using the Plantwide control technique to evaluate the most productive way for the process to be controlled based on the ways of controlling the plant's power supply, its recycles and restrictions. imposed by the process output from neuro-fuzzy logic, expert system and override control. In addition, it was proposed the automation and control of the opening of the chokes of the wells via fuzzy logic and neural networks, and the automation of the setpoint of the separators parameterized by a study carried out in genetic algorithms with an expert system. With this work, it was possible to find a way in which the plant operates with greater stability and profitability, with a gain in production and a significant increase in revenue for the oil production process of the FPSO under analysis, thus obtaining a much better result. than originally planned. As a future perspective is the application of this technology also for the treatment of the gas and water of the platform and the application of computational fluid dynamics for the evolution of the created systems.

Keywords: Artificial Intelligence; Machine Learning; FPSO processing.

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Evolução dos sistemas de controle.....	34
Tabela 02: Parâmetros para controladores via SD.....	37
Tabela 03: Fórmulas para análise de desempenho.....	37
Tabela 04: Parâmetros para controladores via Ultimate-Gain.....	38
Tabela 05: Funções do controlador em Z.....	40
Tabela 06: Funções de ativação.....	62
Tabela 07: Metodologias de controle plantwide.....	79
Tabela 08: Metodologia para projeto de controle plantwide - Skogestad (2004).....	80
Tabela 09: Tipos de característica inerente de válvulas.....	88
Tabela 10: Efetividade e NUT do trocador de calor casco e tubo.....	99
Tabela 11: Proposta de metodologia para projeto de controle plantwide.....	106
Tabela 12: Objetivos específicos, categorias de análise e elementos de análise.....	118
Tabela 13: Questão de pesquisa, unidade de análise e procedimentos.....	119
Tabela 14: Simulações realizadas para validação dos modelos.....	123
Tabela 15: Comparativo entre o resultado da Simulação 1 versus o Projeto do FPSO.....	124
Tabela 16: Comparativo entre o resultado da Simulação 2 versus a produção do FPSO a 100%.....	124
Tabela 17: Comparativo entre o resultado da Simulação 3 versus produção do FPSO a 85%.....	125
Tabela 18: Tabela de sintonias possíveis para temperatura e indicadores de desempenho para o P-1223002.....	130
Tabela 19: Tabela de sintonias possíveis para temperatura e indicadores de desempenho para o P-1223005.....	130
Tabela 20: Tabela de sintonias possíveis de pressão e indicadores de desempenho para o SG-1223001.....	135
Tabela 21: Tabela de sintonias possíveis de pressão e indicadores de desempenho para o V-TO-1223001.....	136
Tabela 22: Tabela de sintonias possíveis de pressão e indicadores de desempenho para o V-TO-1223002.....	136

Tabela 23: Tabela de sintonias possíveis de nível e indicadores de desempenho para o SG-1223001.....	140
Tabela 24: Tabela de sintonias possíveis de nível e indicadores de desempenho para o V-TO-1223001.....	141
Tabela 25: Tabela de sintonias possíveis de nível e indicadores de desempenho para o V-TO-1223002.....	141
Tabela 26: Sensibilidade dos pontos possíveis de controle de vazão com controle Fuzzy-PID.....	151
Tabela 27: Comparativo de desempenho controle PID versus controle Fuzzy-PID.....	155
Tabela 28: Comparativo de desempenho controle PID versus controle Fuzzy-PID.....	155
Tabela 29: Comparativo de desempenho controle Fuzzy-PID Poço A versus Poço E.....	157
Tabela 30: Restrições, limites e condições esperadas.....	167
Tabela 31: Variáveis a serem manipuladas e tipos de controle implantado.....	167
Tabela 32: Retorno financeiro das propostas.....	170

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção de petróleo anual por local dos poços.....	21
Figura 2 – Representação das camadas de rocha na região do pré-sal.....	22
Figura 3 – Plataforma do tipo FPSO da Petrobras saindo do estaleiro.....	22
Figura 4 – Esquema genérico do processamento em uma plataforma.....	23
Figura 5 – Esquema de interligação entre poços e uma plataforma.....	24
Figura 6 – Distribuição das tecnologias por setores.....	25
Figura 7 – Esquema de interligação dos poços a um FPSO típico.....	30
Figura 8 – Esquema básico do processamento de petróleo de um FPSO.....	31
Figura 9 – Exemplo de planta bifásica para processamento de petróleo.....	32
Figura 10 – Fluxograma de parte do processamento de petróleo e gás em um FPSO.....	33
Figura 11 – Malha típica de controle por realimentação.....	34
Figura 12 – Hierarquia de atividades de controle de processo.....	35
Figura 13 – Controles PIDs no tempo e Laplace.....	36
Figura 14 – Estável dentro do círculo conforme pontos (3) e (4).....	38
Figura 15 – Representação de uma malha típica por controle digital.....	39
Figura 16 – Metodologia para projeto de controlador.....	40
Figura 17 – Diferença entre sistema interativo e não interativo.....	42
Figura 18 – Variação da amplitude de variação do nível ao percorrer a planta.....	43
Figura 19 – Controle feedback de nível e pressão em vaso separador.....	44
Figura 20 – Malha típica de controle por realimentação.....	45
Figura 21 – Movimento de um FPSO e do mar.....	45
Figura 22 – Movimento de pitch e seus efeitos.....	46
Figura 23 – Movimento de roll e seus efeitos.....	46
Figura 24 – Trocador de calor e malha de controle de temperatura.....	48
Figura 25 – Lógica fuzzy para ajuste de PIDs.....	51
Figura 26 – Operações da Lógica fuzzy.....	51
Figura 27 – Defuzzificação pelo método do centroide.....	52
Figura 28 – Esquema para compensação de balanço.....	52
Figura 29 – Fuzzy adaptativo com controle PID no Simulink®.....	53
Figura 30 – Controlador fuzzy-PI para controle de nível.....	53

Figura 31 – Estrutura de um SE baseado em regras de produção.....	54
Figura 32 – Sistema especialista de controle de fornos da REDUC.....	55
Figura 33 – Árvore de decisão para lógica fuzzy.....	56
Figura 34 – Hierarquia clássica de aprendizado.....	57
Figura 35 – Etapas envolvidas no processo de aprendizado de máquina.....	58
Figura 36 – Representação genérica de um neurônio artificial.....	59
Figura 37 – Pseudo-algoritmo de cálculo de uma rede com um neurônio.....	60
Figura 38 – Diferença entre o cálculo do erro entre neurônios.....	61
Figura 39 – Representação de uma rede com 3 camadas escondidas.....	63
Figura 40 – Organograma das técnicas de busca.....	64
Figura 41 – Representação de máximos locais.....	65
Figura 42 – Exemplos de telas do ProcessBook®.....	69
Figura 43 – Funcionamento do banco de dados PI.....	69
Figura 44 – Teste de exceção e compressão.....	70
Figura 45 – Teste de compressão e suas etapas.....	71
Figura 46 – Média móvel em amarelo.....	72
Figura 47 – Controle override da vazão sobre a pressão.....	73
Figura 48 – Controle override de nível e pressão para controle da vazão de entrada.....	74
Figura 49 – Controle override de nível de vaso separador pela vazão.....	75
Figura 50 – Camadas de proteção de uma planta industrial.....	76
Figura 51 – Diferença entre controle fixo e adaptativo para o exemplo.....	78
Figura 52 – Evolução do número de artigos publicados sobre PWC no início das publicações.....	81
Figura 53 – Dimensões típicas de separadores.....	85
Figura 54 – Esquema das variáveis deduzidas no desenho do equipamento.....	85
Figura 55 – $f(x_v)$ típicos para abertura da válvula de 0 a 1.....	90
Figura 56 – Esquema de separação por tratamento eletrostático.....	92
Figura 57 – Simulação da planta de processo de tratamento de óleo no Simulink®.....	94
Figura 58 – Fluxograma de processo de tratamento de óleo na configuração atual.....	94
Figura 59 – Fluxograma de processo de tratamento de óleo na configuração do trabalho do Trica (2022).....	95
Figura 60 – Esquema de um trocador de calor casco e tubos.....	96
Figura 61 – Esquema proposto por Garcia – 4 seções.....	97
Figura 62 – Esquema elaborado pelo autor – segunda seção.....	97

Figura 63 – Efetividade em função da razão entre capacidades caloríficas.....	99
Figura 64 – Esquema proposto pelo autor – 6 seções.....	99
Figura 65 – Esquema proposto de placas e suas dimensões.....	100
Figura 66 – Diagrama de placas e suas dimensões.....	100
Figura 67 – Trocador de calor casco e tubo utilizado na simulação já com controlador.....	101
Figura 68 – Detalhes da estrutura de unidade FPSO.....	103
Figura 69 – Correlação para fator de compressibilidade.....	104
Figura 70 – Correlação para fator Acêntrico.....	104
Figura 71 – Esquema de treinamento e operação da rede.....	109
Figura 72 – Rede neural para determinação do tipo de plataforma.....	110
Figura 73 – Esquema básico de uso dos AG nesse trabalho.....	111
Figura 74 – Convergência da solução com o número de iterações.....	112
Figura 75 – Esquema da simulação 4 para validação do modelo do trocador.....	126
Figura 76 – Gráfico de temperatura exporta no livro ao degrau de 0,48mA na corrente de saída do controlador.....	126
Figura 77 – Temperatura exporta no simulador ao degrau de 0,48mA na corrente de saída do controlador.....	127
Figura 78 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o P-1223002.....	129
Figura 79 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o P-1223005.....	129
Figura 80 – Gráfico de avaliação do controle de temperatura no P-1223002.....	131
Figura 81 – Gráfico de avaliação do controle de temperatura no P-1223005.....	131
Figura 82 – Gráfico de avaliação do controle de temperatura no P-1223002.....	132
Figura 83 – Gráfico de avaliação do controle de temperatura no P-1223005.....	133
Figura 84 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o SG-1223001.....	134
Figura 85 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o V-TO-1223001.....	134
Figura 86 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o V-TO-1223002.....	135
Figura 87 – Gráfico de avaliação do controle de pressão no SG-1223001.....	137
Figura 88 – Gráfico de avaliação do controle de pressão no V-TO-1223001.....	137
Figura 89 – Gráfico de avaliação do controle de pressão no V-TO-1223002.....	138

Figura 90 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o SG-1223001.....	139
Figura 91 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o V-TO-1223001.....	139
Figura 92 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o V-TO-1223002.....	140
Figura 93 – Gráfico da posição da válvula em função do tempo para uma perturbação no SG-1223001.....	142
Figura 94 – Gráfico de avaliação do controle de nível no SG-1223001.....	142
Figura 95 – Gráfico de avaliação do controle de nível no V-TO-1223001.....	143
Figura 96 – Gráfico de avaliação do controle de nível no V-TO-1223002.....	143
Figura 97 – Topologia de rede neural implantada.....	145
Figura 98 – Erro da rede neural na aprendizagem e número de épocas da RNA do cálculo da vazão de óleo.....	146
Figura 99 – Erro da rede neural na aprendizagem e número de épocas da RNA do cálculo da vazão de gás.....	146
Figura 100 – Redução do número de neurônios da rede em função do erro da amostra de teste.....	147
Figura 101 – Vazão de óleo de dois poços em função da abertura do choke gerado pela RNA de óleo.....	148
Figura 102 – Vazão de gás de dois poços em função da abertura do choke gerado pela RNA de gás.....	148
Figura 103 – Vazão de óleo previsto do poço D em função da abertura do choke gerado pela RNA de óleo.....	149
Figura 104 – Vazão de gás previsto do poço D em função da abertura do choke gerado pela RNA de gás.....	149
Figura 105 – Pontos de análise de sensibilidade para instalação do Controlador Fuzzy-PID com redes neurais.....	151
Figura 106 – Controlador Fuzzy-PID com redes neurais para controle de vazão.....	152
Figura 107 – Esquema do controlador Fuzzy-PID em relação a entradas e saídas.....	152
Figura 108 – Superfície de controle das regras impostas para o Controlador Fuzzy-PID com redes neurais.....	153
Figura 109 – Resposta do Controlador Fuzzy-PID com redes neurais a variação no setpoint em 4%.....	154

Figura 110 – Resposta do Controlador Fuzzy-PID com redes neurais a queda da produtividade em 4%.....	154
Figura 111 – Resposta do Controlador Fuzzy-PID com redes neurais a variação no setpoint em 4% para o poço E.....	156
Figura 112 – Resposta do Controlador Fuzzy-PID com redes neurais a queda da produtividade em 4% para o poço E.....	156
Figura 113 – Pressão por vazão por geração para o SG-1223001.....	158
Figura 114 – Pressão por vazão por geração para o maior resultado da função objetivo SG-1223001.....	159
Figura 115 – Resultado da função objetivo por vazão para as pressões ótimas para o SG-1223001.....	159
Figura 116 – Pressão por vazão por geração para o V-TO-1223001.....	160
Figura 117 – Pressão por vazão por geração para o maior resultado da função objetivo V-TO-1223001.....	161
Figura 118 – Resultado da função objetivo por vazão para as pressões ótimas para o SG e V-TO-1223001.....	161
Figura 119 – Resultado da função objetivo por vazão para as pressões ótimas na quarta geração.....	162
Figura 120 – Controle automático de setpoint a duas perturbações na vazão.....	163
Figura 121 – Atuação do controle override ao atingimento a pressão limite.....	164
Figura 122 – Atuação do controle override ao atingimento ao nível limite.....	165
Figura 123 – Sistema especialista proposto de controle de setpoint e override.....	165

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMA DE PESQUISA.....	20
1.2 OBJETIVOS.....	26
1.2.1 Objetivo Geral.....	27
1.2.2 Objetivos Específicos.....	27
1.3 JUSTIFICATIVA.....	27
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
2.1 TRATAMENTO DE PETRÓLEO EM FPSO.....	30
2.2 CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS.....	33
2.2.1 Sistema multicapacitivo com interação.....	41
2.2.2 Controle de nível ou interface.....	43
2.2.3 Controle de pressão.....	47
2.2.4 Controle de temperatura.....	48
2.3 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	49
2.3.1 Lógica Fuzzy.....	49
2.3.2 Sistema Especialista.....	54
2.4 MACHINE LEARNING.....	56
2.4.1 Redes Neurais Artificiais.....	58
2.4.2 Algoritmos genéticos.....	63
2.5 DATA SCIENCE.....	68
2.6 CONTROLE OVERRIDE.....	73
2.7 GAIN SCHEDULING CONTROL (GSC).....	77
2.8 CONTROLE PLANTWIDE.....	78
2.9 AUTORIZAÇÃO DA EMPRESA.....	82
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	83
3.1 MODELAGEM DO TRATAMENTO DE ÓLEO.....	83
3.1.1 Modelagem do separador bifásico.....	83
3.1.2 Modelagem dos separadores eletrostáticos.....	91

3.1.3	Modelagem dos trocadores de calor.....	95
3.1.4	Modelagem dos <i>Cargo Tanks</i>	102
3.1.5	Do equilíbrio líquido-vapor.....	103
3.2	APLICANDO AS TÉCNICAS DE CONTROLE, INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MACHINE LEARNING.....	105
3.3	METODOLOGIA.....	114
3.3.1	Caracterização do estudo.....	114
3.3.2	Questões de pesquisa.....	115
3.3.3	Método da pesquisa.....	115
3.3.4	Fontes de evidência.....	116
3.3.5	Definições construtivas.....	117
3.3.6	Categorias analíticas e elementos de análise.....	117
3.3.7	Protocolo de estudo.....	119
3.3.8	Análise do caso.....	120
3.3.9	Limitações do estudo.....	120
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	122
4.1	SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS DA PLANTA DE PROCESSAMENTO DE ÓLEO.....	122
4.2	PROJETO E IMPLANTAÇÃO DOS CONTROLADORES CONVENCIONAIS NOS EQUIPAMENTOS SIMULADOS CONFORME ESQUEMA HOJE UTILIZADO PELA PLATAFORMA.....	127
4.2.1	Do controle de temperatura.....	128
4.2.2	Do controle de pressão.....	133
4.2.3	Do controle de nível/interface.....	138
4.3	ESTUDO DE REDES NEURAIIS PARA DETERMINA AS VAZÕES DE PRODUÇÃO DOS POÇOS A PARTIR DAS CONDIÇÕES IMPOSTAS NOS CHOKES DE PRODUÇÃO.....	144
4.4	CONTROLADOR FUZZY PID DE AJUSTE DE ABERTURA DOS CHOKES DOS POÇOS POR REDES NEURAIIS.....	150
4.5	MUDANÇA DE SETPOINT POR SISTEMA ESPECIALISTA COM ALGORITMOS GENÉTICOS.....	157
4.6	REALIZAÇÃO DO CONTROLE PLANTWIDE AIML.....	166
4.7	RETORNO FINANCEIRO DAS PROPOSTAS.....	168

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	171
5.1 RESPONDENDO AS QUESTÕES DE PESQUISA.....	171
5.1.1 Quais modelos são adequados para a simulação da planta de processamento de óleo de um FPSO e se esses modelos podem ser validados?.....	171
5.1.2 Como implantar controles convencionais de acordo com o caso real estudado de forma a ter uma boa representação do processo real e obter a estabilidade necessária as simulações?.....	171
5.1.3 Qual tipo, arquitetura, taxa de aprendizagem e outras informações são mais adequadas para a realização da estimativa da vazão dos poços utilizando redes neurais?.....	172
5.1.4 Como deve ser feito o ajuste de setpoint de um equipamento utilizando algoritmos genéticos e quais equipamentos precisam ter PID adaptativo?.....	172
5.1.5 Como deve ser feito a implantação da lógica fuzzy de controle baseado nos estudos de redes neurais e algoritmos genéticos?.....	173
5.1.6 Como deve ser feito o projeto dos controladores da planta de forma otimizada de acordo com as técnicas de controle PWC AIML proposto?.....	173
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	173
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	174
 REFERÊNCIAS.....	 175

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMA DE PESQUISA

A indústria do petróleo é essencial para a vida moderna. Seja para geração de energia elétrica, movimentação de veículos ou até mesmo como insumo para fabricação de diversos componentes, onde o consumo de petróleo se torna importante até para a medição do desenvolvimento de uma nação e continuará a ser essencial por muitas décadas até que se achem produtos substitutos economicamente viáveis para todas as suas aplicações. Costa (2014, p. 4) confirma essa visão ao afirmar que

Pelo fato de dificilmente hoje se encontrar um produto que não contenha petróleo ou seus derivados ou que não tenha em sua cadeia de produção direta ou indiretamente o envolvimento do petróleo pode-se perceber que o mercado mundial está voltado quase que completamente para o consumo de petróleo e seus derivados.

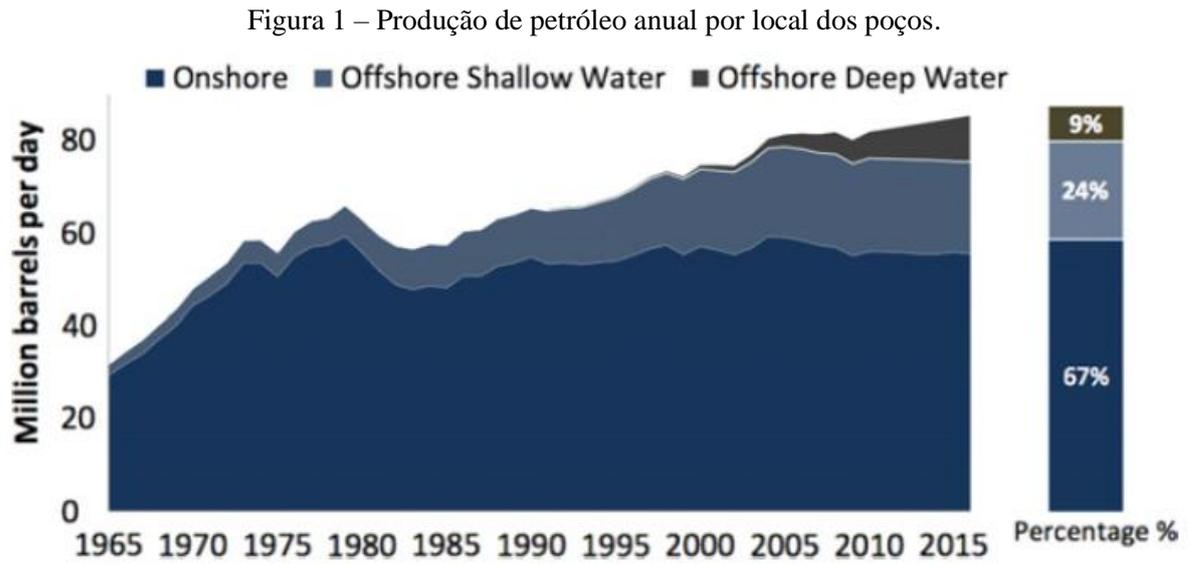
Já Sousa (2015) prevê que em 2030 o petróleo ainda será responsável pelo suprimento de 60% das fontes energéticas do mundo, com isso confirmando a visão estratégica do recurso, e Chen *et al.* (2014) prevê que teremos, por no mínimo, mais 20 anos de demanda crescente para o setor.

O Brasil produz petróleo em diversas bacias sedimentares, onde Chaves (2018, p. 16) divide essa indústria da seguinte forma: “A produção na indústria do petróleo e gás se divide, em relação à exploração, por poços localizados no mar ou em terra, respectivamente denominados por produção *offshore* e produção *onshore*.”

A produção *offshore* brasileira é bem maior que a *onshore* e por isso merece destaque na sua análise. Nos últimos anos a exploração *offshore* de petróleo no pré-sal brasileiro ganhou destaque pelo volume e contribuição social para o país. Costa (2014, p. 4) também descreve a importância dessa descoberta, ao falar que

Com pesquisas e exploração usando tecnologia avançada, a Petrobras, em 2006 após perfuração, até então inédita feita pela Petrobras, de 6.000 metros de profundidade, descobriu um reservatório petrolífero na costa brasileira que mudou a importância do Brasil quando o assunto é o petróleo. Até então o país figurava como coadjuvante no cenário mundial de hidrocarbonetos. Porém com a descoberta do que mais tarde iria ser denominado como Pré-sal, essa situação mudou, colocando sobre o Brasil os olhares da comunidade internacional pelo potencial estimado de produção que essas jazidas oferecem.

Vale salientar que no cenário mundial essa relação é diferente, pois prevalece a produção *onshore*, sendo que Shukla (2016, p. 509) mostra que esse tipo de exploração começou a crescer mais nos últimos anos no mundo, mas apresenta grande potencial, como pode ser visto na figura 1 abaixo, confirmando a ideia de que as reservas convencionais estão com a produção saturada e por isso é preciso investir nas novas fronteiras de exploração não convencional.



Fonte: Shukla, 2016.

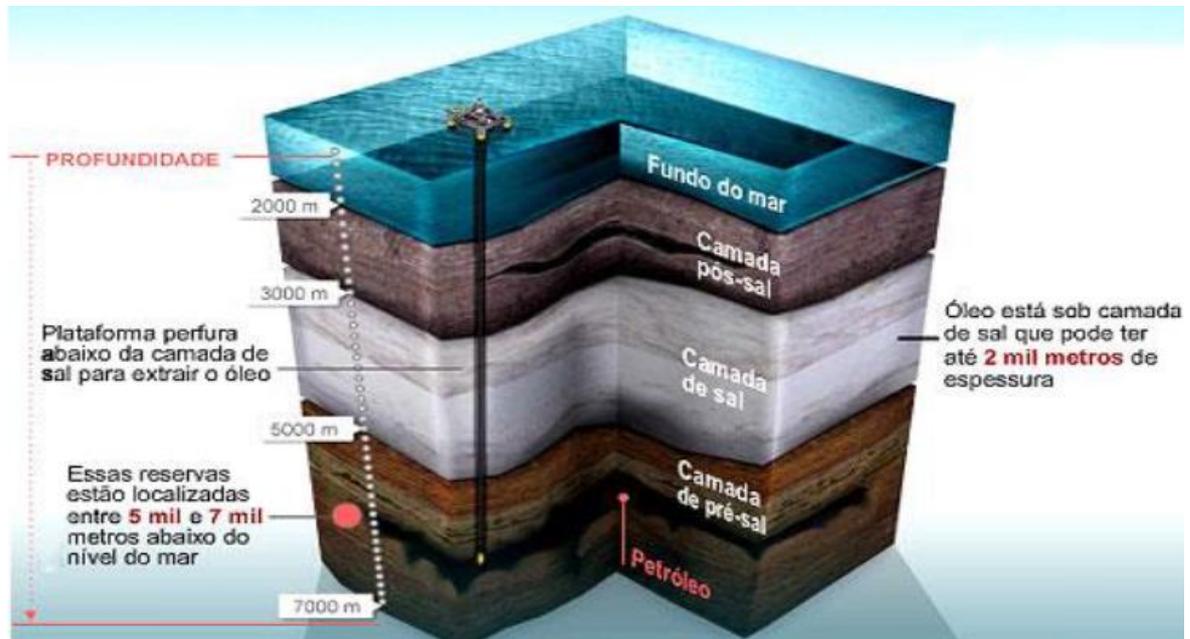
Dado o potencial das jazidas, hoje a maior parte da produção do Brasil já é advinda do pré-sal. Souza (2021) confirma isso ao descrever que

O baixo custo de produção em relação às outras províncias petrolíferas produtoras, somadas ao alto índice de sucesso na perfuração, da boa qualidade do óleo e do gás natural, da grande vazão dos poços produtores e da forte expansão da produção de petróleo e gás natural para os próximos anos, que produziu em dezembro de 2019 aproximadamente 2,1 milhões de barris de petróleo diários, ou cerca de 68% do total produzido no Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2019, p. 2), posicionam os reservatórios do Pré-sal brasileiro no centro do mercado internacional de petróleo *offshore*.

Para viabilizar a produção, no ambiente acima descrito, em alto mar com lâminas d'água que vão até 3000 m, foi escolhido como sistema de produção predominante o do tipo FPSO (Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência ou em inglês Floating, Production, Storage and *Offloading*). Essas unidades são dotadas de posicionamento dinâmico e armazenamento próprio, com isso, fazendo-as sistemas de produção ideais para a condição de altas lâminas d'água e alta distância da costa brasileira, conforme informações de Matsumoto

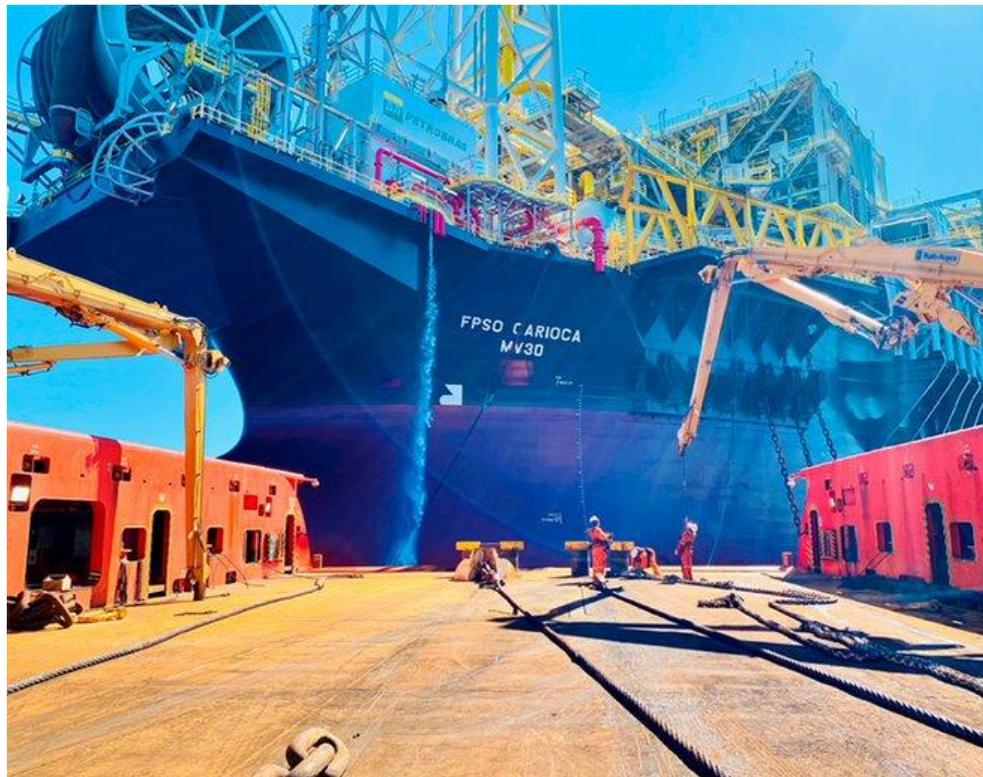
(2014). Veja abaixo na figura 2 e 3 a representação das camadas na bacia do pré-sal e um dos FPSOs da Petrobras, respectivamente.

Figura 2 - Representação das camadas de rocha na região do pré-sal.



Fonte: Fatos e dados, 2018.

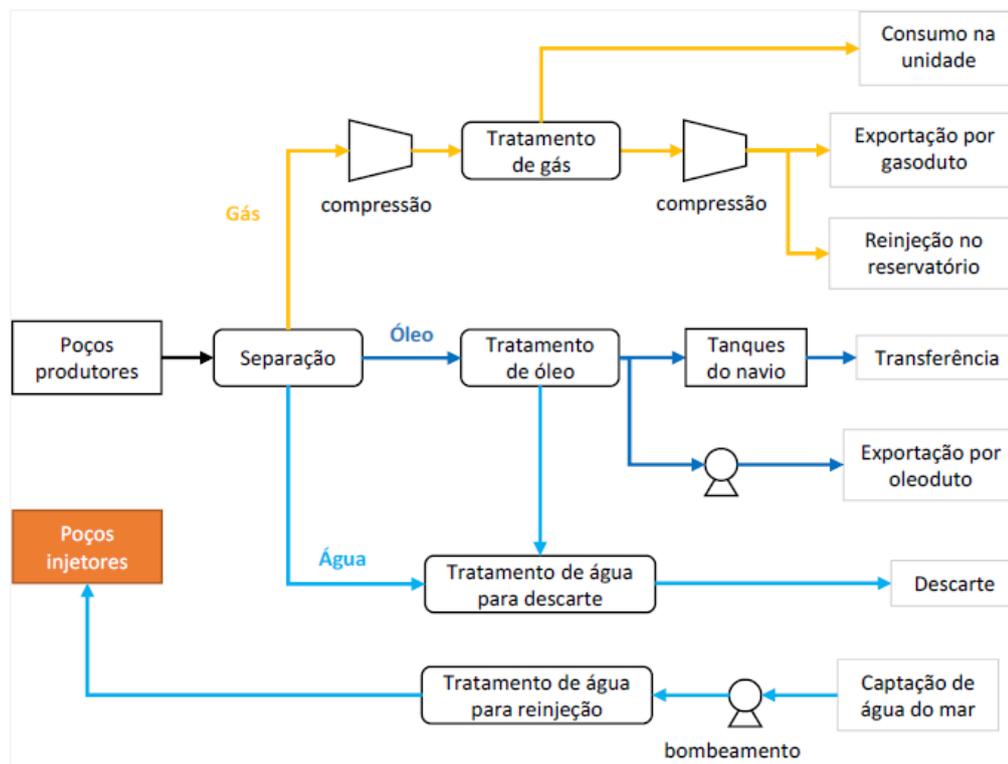
Figura 3 – Plataforma do tipo FPSO da Petrobras saindo do estaleiro.



Fonte: Petrobras, 2021.

Essas plataformas são construídas para receber e separar com segurança os diversos fluidos produzidos pelos poços submarinos e destinar esses fluidos para exportação por navios ou dutos ou injetá-los no reservatório para recuperação secundária ou descarte, sendo para isso dotada de sistema de tratamento de óleo, água, gás e utilidades conforme esquema genérico mostrado abaixo.

Figura 4 – Esquema genérico do processamento em uma plataforma.



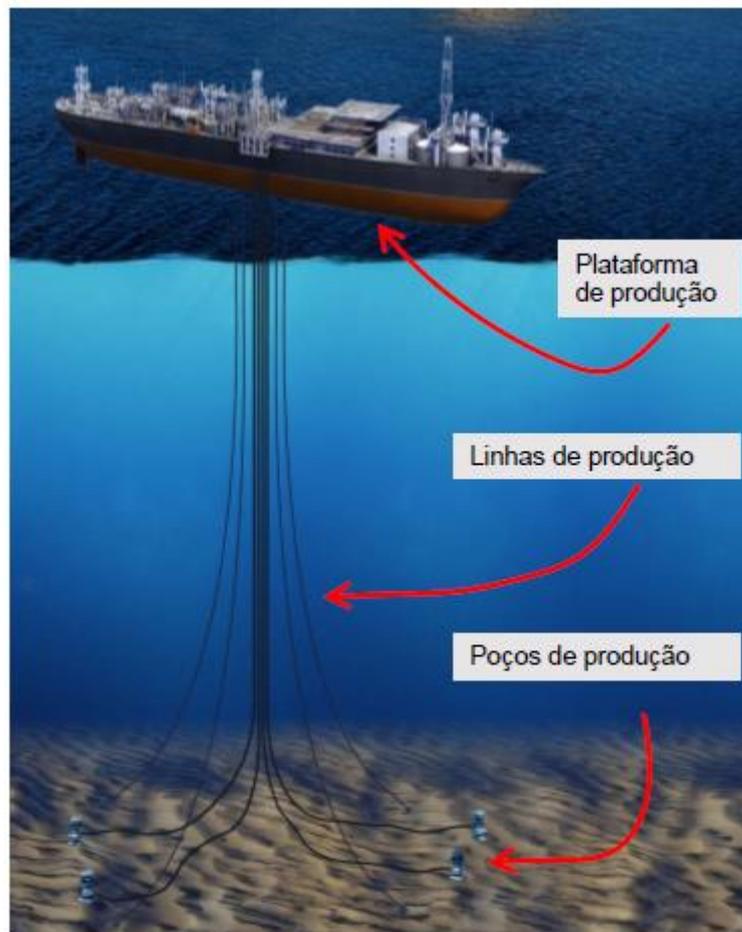
Fonte: Crivellari, 2016.

No Brasil, o petróleo produzido é de propriedade da União, cabendo as empresas ou consórcios explorarem mediante autorização e pagamentos das parcelas devidas ao governo. O volume financeiro arrecadado pelo governo é substancial e, por isso, o setor merece destaque na política nacional, onde é notório nos noticiários e mídia de uma forma geral a alusão ao tema.

Com isso, a produção de petróleo por plataformas do tipo FPSO no pré-sal brasileiro é de extrema importância para o país, dado a grande contribuição em impostos pagos ao governo e pelo lucro auferido pelas empresas dessa cadeia produtiva. Assim, é necessário fomentar estudos acerca da otimização do processamento e produção dos fluidos produzidos pelas plataformas a fim de maximizar o lucro e a arrecadação do governo.

Os desafios tecnológicos para exploração de petróleo em águas ultra profundas perpassam as técnicas convencionais de exploração e produção. Segundo Campos *et al.* (2017), ambientes que apresentam situações extremas de temperatura, pressão e presença de contaminantes, como o CO₂, requerem novas abordagens para viabilizar a produção com a eficiência de referência para os processos. O próprio sistema de produção por golfadas, proveniente da produção dos fluidos por diversos risers, gera um comportamento oscilatório que pode trazer instabilidades para o processo e dificuldades para o processamento, por termos arranjos como o mostrado abaixo.

Figura 5 – Esquema de interligação entre poços e uma plataforma.

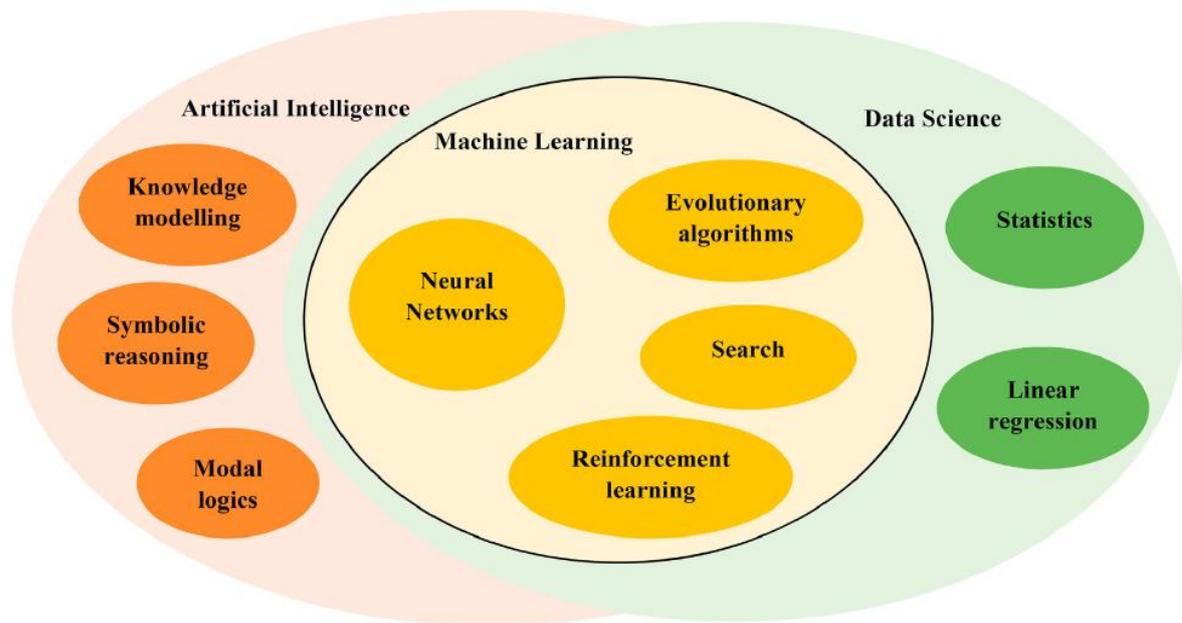


Fonte: Crivellari (2016).

Concomitante a esse cenário, temos a Inteligência Artificial (IA), o Machine Learning (ML) e o Data Science (DS) entre as tecnologias que podem ser utilizadas para viabilizar essa produção de petróleo com segurança e eficiência. Essas técnicas aplicam conhecimentos de engenharia para criação e operação de máquinas, equipamentos, ferramentas e/ou aplicações

dotadas de capacidade de tomada de decisão e aprendizado, onde várias tecnologias já foram desenvolvidas para aplicação prática, como a lógica difusa ou lógica Fuzzy e o aprendizado de máquinas por redes neurais e algoritmos genéricos, técnicas essas com sucesso de aplicação em todo o mundo, conforme descrito por Bello *et al.* (2016). Veja abaixo uma ilustração sobre como se dividem essas tecnologias por tipo.

Figura 6 – Distribuição das tecnologias por setores.



Fonte: Sircar *et al.*, 2021.

Segundo Campos (2016), são vários os exemplos de aplicação desses temas na indústria de petróleo, onde ele apresenta alguns trabalhos, como: A Otimização da Operação de uma Plataforma Semissubmersível, Um Controlador “Fuzzy” alocando a Carga dos Fornos, a Otimização Heurística da Injeção de Vapor em Unidades de Destilação e Controle “Fuzzy” para Balanceamento dos Passes de um Forno, porém nenhum desses exemplos cita FPSOs. Também foram reportadas aplicações relacionadas à partida e surgência de poços no trabalho de Campos *et al.* (2017), além de trabalhos como o de Kuang *et al.* (2021) e Sircar *et al.* (2021) que tratam sobre uma vasta gama de utilização desses mecanismos em processos como sísmica, perfuração, análises de reservatórios e até facilidades de superfície, mas sem citar as peculiaridades ou especificidades dessa tecnologia para a automação e controle do processamento em FPSOs, sendo que das referências analisadas, quem mais se aproximou do tema foi Herve *et al.* (2020), porém sem fazer alusão em nenhum momento ao uso das técnicas para otimização da produção em FPSOs, mas já tratando de processamento e otimização.

Além das novas tecnologias citadas acima, outras tecnologias de controle avançado e emergentes podem ser analisadas para se verificar os ganhos auferidos com suas técnicas. Entre elas temos o controle override que é uma técnica seletiva de controle para alteração da operação de um controlador com base em um conjunto de variáveis manipuladas, o Gain Scheduling Control (GSC) que é uma técnica do tipo PID adaptativo que traz muitas vantagens para o processo e o controle Plantwide que analisa a planta como um todo e propõe um controle orientado por diretrizes de redução de custo ou aumento na produtividade. O Plantwide Control (PWC) é um método de projeto e otimização importante e como descreve Muñoz (2018, p. 17) “esta metodologia encontra um conjunto de variáveis controladas que, quando mantidas em pontos de operação constantes, indiretamente levam a uma operação quase ótima do processo”.

A fim de verificar a aderência dessas tecnologias a realidade sem que se façam inúmeros testes práticos que podem tornar inviável e perigoso a fase de experimentação da técnica, é que surge a simulação computacional como ferramenta ágil e barata para isso. Nesse caso, toda a simulação de processo foi realizada em ambiente Simulink® do Matlab® e com validação prática a partir dos dados reais da planta analisada, sendo todo esse estudo realizado com modelos simbólicos e icônicos, conforme descreve Neto *et al.* (2019) em seu trabalho.

Assim, essa pesquisa terá como objetivo analisar como obter ganhos com a implantação das ferramentas de inteligência artificial, data science, machine learning e controle avançado, citadas acima, para uma plataforma do tipo FPSO real, hoje instalada no pré-sal brasileiro, tendo como foco o aumento das receitas auferidas com a produção a fim de agregar valor para a Petrobras, contribuindo para uma operação da plataforma de forma mais estável e com desenvolvimento industrial sustentável, com ambiente de trabalho seguro e respondendo a seguinte pergunta de pesquisa:

“Como aliar as técnicas de controle avançado, inteligência artificial, machine learning e data science para aumentar a produtividade de uma plataforma do tipo FPSO e maximizar sua receita de forma segura?”

1.2 OBJETIVOS

Definir objetivos é essencial para direcionar o trabalho para o resultado pretendido. Barbosa (1990, p. 04) define que

Objetivos gerais: procuram determinar, com clareza e objetividade, mas de forma mais generalizada, o propósito do pesquisador com a realização da pesquisa.

Objetivos específicos: aprofundam as intenções expressas nos objetivos gerais, identificando itens específicos da pesquisa.

Com isso, temos os seguintes objetivos gerais e específicos desenvolvidos para esse trabalho, a fim de torna possível resolver e esclarecer o que se questiona no problema de pesquisa.

1.2.1 Objetivo Geral

Definir estratégia de controle para um FPSO do pré-sal brasileiro utilizando controle plantwide, inteligência artificial, machine learning e controle avançado de forma a maximizar a produção de forma segura e com desempenho adequado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Modelar, simular e validar uma simulação da planta de processamento de óleo de um FPSO do pré-sal brasileiro;
- Projetar e implantar controladores convencionais nos equipamentos simulados conforme esquema hoje utilizado pela plataforma;
- Elaborar estudo com redes neurais que determine como saídas as vazões de produção dos poços a partir das condições impostas nas válvulas de abertura dos poços;
- Implantar controlador fuzzy que ajuste a abertura das válvulas dos poços, com base no estudo de redes neurais, a fim de controlar a vazão produzida para o processo;
- Realizar estudo de otimização do processo por algoritmos genéticos para parametrizar a mudança de setpoint em diversas condições de operação e inserir controle adaptativo (Gain Scheduling Control) nos processos em que a mudança de setpoint gere instabilidade;
- Fazer estudo do controle plantwide do processo em relação ao controle da alimentação da planta, dos seus ciclos e dos controles override baseados nas restrições da planta e na otimização prevista pelo algoritmo genético.

1.3 JUSTIFICATIVA

Conforme literatura, Nunes (2010, p. 25) já explica em seu trabalho que a motivação para existência de uma plataforma é “receber e separar com segurança as diferentes fases da

mistura proveniente dos poços, ou seja, óleo, gás natural e água”. Para que isso seja possível é importante que tenhamos um bom controle do processo para garantir que essa produção ocorra de forma sustentada em função do tempo.

Apesar do controle tradicional ser muito utilizado pela sua facilidade de implantação e pela grande quantidade de informações já elaboradas acerca de seus modelos, não se tem garantia que esses modelos são os mais adequados para os processos modernos, pois a complexidade das plantas vem aumentando com o tempo e, por isso, a complexidade dos sistemas de controle deveriam seguir o mesmo ritmo. Nunes (2010, p. 25) confirma isso ao falar que “o controle rigoroso das variáveis do processamento *offshore* garante a continuidade operacional, mas não otimiza economicamente o processamento” e Nunes (2010, p. 25) reforça essa visão já que afirma que “destaque deve ser dado à tendência mundial de maior complexidade das plantas de processamento em virtude das buscas de petróleo em regiões antes tidas como economicamente inviáveis ou pouco atrativas”, descrição essa que se encaixa na situação em estudo.

Plantas industriais com o processo inteiro realizado por controles feedback são comuns em alguns setores da indústria, porém as tecnologias modernas, como o controle plantwide, já demonstram a necessidade do estudo dos diversos modos de controle que a planta pode apresentar pela ótica do retorno por objetivo e, além disso, várias outras técnicas avançadas de controle já fazem o ajuste das variáveis manipuladas a partir da análise de vários fatores e de forma até preditivo a depender do método usado, logo a não evolução dos sistemas de controle de algumas indústrias se dá pela carência de mão de obra especializada ou falta de investimento, e não por falta de tecnologia para aplicação. Percebe-se que essas tecnologias são recentes no Brasil e ainda carecem de muita mão de obra especializada, conforme confirmado por Moreno (2013, p. 2) que lembra que o

primeiro programa de graduação implantado no Brasil data de 1990, com o curso iniciado na Universidade Federal de Santa Catarina. Posteriormente outros cursos foram implantados, como por exemplo os cursos oferecidos pela UFMG, EFEI, UNICAMP, PUC (MG, RS, PR, RJ), UNIP, etc. Atualmente no Brasil são oferecidos cerca de 15 cursos na área de Controle e Automação.

Outra justificativa para a não atualização dos controles dos equipamentos é evidenciada por Teixeira *et al.* (2015, p.18) no seu trabalho, ao falar que

Na indústria em geral, pelo fato de ser melhor ter uma planta funcionando mal do que parada, a prioridade é sempre a disponibilidade. Os impactos de modificar complexos sistemas de automação industrial, com possíveis paradas de produção, dificultam ou

até impedem a atualização e/ou uniformização da tecnologia de grande parte das plantas, mesmo esta atualização sendo muitas vezes necessária.

Nesse contexto, as técnicas de inteligência artificial, data science e machine learning podem ser usadas associadas as técnicas de controle de processo para melhorar a sua precisão, estabilidade e até dotar o sistema de raciocínio próprio para com o que se deseja controlar, Sircar *et al.* (2021) reforça isso no seu extenso trabalho sobre as aplicações dessas tecnologias na indústria do petróleo.

Com isso, esse trabalho se torna relevante para os setores em análise, pois apresenta formas de utilização das tecnologias acima citadas com a devida formalização técnica, documentação e apresentação de resultados relevantes para os stakeholders (profissionais da indústria, pesquisadores, estudantes, etc.) e de forma a trazer ganhos de produção e redução de custos que poderão ser realizadas na prática sem grandes investimentos, e que está de acordo com o que prega Torres Campos (2020), pois com a pandemia e a necessidade de informatização e automação dos processos para promover a menor necessidade de pessoal para a operação das plantas, quanto mais aplicarmos técnicas como as citadas melhor será a otimização do processo.

A pesquisa foi limitada ao processo de tratamento de óleo de um FPSO que hoje opera no pré-sal haja vista que uma das melhores formas de se obter a validação de um conhecimento é impondo-o a condições reais para que se possa avaliar a aplicabilidade do que se é proposto. Os dados utilizados nessa pesquisa são os fornecidos pelo projeto da plataforma, pelo sistema de informação em tempo real da planta e pelo relato dos profissionais que hoje operam a unidade, logo obtivemos todas as informações necessárias a realização deste, sendo isso corroborado pelo que Neto *et al.* (2019, p. 1) cita ao falar que “a modelagem e simulação são técnicas imprescindíveis, uma vez que podemos prever o comportamento dos sistemas dinâmicos avaliando os resultados por meio de simulação computacional”.

Para a correta explicação do encadeamento dos conhecimentos utilizados para efetivação desse trabalho e como se chegou aos seus resultados, após uma introdução para elucidação do problema de pesquisa, segue-se um desenvolvimento com a fundamentação teórica e revisão bibliográfica que disponibilizará informações sobre os temas tratados no decorrer do trabalho, passando por matérias e métodos que explicam de forma minuciosa os passos para execução deste. Após isso, serão abordados os resultados e discussões a fim de demonstrar os achados do trabalho e a forma como eles foram validados, finalizando com a devida conclusão.

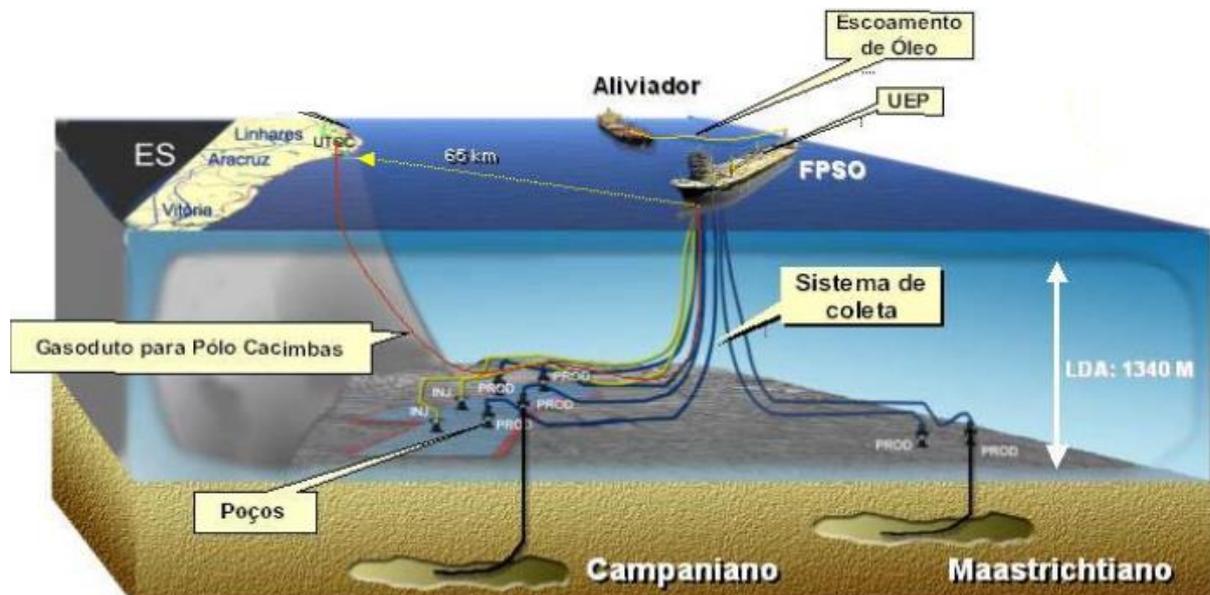
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Compilação das principais obras e conhecimentos produzidos por autores da área em análise, destacando os principais avanços teóricos e conceituais relacionadas ao objeto dessa pesquisa. Para facilitar o entendimento, as seções de escrita foram divididas e definidas conforme segue abaixo, a partir da construção teórica dos estudos realizados em consonância com os autores que ancoram as produções científicas, validando-as, relacionadas ao objeto dessa pesquisa.

2.1 TRATAMENTO DE PETRÓLEO EM FPSO

As unidades de produção marítimas foram projetadas para processar o petróleo e gás produzidos pelos poços submarinos com segurança, onde cada fluido processado é destinado pela rota definida para seu uso. O óleo geralmente é enviado para uma refinaria, seja via navios ou dutos, o gás segue para uma unidade do tipo UPGN, seja por gasodutos ou navios de LGN, ou pode ser consumido pelas unidades de utilidades da plataforma e até reinjetado, já a água é reinjetada ou descartada no mar. Abaixo, pode-se ver a figura 7 com a representação dos poços submarinos interligados por flowlines e risers a um FPSO típico.

Figura 7 – Esquema de interligação dos poços a um FPSO típico.

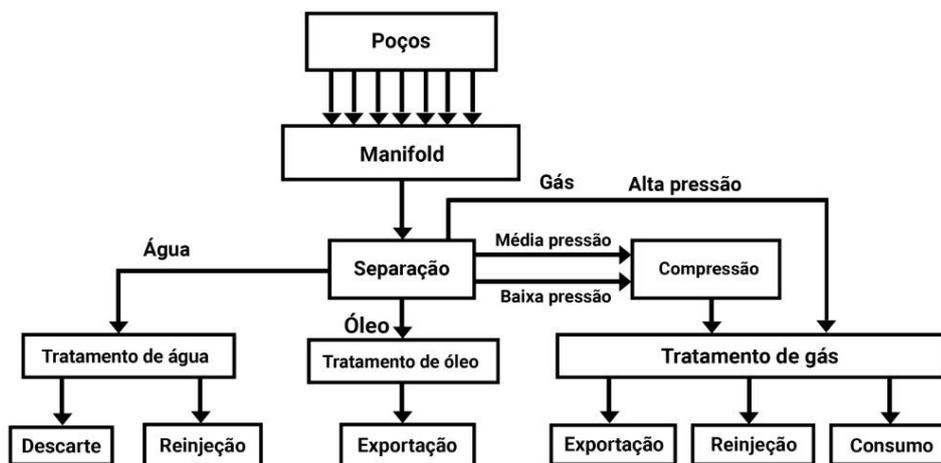


Fonte: Cepemar, 2005.

Na superfície do FPSO, chamado de topside, os fluidos produzidos chegam no formato de golfadas de óleo, gás e água que passam por uma válvula de fluxo, geralmente do tipo choke/bin (válvula do tipo agulha), e seguem para unir sua produção com a dos outros poços em um manifold que leva tudo o que foi produzido para o separador gravitacional (SG). Nunes (2010, p. 27) confirma isso ao falar que “os poços produtores alimentam as plantas em escoamento multifásico de água, óleo e gás. Frequentemente, esse escoamento se caracteriza por oscilações de pressões e vazões de carga em regime de escoamento conhecido como golfadas”.

Segundo Monteiro *et al.* (2016, p. 6), “normalmente, no início do processo utiliza-se separadores bifásicos e/ou trifásicos, em série, responsáveis pela separação das fases líquida e gasosa, e com isso a água/óleo/gás terão os seguintes destinos”, que são os mostrados na figura 8 abaixo representativa do esquema citado acima.

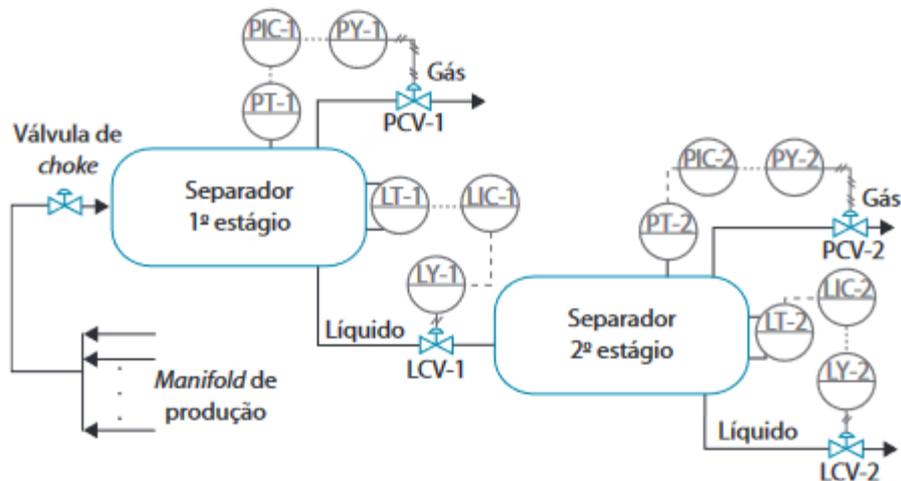
Figura 8 – Esquema básico do processamento de petróleo de um FPSO.



Fonte: Adaptado de Monteiro *et al.* (2016)

Segundo Nunes (2010, p. 26) “as plantas de processamento de óleo *offshore* podem ser classificadas em dois tipos”, as que efetuam a separação bifásica (gás-líquido) e as que efetuam a separação trifásica (água, óleo e gás). No presente estudo será utilizado o esquema de separação bifásica, já que os poços do pré-sal brasileiro ainda não produzem água em volumes significativos, ficando assim restritos a essa situação os modelos a serem deduzidos. A figura 9 abaixo apresenta o esquema típico do sistema de separação bifásica de uma unidade *offshore* em dois estágios de processamento e com os controles de pressão e nível implementados para a garantia da estabilidade do processo ao se regular a vazão de óleo e gás produzidos para ajuste das aberturas das válvulas em destaque.

Figura 9 – Exemplo de planta bifásica para processamento de petróleo.



Fonte: Nunes (2010).

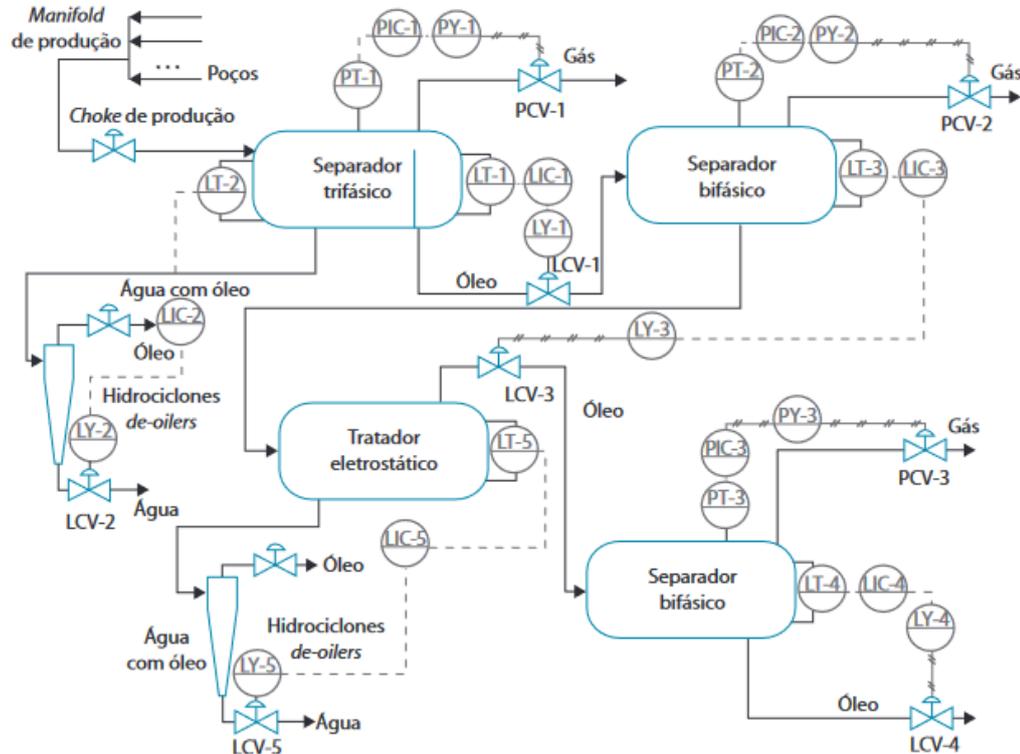
Pelo esquema apresentado, pode-se perceber pelo esquema que o gás sai por cima dos separadores e o líquido por baixo, após ocorrer a etapa de equilíbrio líquido-vapor dentro do vaso na temperatura e pressão especificadas para a separação, gerando assim produtos para as próximas etapas de processamento.

Já segundo Nunes (2010, p. 27) “as plantas com separação trifásica são completas e enquadram o óleo e o gás para exportação e a água para descarte no mar”. Ainda detalha que “no separador trifásico, as correntes líquida e gasosa são separadas na câmara de separação. A corrente líquida se acumula na câmara de separação por apresentar menor massa específica, transbordando para a câmara de óleo.”

Muitas vezes apenas o equilíbrio líquido-vapor e o tempo de residência dos equipamentos não são suficientes para realizar a separação a contento dos fluidos produzidos, para essas situações foram desenvolvidos os tratadores eletrostáticos. Nunes (2010, p. 27) descreve o funcionamento desse equipamento como “um campo elétrico é aplicado na fase oleosa para promover a coalescência das gotas de água, que se acumula na fase inferior do equipamento, e o nível desta fase líquida é controlado (LIC) por atuação sobre válvula de retirada de água (LCV)”. Abaixo, a figura 10 mostra um arranjo desses equipamentos para uma configuração típica onde é acompanhado por outros separadores bifásicos e acrescidos por sistemas de controle de nível e pressão por estágio com base na abertura das válvulas de controle.

Na seção de materiais e métodos é apresentado como cada equipamento foi modelado e como as transformações na matéria ocorrem de forma a viabilizar as simulações devidas.

Figura 10 – Fluxograma de parte do processamento de petróleo e gás em um FPSO.



Fonte: Nunes, 2010.

2.2 CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS

O controle de processos se aplica a uma grande gama de atividades, sendo uma delas o controle do processamento primário em FPSOs.

No presente trabalho, visa-se otimizar a automação do processo a fim de obter o melhor resultado para a empresa ao invés de simplesmente manter o controle automático. Garcia (2017, p. 23) explica bem isso ao dizer que

No controle automático, cada malha atua independentemente das demais, obedecendo a valores impostos pelo homem ou por um mecanismo programador. A automação, por outro lado, concentra em um único processador de dados (computador) as informações concernentes a todas as malhas de controle, criando um sistema de alta complexidade, o qual interpreta e processa todos os dados recebidos e gera sinais de saída, visando à otimização do processo industrial e, conseqüentemente, ao aumento da produção.

Além disso, é a partir da automação que se define toda a lógica de controle da planta e com isso se pode prever a sua dinâmica a fim de garantir a correta especificação do produto, sua uniformidade e a sua otimização, conforme explica Seborg (2016).

Como funções básicas do controle automático, temos a de fazer a variável controlada acompanhar as variações no valor desejado, chamado de modo servo, e o de minimizar os efeitos dos distúrbios externos, chamado de modo regulatório.

Garcia (2017, p. 40) traz um quadro resumo da evolução dos sistemas de controle:

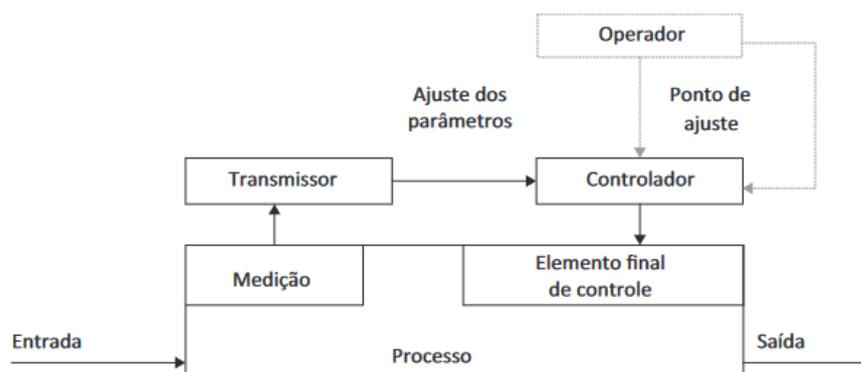
Tabela 01: Evolução dos sistemas de controle.

DATA	EVENTO
1934	Comercialização pela Foxboro do primeiro controlador PI
1935	Controladores pneumáticos locais tipo "caixa grande" dominam o mercado
1938	Surgem os transmissores pneumáticos, tornando possível as salas de controle centralizadas
1958	Os primeiros controladores eletrônicos são apresentados no "ISA's 13th Annual Show" na Filadélfia; surgimento do primeiro computador para monitoração na área de energia elétrica
1959	Primeiro computador supervisor em refinaria
1963	Instalado o primeiro sistema de controle DDC
1970	Surge no mercado o primeiro CLP; a venda da instrumentação eletrônica ultrapassa a pneumática
1975	Surgem no mercado os primeiros SDCD: Yokogawa (Centum) e Honeywell (TDC 2000)
1981	O primeiro controlador autossintonizável é comercializado pela Leeds Northrup
1982	Início do desenvolvimento da tecnologia <i>fieldbus</i>
1990	Início do desenvolvimento dos sistemas abertos: <i>open system architecture</i>

Fonte: Garcia, 2017.

Os controles presentes na planta em análise hoje são do tipo feedback, em maior parte, controle esse presente na maioria das plantas industriais do mundo. Na figura 11 pode-se entender como ocorre o seu funcionamento:

Figura 11 – Malha típica de controle por realimentação.

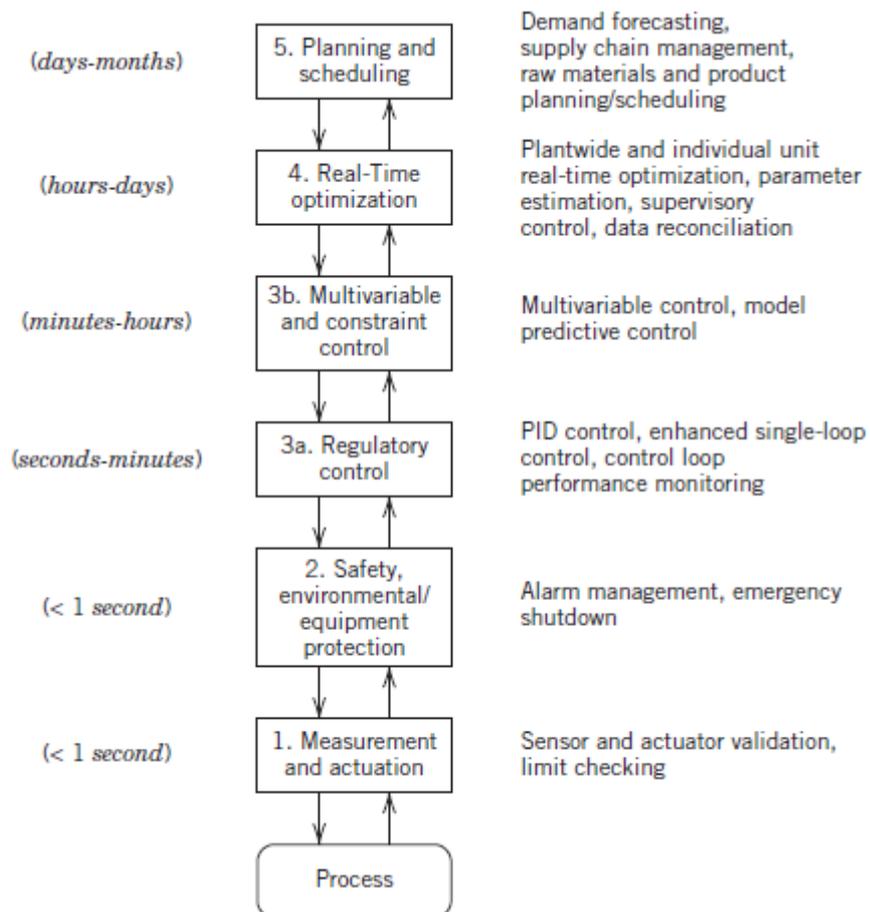


Fonte: Garcia, 2017.

Tendo em vista que esse modelo de malha fechada é o mais simples entre as catalogadas pela literatura, é necessário propor modelos mais modernos para o processo, já que Campos *et al.* (2013, p. 3) cita que “os processos industriais estão se tornando cada vez mais complexos devido aos requisitos mais rigorosos de integração energética, disponibilidade, tempo de campanha, segurança, qualidade dos produtos, entre outros”.

Teixeira *et al.* (2015) traz como requisitos para o projeto de um sistema de controle que ele tenha uma estrutura que minimize as perdas econômicas decorrentes das perturbações, que seja estável e que elimine os desvios entre as variáveis controladas e o valor desejado. Além disso, temos a seguinte hierarquia de ações de um sistema de controle, conforme Seborg (2016, p. 8), que foi utilizado durante esse trabalho representado na figura 12 abaixo.

Figura 12 – Hierarquia de atividades de controle de processo.



Fonte: Seborg, 2016.

Para manter o controle conforme demonstrado na figura acima devemos utilizar controladores do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) e suas variações para corrigir os desvios e levar estabilidade para a malha fechada. Segundo Teixeira *et al.* (2015, p. 23) “um

controlador PID calcula o erro entre a variável controlada (medida no processo) e o seu valor desejado (setpoint), e em função deste erro gera um sinal de controle de forma a eliminar esse desvio”.

Já existem vários tipos de controladores digitais, sendo os mais comuns o do tipo P, PI, PD e PID. A função de transferência de controles PID's no domínio do tempo e no de Laplace é mostrado abaixo na figura 13.

Figura 13 – Controles PID's no tempo e Laplace.

Controller Type	Other Names Used	Controller Equation	Transfer Function
Parallel	Ideal, additive, ISA form	$p(t) = \bar{p} + K_c \left(e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t^*) dt^* + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right)$	$\frac{P'(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right)$
Series	Multiplicative, interacting	$p(t) = \bar{p} + \frac{K_c}{\tau_I} \left[(\tau_I + \tau_D) e(t) + \int_0^t e(t^*) dt^* + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right]$	$\frac{P'(s)}{E(s)} = K_c \left(\frac{\tau_I s + 1}{\tau_I s} \right) (\tau_D s + 1)$
Expanded	Noninteracting	$p(t) = \bar{p} + K_c e(t) + K_I \int_0^t e(t^*) dt^* + K_D \frac{de(t)}{dt}$	$\frac{P'(s)}{E(s)} = K_c + \frac{K_I}{s} + K_D s$
Parallel, with proportional and derivative weighting	Ideal β, γ controller	$p(t) = \bar{p} + K_c \left(e_P(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t^*) dt^* + \tau_D \frac{de_D(t)}{dt} \right)$ <p>where</p> $e_P(t) = \beta y_{sp}(t) - y_m(t)$ $e(t) = y_{sp}(t) - y_m(t)$ $e_D(t) = \gamma y_{sp}(t) - y_m(t)$	$P'(s) = K_c \left(E_P(s) + \frac{1}{\tau_I s} E(s) + \tau_D s E_D(s) \right)$ <p>where</p> $E_P(s) = \beta Y_{sp}(s) - Y_m(s)$ $E(s) = Y_{sp}(s) - Y_m(s)$ $E_D(s) = \gamma Y_{sp}(s) - Y_m(s)$

Fonte: Seborg, 2016.

Para se obter as informações necessárias ao fechamento das malhas de controle com o preenchimento das fórmulas descritas na figura 13 se faz necessário o uso dos ensaios de malha aberta para caracterização das curvas de resposta e com isso possibilitar a sintonia dos controladores para garantia da estabilidade da malha, conforme descrito por Garcia (2017).

Várias são as possibilidades de sintonia possíveis para cada malha, onde pode-se exemplificar como isso funciona a partir do uso da síntese direta (SD) ou sintonia lambda, que é uma evolução do algoritmo de Dahlin (1968), que segundo Garcia (2017, p. 438) “é um método que usa um modelo inverso do processo e cancelamento de polos e zeros para buscar o desempenho desejado em malha fechada”. Segue abaixo, na tabela 2, os parâmetros de sintonia para vários modelos do processo a partir do cálculo da constante proporcional do controlador, o tempo integrativo e o tempo derivativo do controlador a partir dos valores obtidos da constante proporcional do processo, tempo morto e atraso de tempo do processo obtidos através do ensaio de malha aberta a uma perturbação na variável estudada. São vários os autores e propostas de sintonia, sendo aqui apresentado só um deles a título de exemplo. Na seção de resultados é mostrado que sintonia foi utilizada para cada malha de acordo com os critérios de desempenho analisados.

Tabela 02: Parâmetros para controladores via SD.

Modelo do processo $G(s)$	Parâmetros do controlador PID		
	K_c	T_i	T_d
$G(s) = K$	0	$K \cdot \tau_c$	0
$G(s) = \frac{K_i}{s}$	$\frac{1}{K_i \cdot \tau_c}$	∞	0
$G(s) = \frac{K_i \cdot e^{-\theta s}}{s}$	$\frac{2 \cdot \tau_c + \theta}{K_i \cdot (\tau_c + \theta)^2}$	$2 \cdot \tau_c + \theta$	0
$G(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1}$	$\frac{\tau}{K \cdot \tau_c}$	τ	0
$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta s}}{\tau \cdot s + 1}$ para $e^{-\theta s} \cong 1 - \theta \cdot s$	$\frac{\tau}{K \cdot (\tau_c + \theta)}$	τ	0
$G(s) = \frac{K}{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{K \cdot \tau_c}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$
$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta s}}{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1)}$ para $e^{-\theta s} \cong 1 - \theta \cdot s$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{K \cdot (\tau_c + \theta)}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$

Fonte: Garcia, 2017.

Após testar as várias sintonias possíveis para cada malha é necessário avaliar o desempenho desses controladores em malha fechada e para isso são usados os índices relacionados aos erros realizados em função do tempo ($e(t)$) que são os indicados abaixo, relacionados segundo De Medeiros (2021), Richard C. (2008) e Ogata (1998), com sua representação no domínio de Laplace e Z.

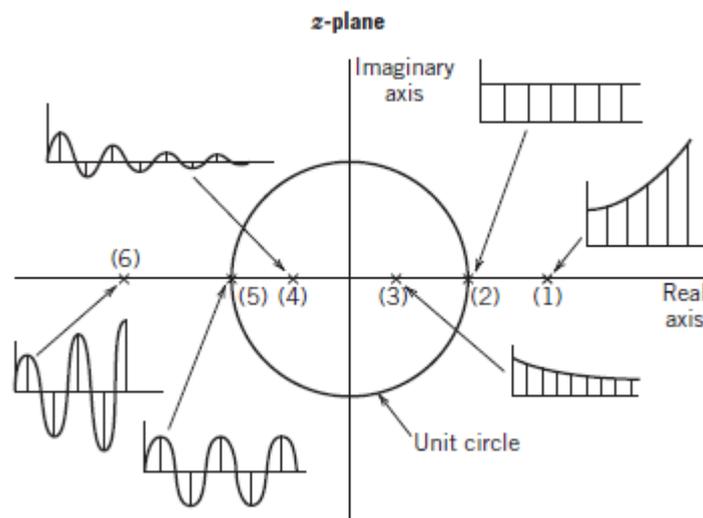
Tabela 03: Fórmulas para análise de desempenho.

ÍNDICE	SIGLA	LAPLACE	Z
Integral do módulo do erro	IAE	$\int e(t) dt$	$\sum_{k=0}^M \left \frac{e(k) + e(k-1)T_s}{2} \right $
Integral dos erros ao quadrado	ISE	$\int e^2(t) dt$	$\sum_{k=0}^M \frac{e^2(k) + e^2(k-1)T_s}{2}$
Integral do módulo do erro vezes o tempo	ITAE	$\int t e(t) dt$	$\sum_{k=0}^M k \left \frac{e(k) + e(k-1)T_s}{2} \right $
Integral dos erros ao quadrado vezes o tempo	ITSE	$\int te^2(t) dt$	$\sum_{k=0}^M k \frac{e^2(k) + e^2(k-1)T_s}{2}$
Esforço de controle	CE	$\frac{1}{t} \frac{1}{\Delta x_L} \int_0^t \left \frac{dx_L}{dt} \right dt$	

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Já em seguida deve ser avaliada a estabilidade em malha fechada, uma forma de fazer isso é utilizando o critério de Routh-Hurwitz, onde se avalia a posição das raízes do polinômio característico em malha fechada e, caso haja alguma raiz fora do plano circular do critério de estabilidade no domínio Z (Figura 14), a sintonia do controlador deve ser refeita, onde no caso de necessidade de se refazer pode ser utilizado o critério do Ultimate-Gain, conforme tabela 04 abaixo.

Figura 14 – Estável dentro do círculo conforme pontos (3) e (4).



Fonte: Seborg, 2016.

Tabela 04: Parâmetros para controladores via Ultimate-Gain.

	K_C	τ_I	τ_D
<i>P</i>	$0,5 \cdot K_{CR}$	∞	-
<i>PI</i>	$0,45 \cdot K_{CR}$	$\frac{T_{CR}}{1,2}$	-
<i>PID</i>	$0,6 \cdot K_{CR}$	$\frac{T_{CR}}{2}$	$\frac{T_{CR}}{8}$

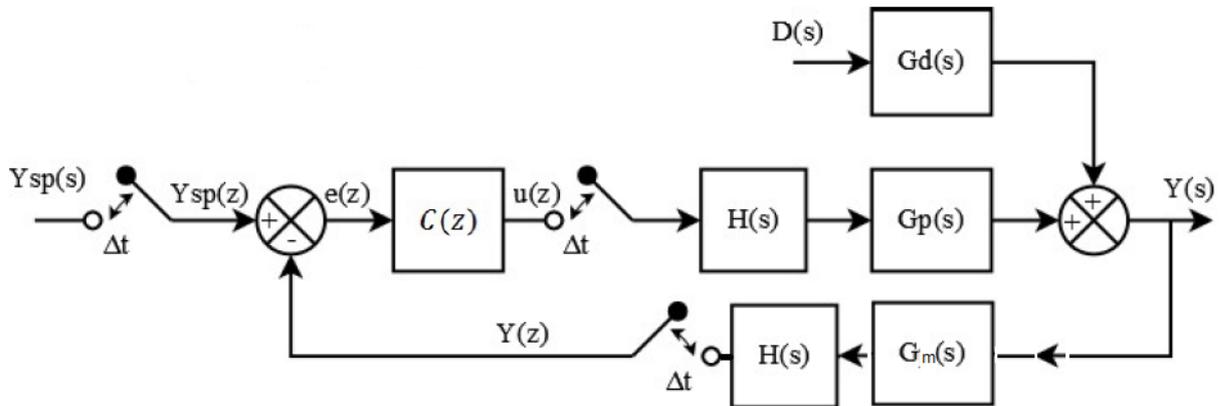
Fonte: Fonseca, 2021.

Já se a modelagem indicar uma função de transferência do tipo de segunda ordem como resposta a curva de reação em malha aberta pode ser aplicado o critério de Lyapunov, conforme descrito por Kim *et al.* (2018) para análise de estabilidade.

Existem outros tipos de PID que não cabem detalhamento aqui nesse trabalho, mas é importante saber que o tipo ideal citado anteriormente e a variação dele, que é o tipo paralelo,

são os mais usados, até porque o PID de interesse desse trabalho é o PID ideal com Data Hold de ordem 0 com estabilidade analisada em Z. Abaixo, na figura 15, pode-se verificar a representação de uma malha fechada digital.

Figura 15 – Representação de uma malha típica por controle digital.



Fonte: Fonseca, 2021.

A função de transferência para essa malha fica na forma:

$$Y_{(z)} = \frac{Z\{H(s)G_p(s)\}C(z)}{1+Z\{H(s)G_p(s)G_m(s)\}C(z)} Y_{SP}(Z) + \frac{Z\{D(s)G_d(s)\}}{1+Z\{H(s)G_p(s)G_m(s)\}C(z)} \quad (1)$$

Vale salientar que para realizar as operações matemáticas acima serão utilizados os princípios da transformada de Laplace (L) e da transformada Z (Z), Seborg (2016) traz as seguintes definições:

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2)$$

$$X(z) = \mathcal{Z}\{x[n]\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]z^{-n} = \dots + x[-2]z^2 + x[-1]z + x[0] + x[1]z^{-1} + x[2]z^{-2} + \dots \quad (3)$$

Nas malhas mostradas pode-se incluir ou não alguns conversores, mas não se altera a lógica de cálculo e sim adiciona-se um ou outro multiplicador nos fatores a serem aplicados a transformada Z, caso sejam considerados puramente proporcionais. Na temática acima, passa-se a ter os controladores analisados na seguinte forma no domínio Z.

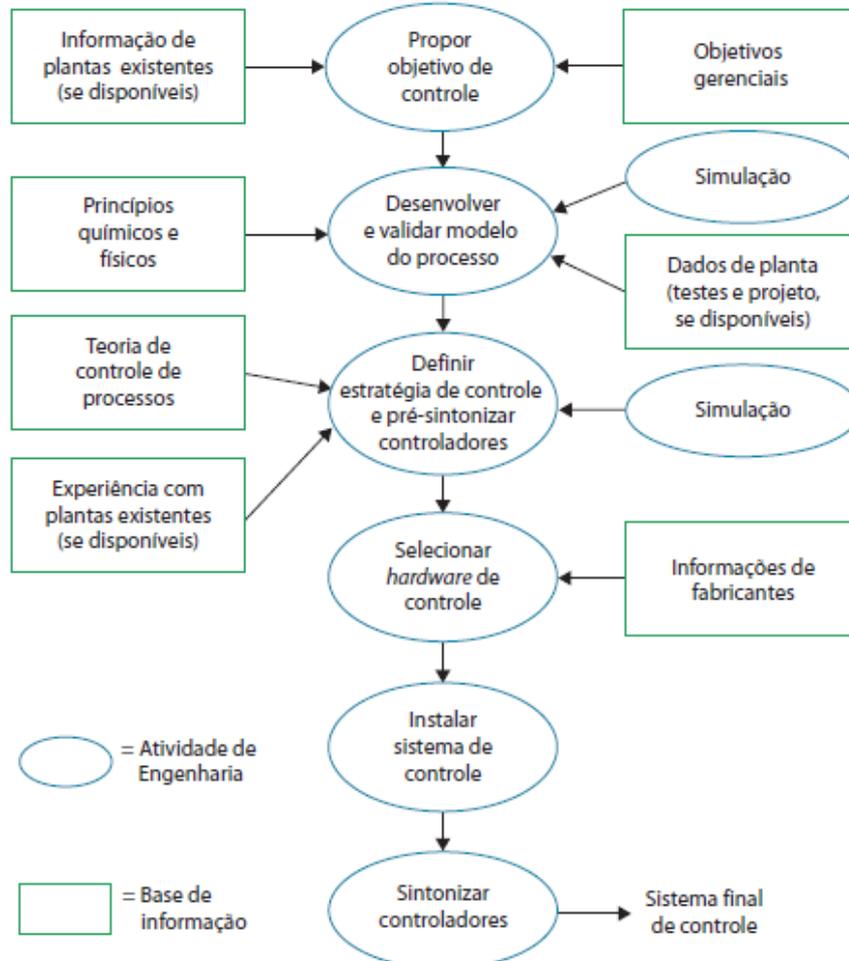
Tabela 05: Funções do controlador em Z.

TIPO DE CONTROLE	FUNÇÃO DE CONTROLE EM Z
Prop. Posição (P).	$C(z) = K_C$
Prop.-integral-Posição (PI).	$C(z) = \frac{K_C}{(1 - Z^{-1})} \left[\left(1 + \frac{\Delta t}{\tau_I} \right) - Z^{-1} \right]$
Prop.-integral-derivativo Posição (PID).	$C(z) = \frac{K_C}{(1 - Z^{-1})} \left[\left(1 + \frac{\Delta t}{\tau_I} + \frac{\tau_D}{\Delta t} \right) - \left(1 + \frac{2\tau_D}{\Delta t} \right) Z^{-1} + \frac{\tau_D}{\Delta t} Z^{-2} \right]$
Prop. Velocidade (P).	$C(z) = K_C(1 - Z^{-1})$
Prop.-integral Velocidade (PI).	$C(z) = K_C \left[\left(1 + \frac{\Delta t}{\tau_I} \right) - Z^{-1} \right]$
Prop.-integral-derivativo Velocidade (PID).	$C(z) = K_C \left[\left(1 + \frac{\Delta t}{\tau_I} + \frac{\tau_D}{\Delta t} \right) - \left(1 + \frac{2\tau_D}{\Delta t} \right) Z^{-1} + \frac{\tau_D}{\Delta t} Z^{-2} \right]$

Fonte: Fonseca, 2021.

Vale salientar que a metodologia utilizada para o projeto dos controladores feedback convencionais desse trabalho segue o que foi apresentado por Nunes (2010) em seu livro, conforme figura abaixo:

Figura 16 – Metodologia para projeto de controlador.



Fonte: Nunes, 2010.

É importante destacar que na estratégia de controle prevista para esse trabalho não foi utilizado nenhum modelo MPC (model predictive multivariable control system) pois temos as medições e informações necessárias ao trabalho, além disso, como informado por Kobayashi (2000) o sistema PMC é eficaz na área de retardo e interferência, no entanto, devido à sua fraca resposta a atraso de tempo e não linearidade, às vezes falha no controle real das plantas.

2.2.1 Sistema multicapacitivo com interação

Como o sistema em análise tem seus equipamentos interligados de forma que a resposta de um equipamento a uma perturbação influencia no comportamento de outro equipamento, assim gerando um modelo com atrasos de capacitância interativa, e com isso o comportamento deve ser levado em conta na modelagem do processo. Essa visão é também exposta por Ribeiro (2012, p. 21)

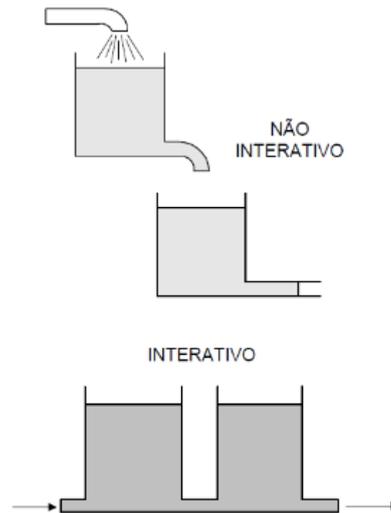
uma plataforma de produção de óleo pode ser descrita como um processo dinâmico multivariável e modular, de grande escala e descentralizado. Este tipo de planta tem dinâmicas caracterizadas por atrasos longos, perturbações frequentes e severas, interações multivariáveis, restrições físicas/ambientais, dinâmica variável e altamente interativa.

Essa interação do processo como um todo é levado em conta para o projeto dos controladores e para a análise de sensibilidade do controle plantwide, onde vale salientar que o controle é todo feito com data hold, modelos discretos e, com isso, deve-se ter cuidado, visto que em alguns equipamentos podem ocorrer que o tempo discretizado definido para aquisição das informações seja maior que o tempo morto encontrado em dinâmicas de outros equipamentos conectados a ele e também maior que a taxa de 0,2 vezes o tempo dominante do processo, levando a possíveis problemas de aliasing, conforme Ogunnaike (1994) descreve em seu trabalho, gerando assim a necessidade de sempre levar em consideração que a taxa de aquisição deve ser adequada para caracterização da curva de resposta nos ensaios realizados de forma a levar em conta todos esses fenômenos. A figura 17 mostra a diferença entre um sistema interativo e não interativo para um arranjo simples.

Garcia (2005) exemplifica que, para o sistema não interativo de dois tanques na configuração abaixo mostrada, a função de transferência global desse sistema em malha aberta é $G(s) = G_1(s).G_2(s)$, obtendo assim um sistema de segunda ordem. Já para o processo no modelo interativo, essa função de transferência não é formada apenas pela multiplicação entre as funções e, na verdade, vai depender de vários fatores para defini-la, visto que a razão entre

as capacitâncias do sistema é mais importante que a constante de tempo, sendo que, quando a razão entre as capacitâncias é menor que 0,1, o processo pode ser considerado isolado, e a interação sempre aumenta a maior constante de tempo e diminui a menor.

Figura 17 – Diferença entre sistema interativo e não interativo.



Fonte: Adaptado pelo autor, 2022.

Além disso, a modelagem e verificação gráfica das respostas de um sistema interativo ao se variar o número de equipamentos em interação mostra que, quanto maior o número de equipamentos interligados mais a resposta se assemelha a um sistema on/off com 0 e 1 e não amortecendo no formato de “S”, como se observa para sistemas de alta ordem.

No caso em análise, por ser um sistema multicapacitivo interativo, com vários vasos separadores e permutadores em série, temos que os atrasos similares e grandes se convertem na constante de tempo dominante e os atrasos pequenos no tempo morto, propiciando assim a modelagem do processo por um sistema de primeira ordem com tempo morto, (GARCIA, 2005).

Nunes (2010, p. 109) chega a mesma conclusão ao observar que

Com a elevação da ordem do sistema, esse se assemelha a um tempo morto aparente ou “tempo morto efetivo”. Por este motivo, muitas vezes, sistemas de ordem superior são aproximados por sistemas de primeira ordem com tempo morto ... o tempo morto pode ser real ou efetivo.

Essa representação da função do processo multicapacitivo com interação como de primeira ordem com tempo morto facilita o processo de modelagem, já que como Garcia (2017, p. 104) cita “a situação em que há interação é mais difícil de ser analisada, pois a função de

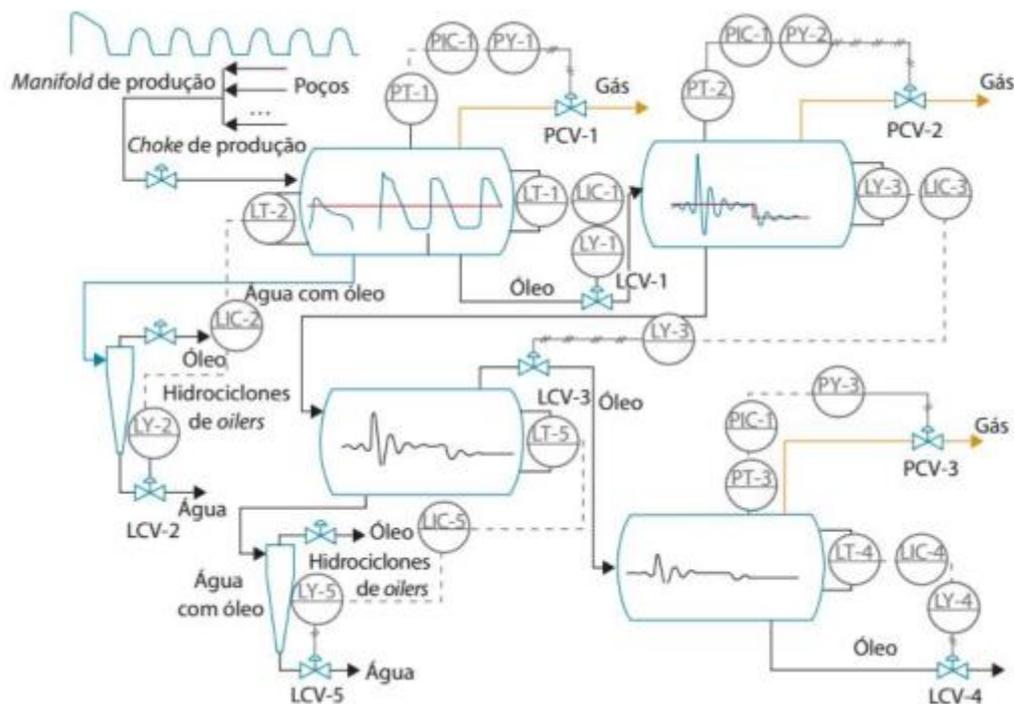
transferência global do sistema não é mais o produto das funções de transferência de primeira ordem”.

2.2.2 Controle de nível ou interface

Responsável por manter as vazões de produção de líquidos controladas, o controle de interface está presente nos vasos separadores, desgaseificadores e tratadores nas simulações. A interface sob controle reflete que as entradas e saídas dos equipamentos estão com as vazões em equilíbrio e, por isso, não existe acúmulo ou déficit que cause instabilidade no nível de líquido. A sintonia do controlador de interface deve ser feita para amortecer as variações de vazão de saída dos equipamentos a partir do ajuste na válvula de saída a fim de absorver as perturbações da vazão na entrada, segundo Teixeira *et al.* (2015).

A figura 18 mostra a redução da amplitude da golfada na interface de separação no decorrer do processo. Percebe-se que a amplitude começa alta por causa do regime oscilatório advindo dos poços que produzem por golfadas e essa amplitude reduz em função do sistema, devido ao controle atuar para atenuá-lo, e em função da mudança de equipamento a equipamento.

Figura 18 – Variação da amplitude de variação do nível ao percorrer a planta.

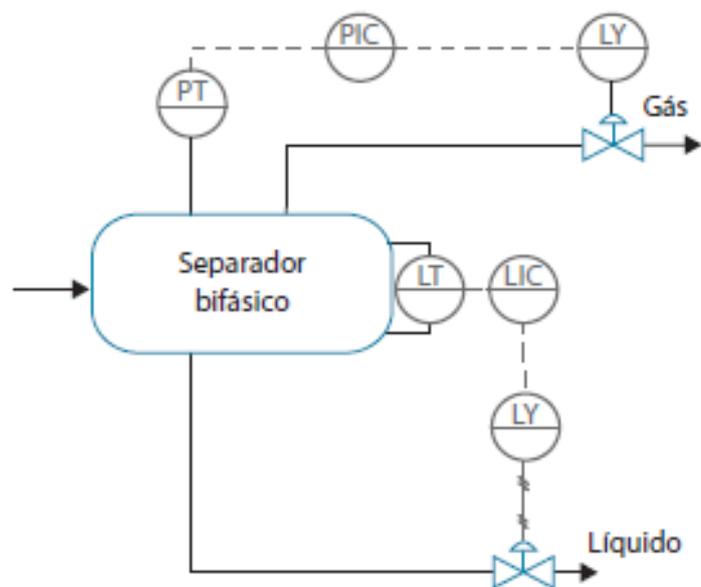


Vale salientar que, segundo Nunes (2010), o controle de interface no cenário *offshore* é bem mais difícil de controle que o onshore, já que além das amplitudes das golfadas serem maiores, também temos o efeito do roll e pitch da plataforma do tipo FPSO que alteram o movimento do nível de líquido do vaso e a limitação de tamanho dos equipamentos, o que reduz a possibilidade de aumentar o tempo de residência dos fluidos. Ainda segundo Nunes (2010) a melhor estratégia para esse tipo de variável é a de controle pelo tipo PI (proporcional integral), pois não apresenta offset e ajuda a amortecer as perturbações que iriam para os outros equipamentos.

Nesse estudo utilizamos controladores PI para controle das interfaces nos tratadores, separadores e desgaseificadores. Pode-se ver que a mesma estratégia foi utilizada por Silva (2013) no seu trabalho com um resultado satisfatório e é a mesma recomendação de Nunes (2010) na seção de controle de nível da sua obra. Consta-se que o controle de interface é de ação direta, pois quando o nível de líquido sobe precisamos abrir a válvula para que o nível reduza e volte a estabilidade, logo, temos PV (Value Point)-SP(Setpoint) para o controle convergir.

Abaixo, vê-se um esquema típico de controle feedback de interface em um vaso separador bifásico.

Figura 19 – Controle feedback de nível e pressão em vaso separador.



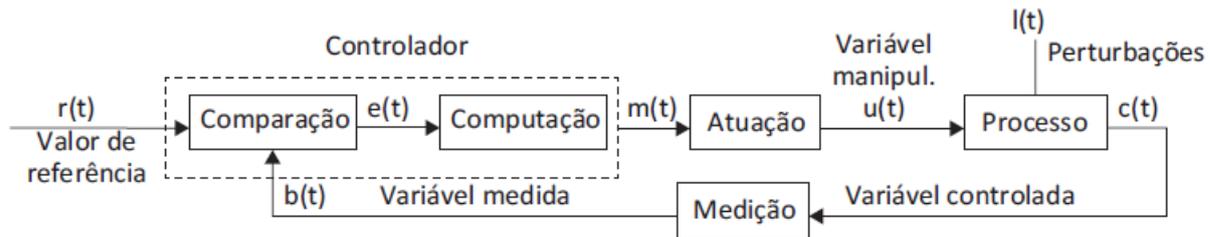
Fonte: Nunes, 2010.

Como os conversores e medidores atuam de forma rápida para esse tipo de malha, então são considerados puramente proporcionais, sendo a dinâmica do processo a preponderante

nesse caso, junto da dinâmica do atuador, é possível de ser modelada por função de primeira ordem com atraso e tempo morto com data hold de ordem 0.

As malhas típicas de interface são elaboradas com os seguintes elementos abaixo descritos.

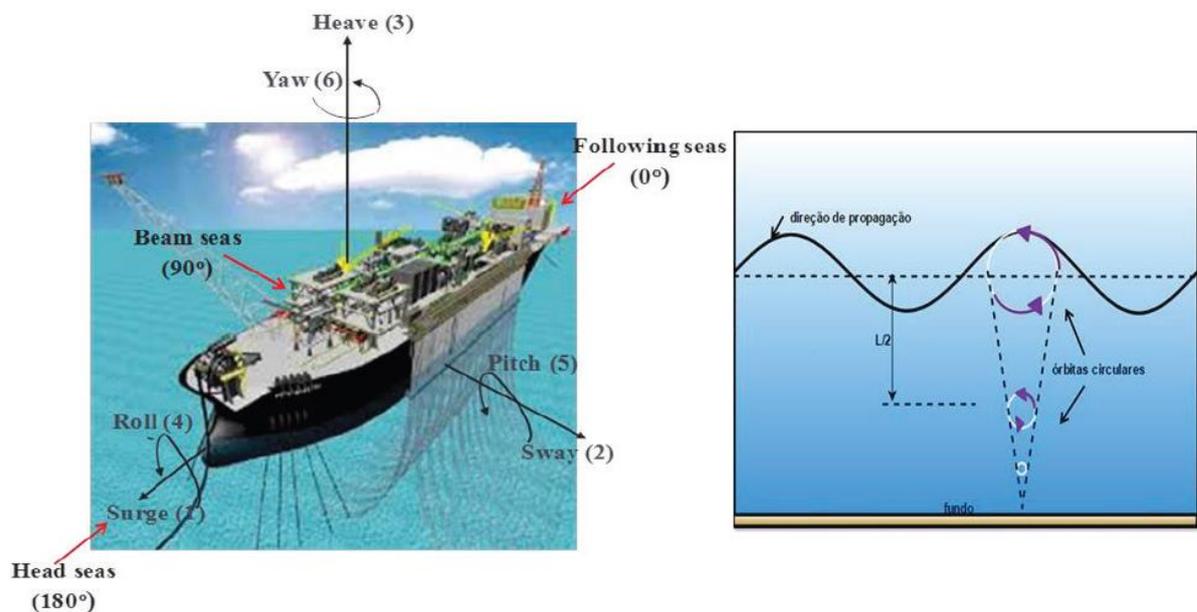
Figura 20 – Malha típica de controle por realimentação.



Fonte: Garcia, 2017.

Para o controle de interface do vaso separador devem ser levados em consideração os movimentos do FPSO e das ondas do mar, conforme figura abaixo, de forma a avaliar o controle de nível nas condições reais de operação.

Figura 21 – Movimento de um FPSO e do mar.



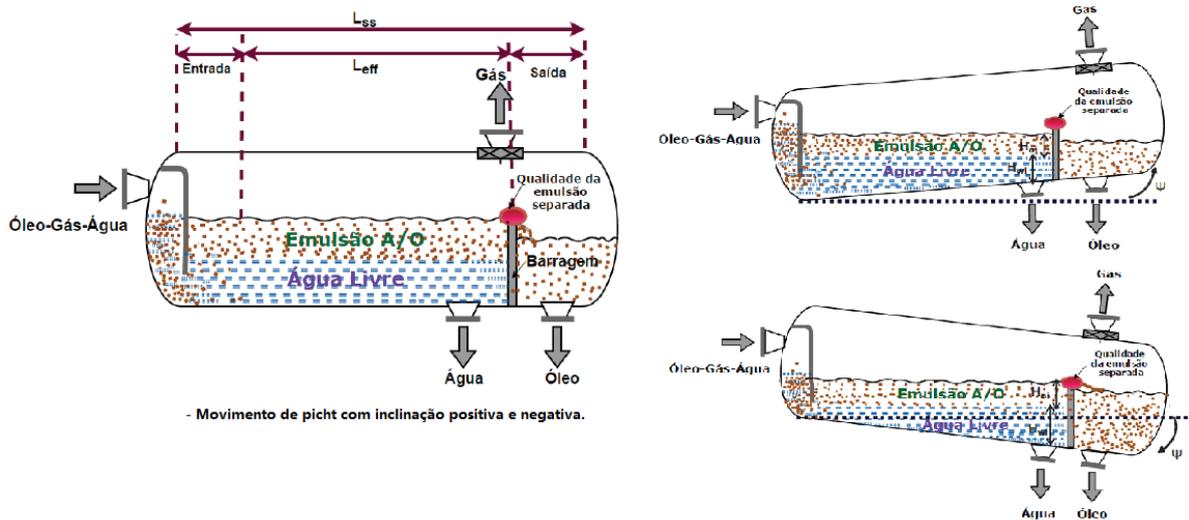
Fonte: Martins *et al.*, 2017.

Vale salientar que um fator que contribui para a desestabilização da interface de um separador de produção em uma plataforma é um intenso movimento de roll, onde Matsumoto (2014) analisou os seus efeitos e verificou-se que podem ocorrer variações médias de até 1,5 m

de nível em um cargo tank por causa desse movimento. Logo, esses efeitos devem ser considerados nas simulações a fim de prever o controle para momentos em que o mar esteja com ondas que modelam um movimento de segunda ordem de alta amplitude.

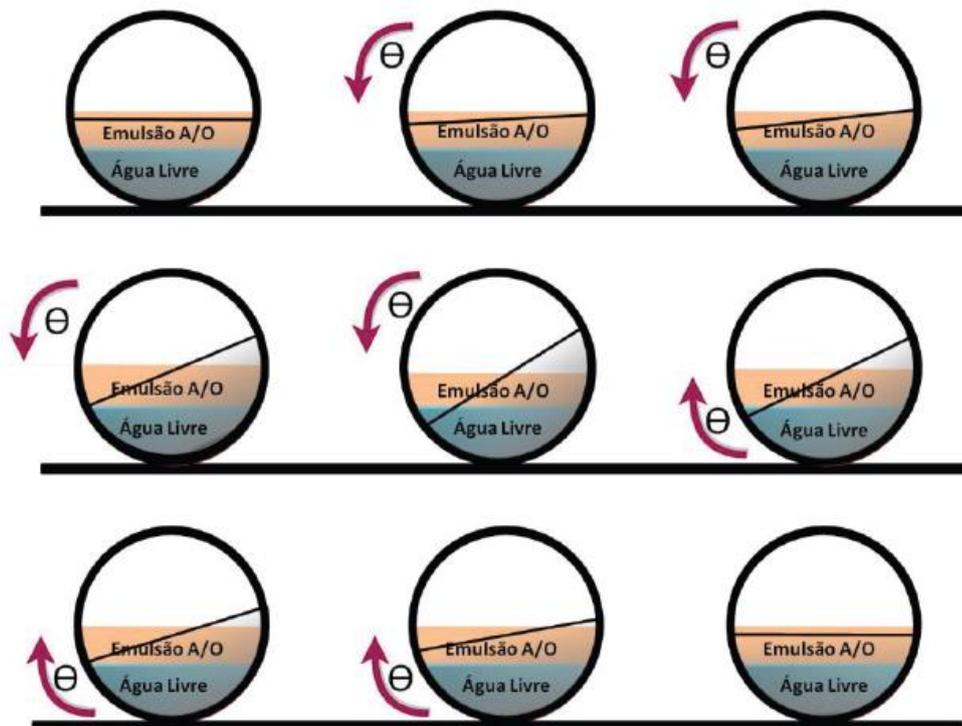
Com isso, tem-se os seguintes movimentos possíveis e seus comportamentos frente ao nível a partir da análise do trabalho de Martins *et al.* (2017).

Figura 22 – Movimento de pitch e seus efeitos.



Fonte: Martins *et al.*, 2017.

Figura 23 – Movimento de roll e seus efeitos.



Fonte: Martins *et al.*, 2017.

Nesse contexto, algumas simulações foram feitas por Martins *et al.* (2017), para um separador de 5,3 m de diâmetro e 19 m de comprimento, similar ao separador analisado nesse trabalho, chegando à várias condições de variação de nível frente as possibilidades de movimento do mar, sendo que no presente trabalho o efeito advindo desses fatores pode ser visto como perturbações em algumas simulações no controle de nível dos equipamentos.

2.2.3 Controle de pressão

O controle de pressão se caracteriza pela necessidade de velocidade na sua atuação já que ele é muito influenciado pelo balanço de gás no equipamento, sendo assim, as variações no acúmulo de gás dentro dos equipamentos é que define, em sua maior parte, o quanto vai ser ou não pressurizado o sistema. Manter o fluxo constante de entrada e saída de gás é essencial para manter a pressão controlada e para isso se usa a abertura da válvula de saída de gás para controle da pressão a partir da sua alteração de vazão.

Para esse estudo o indicado é o uso de controladores PI para controle das pressões no separador e nos desgaseificadores. Percebe-se que a mesma estratégia foi utilizada por Silva (2013) no seu trabalho com um resultado satisfatório e é a recomendação de Teixeira *et al.* (2015) também em sua obra. A ação de controle nesse caso é direta, pois quando a pressão aumenta a válvula é aberta para reduzir o inventário de gás até que o processo volte ao controle, logo, PV-SP.

Vale salientar que o controle de pressão é muito importante para a especificação dos produtos, pois é o principal fator responsável por manter as correntes nas condições de equilíbrio líquido vapor necessárias para a separação da fração gasosa da líquida em um vaso separador e desgaseificador.

Na figura 19, mostrada anteriormente, temos uma representação do controle de pressão em um separador e, na figura 20, a representação da malha de controle feedback convencional.

Da mesma forma do controle de interface, os conversores e medidores atuam de forma rápida para esse tipo de malha, sendo considerados puramente proporcionais, e a dinâmica do processo preponderante, junto do atuador, sendo possível de ser modelada por primeira ordem com atraso e com data hold de ordem 0, onde praticamente não existe tempo morto.

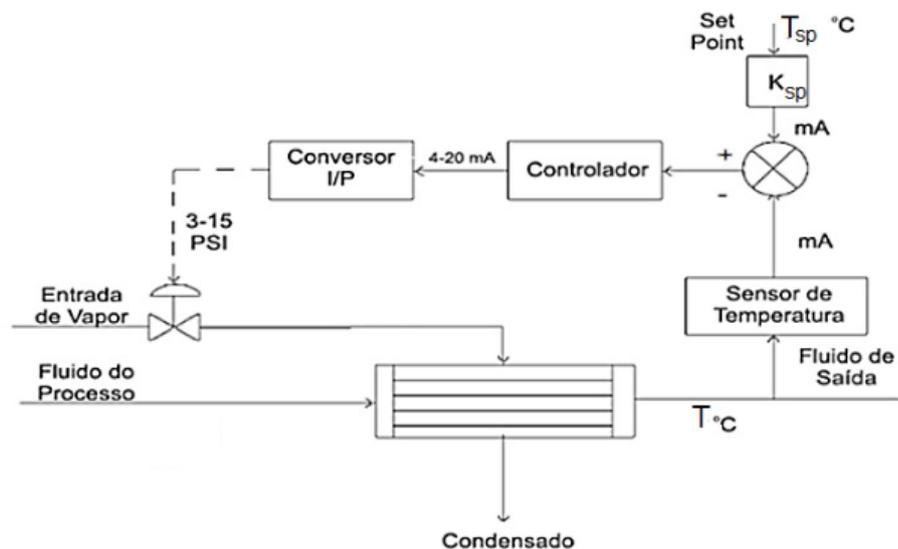
2.2.4 Controle de temperatura

O controle de temperatura é feito em aquecedores/resfriadores ou em reatores onde existem reações exotérmicas ou endotérmicas. Nesse trabalho, temos 3 trocadores de calor, um para aproveitamento energético e sem controle implementado, outro com controle de temperatura baseado na manipulação da vazão de água de aquecimento, que vem do setor de utilidades da planta, para elevação da temperatura da corrente de alimentação do primeiro desgaseificador e o terceiro para resfriamento do petróleo tratado, que vai para os *cargo tanks*, utilizando água de resfriamento.

Nesse processo, o aquecimento é importante para realizar o tratamento eletrostático com maior eficiência de separação de água, além do que ajuda no processo de separação do gás. Já o resfriamento da corrente de óleo tratado de saída ocorre para que seja realizada a medição fiscal e o armazenamento final para *offloading* em condições propícias para medição.

Segue abaixo a representação de um esquema de controle de temperatura em trocador de calor típico:

Figura 24 – Trocador de calor e malha de controle de temperatura.



Fonte: Bojorge, 2021.

Pode-se notar pelo esquema acima que o controle de temperatura se dá por ação reversa, SP-PV, pois quando a temperatura se eleva temos que reduzir a vazão de água de aquecimento, promovendo logo o fechamento da válvula de controle. Já o trocador de resfriamento age por ação direta, pois ele aumenta a abertura da válvula caso o produto saia com temperatura maior,

promovendo assim o seu resfriamento, PV-SP. A estratégia recomendada pela literatura (NUNES, 2010) para controle de temperatura é o PID.

Vale salientar que o processo de aquecimento e resfriamento em uma unidade de produção marítima se dá via correntes disponibilizadas pelo setor de utilidades da plataforma, logo, as condições de temperatura e pressão são fixas e servem para toda a unidade, sendo possível variar apenas o volume circulado para o que se pretende. Nesse caso, os medidores, atuadores e processo tem dinâmicas consideradas na modelagem, pois o processo apresenta tempo morto elevado.

2.3 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

2.3.1 Lógica Fuzzy

A inteligência artificial é o campo da ciência que estuda a emulação de comportamentos humanos por máquinas de forma a fazê-los terem reações autônomas para resolução de problemas. Enquanto o comportamento natural de um processo/controlador é ter uma reação pré-determinada para com uma ação, na lógica nebulosa - lógica fuzzy, o mesmo processo pode passar por uma etapa de inferência que leve a diversas decisões possíveis baseadas em um comportamento humano modelado, levando assim a uma reação diferente do convencional em um sistema de controle. Veja que esse pensamento está de acordo com o que é defendido por Simões (2007, p. 2) que fala que “lógica Fuzzy é uma técnica que incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle”, e ainda completa ao falar que “a lógica fuzzy pode capturar esse conhecimento em um controlador fuzzy, possibilitando a implementação de um controlador computacional com desempenho equivalente ao do operador humano”.

Vê-se que Vidal (2015, p. 81) confirma essa ideia ao dizer que

a grande vantagem de se utilizar o controlador fuzzy é que para processos complexos, onde a modelagem da planta e a alteração constante das variáveis de processo tornam o seu equacionamento impeditivo, se pode através da observação heurística e empírica, e através de poucas e simplificadas regras, proporcionar um controle satisfatório.

Apesar de ser uma alternativa que apresenta uma gama de possibilidades bem melhor que o controle convencional, conforme defendido acima, essa técnica tem pouco uso atualmente já que como Simões (2007, p. 6) afirma

parece que os controladores PID representam exatamente o máximo de teoria compreensível pela maioria dos operadores de plantas industriais, enquanto que equipamentos que utilizam teoria de controle multivariado necessitam de pessoal com um nível maior de compreensão matemática. Além disso, pessoal com o nível técnico elevado não são empregados em grupos de operação e manutenção de plantas industriais.

Para a incorporação de conhecimento/comportamento humano na lógica fuzzy é necessário primeiro que exista a etapa de modelagem/definição desse conhecimento. Essa etapa é a que vai dar subsídio para o controlador ser criado e é chamada de método heurístico. É nessa etapa que se faz a interpretação do conhecimento humano de forma a ser incluído no controle do processo (CAMPOS, 2016).

No presente estudo é necessário para o controle da vazão da planta a inclusão de um controlador fuzzy híbrido com PID e redes neurais, sendo que essa ação é referenciada como benéfica por Carvalho (2020, p. 2) que traz em sua obra situações como:

implementaram um controlador PID híbrido para o controle em uma planta de nível utilizando a referência do sistema como entrada do bloco fuzzy. O controlador desenvolvido obteve um melhor desempenho quando comparado ao PID com sintonia fixa. Estes testes foram realizados com 3 mudanças de setpoint: 25%, 50% e 75%.

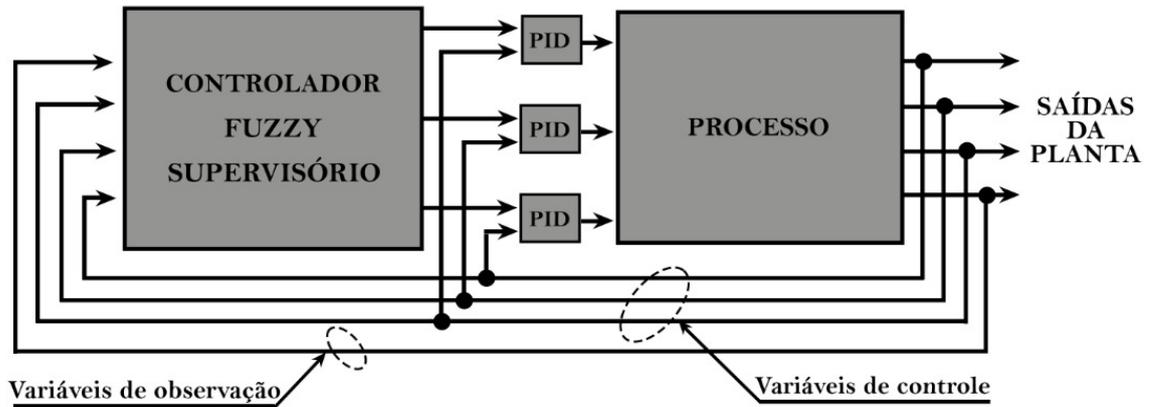
O controlador fuzzy mostrado nos resultados para controle de vazão foi utilizado a partir de uma lógica criada com redes neurais e para controle do processo no tocante ao acionamento do override para não atingimento dos limites dos equipamentos. Percebe-se que associações entre os métodos já são citadas por Simões (2007, p. 49), apesar de serem diferentes do caso acima exemplificado, ao falar que “devido ao fato de que projetar funções de pertinência é uma tarefa trabalhosa, técnicas especiais usando redes neurais e/ou algoritmos genéticos estão disponíveis para a sua geração automática”.

Nota-se que as aplicações descritas acima não inviabilizam o uso dos controles PIDs convencionais já presentes na planta de processo, onde muitas vezes eles servem de ferramenta para o controle fuzzy operar com maior eficiência. A obra de Vidal (2015) é toda baseada na análise comparativa de PID e fuzzy, mostrando assim a importância de implantar os controles convencionais na planta. Segue abaixo, um exemplo de esquema desse tipo de associação na figura 25.

Com base nas informações da planta e das simulações foram criadas as regras de inferência e o processo de fuzzificação e defuzzificação para operacionalizar o fuzzy. O fuzzy de entrada controla a abertura das válvulas dos poços, que hoje tem operação manual, sendo a proposta desse trabalho automatizá-las e fechar malha a partir do estudo de otimização pelo

controle plantwide e redes neurais. Pode-se verificar na figura 26 como funciona o processo de fuzzificação e defuzzificação.

Figura 25 – Lógica fuzzy para ajuste de PIDs.



Fonte: Simões, 2007.

Figura 26 – Operações da Lógica fuzzy.

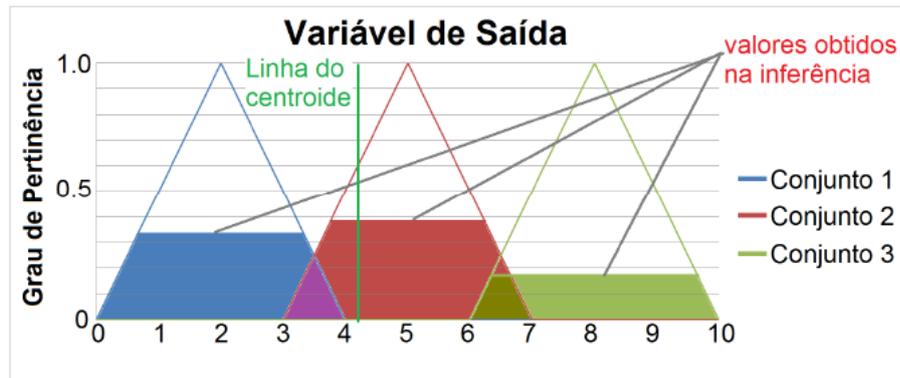


Fonte: Telles *et al.*, 2005.

Verifica-se que as entradas são fornecidas para o processo de fuzzificação, a partir de regras e inferências, que transformam o sinal para que o processo de defuzzificação retorne à informação tratada para um patamar que possa ser observado e ou utilizado para o sistema. A inferência determina como as regras são escolhidas a serem usadas para transformação do sinal de entrada e as regras trazem o compilado de informações que o sistema colhe do operador da

planta ou da técnica necessária para transformação do sinal em uma informação útil para o processo. Ao final, temos o processo de defuzzificação que trata e filtra a informação final para fornecer ao sistema ou pessoal que recebe a informação. Pode-se ver abaixo um exemplo de processo de defuzzificação descrito por Freitas *et al* (2014, p. 33):

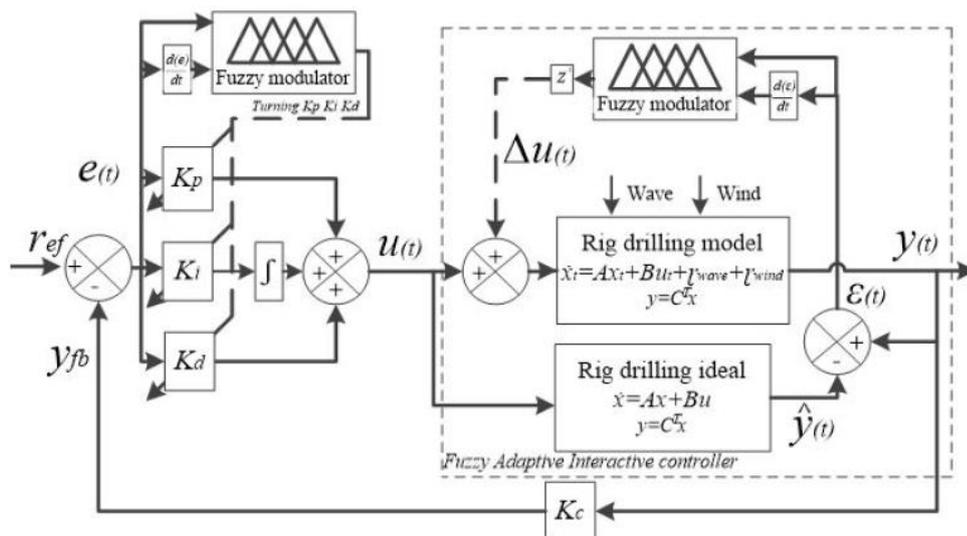
Figura 27 – Defuzzificação pelo método do centroide.



Fonte: Freitas *et al*, 2014.

Abaixo seguem algumas ilustrações do uso de PID aliado a lógica fuzzy, criando assim controladores híbridos Fuzzy-PID para que seja possível ver como ocorre a interação entre as técnicas, segundo Do (2017):

Figura 28 – Esquema para compensação de balanço.

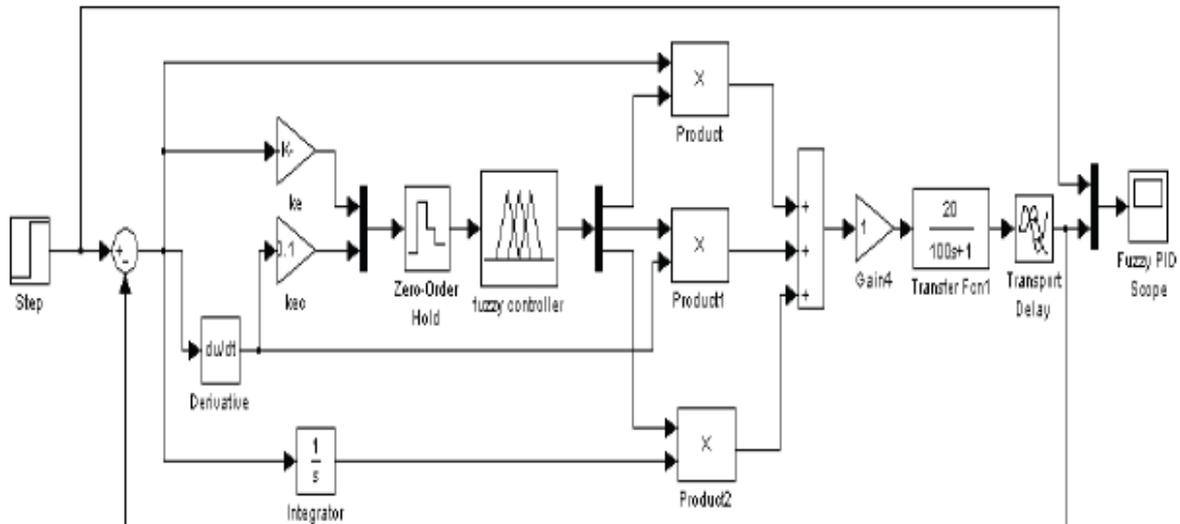


Fonte: Do, 2017.

Cada configuração de controle fuzzy híbrido é criada de acordo com o problema em análise a fim de verificar todas as especificidades do processo e tornar o sistema estável e com

sintonia adequada para as condições de operação impostas. Outro modelo de utilização da tecnologia citada é o proposto por Niu *et al.* (2011) em seu trabalho, ao utilizar um Fuzzy-PID para controle do processo via associação com constantes proporcionais, integrais e derivativos que pode ser observado no esquema abaixo:

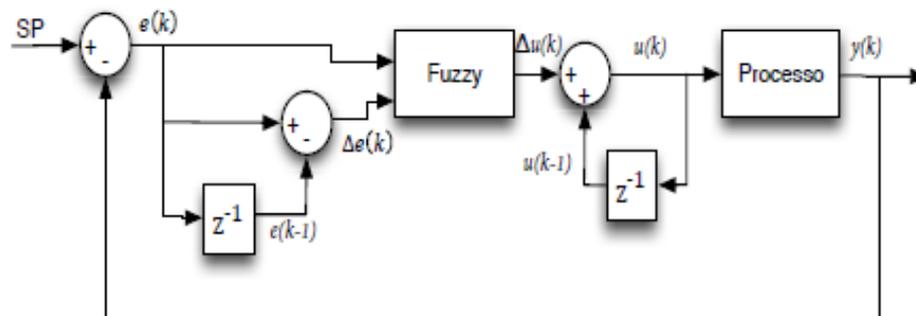
Figura 29 – Fuzzy adaptativo com controle PID no Simulink®.



Fonte: Niu *et al.*, 2011.

Já Junior *et al.* (2011) apresenta o seu controle PI com Fuzzy no domínio Z no seguinte esquema no Simulink® ao final do seu trabalho, apresentando dados de desempenho muito superiores ao controle PI convencional.

Figura 30 – Controlador fuzzy-PI para controle de nível.



Fonte: Junior *et al.* (2011).

2.3.2 Sistema Especialista

Dado o grande número de variáveis a serem controladas com o controle override e o controle de setpoint, é necessário um sistema especialista para fazer a coordenação entre os controles. O sistema especialista é denominado por Telles *et al.* (2005, p. 14) como:

Os Sistemas Especialistas (SE) são sistemas simbólicos que apresentam um comportamento semelhante a um especialista de um determinado domínio. Estes sistemas são capazes de emitir pareceres ou apresentar decisões sobre determinada área do conhecimento humano.

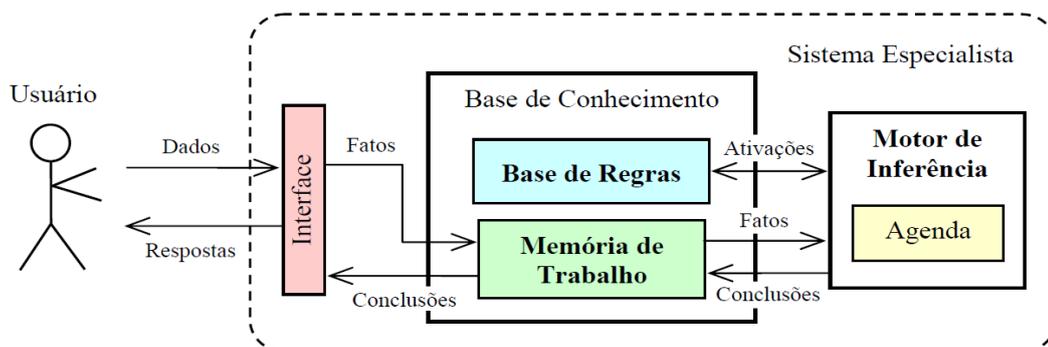
Vinade (2003, p. 62) amplia o conceito de sistema especialista, como mostrado a seguir, ao falar em relacionar informações com conhecimentos já armazenados, conforme explicado abaixo:

De uma forma geral, sistema especialista é um programa de computador desenvolvido para resolver problemas de uma área específica, tal como o raciocínio de um especialista humano da mesma área. Para emular a habilidade de um especialista, este tipo de programa utiliza a capacidade de relacionar as informações do problema a ser resolvido com o conhecimento já armazenado.

Já Mecabô (2007, p. 57) apresenta a seguinte visão e ainda contribui e exemplifica seu modelo, conforme a figura 31, que segue abaixo, mostrando a interligação entre as etapas do processo de operação de um sistema:

A popularização dos sistemas especialistas depende muito mais de uma visão empreendedora e prática para o desenvolvimento de soluções computacionais inteligentes para velhos problemas – suportada primordialmente pela engenharia e gestão de conhecimento – do que de novas técnicas e pesquisas avançadas na área da Inteligência Artificial (IA).

Figura 31 – Estrutura de um SE baseado em regras de produção.



O controle override gera muitas regras a serem obedecidas dependendo do número de limites a serem controlados e quantidade de equipamentos, por isso o sistema especialista se torna necessário. Campos *et al.* (2003, p. 7) corroboram com essa ideia ao afirmar que os “sistemas especialistas podem auxiliar no aumento da segurança e na otimização das Unidades Industriais” e “permitem disponibilizar conhecimentos especializados, como os associados ao controle de corrosão, para os operadores em tempo real”, além disso, o uso de sistemas especialistas já foram utilizados para partida de plataformas fixas com ganhos consideráveis segundo De Campos (2000).

Castelani (2012, p. 9) cita ao tratar sobre sistema especialista que “muito da solução de problemas por humanos, ou cognição, pode ser expressa por regras do tipo SE ENTÃO”. Com isso, pode-se ver abaixo um exemplo de um fragmento do conjunto de regras de um sistema especialista proposto por Campos (2016, p. 4) para controle de temperatura de fornos em uma refinaria e que é semelhante ao proposto por esse trabalho no tocante a estrutura e linguagem utilizada para acionamento entre o controle override e o controle de setpoint.

Figura 32 – Sistema especialista de controle de fornos da REDUC.

- **SE** {(Temperatura “Skin” do forno “i”) é ALTA} e {(Forno “i”) está HABILITADO)} e {(Restrição do forno “i”) não é MÍNIMA} **ENTÃO** {Diminuir a carga do forno “i” de forma rápida}
- **SE** {(Temperatura “Skin” do forno “i”) está acima da (Média das temperaturas “skin”)} e {(Forno “i”) está HABILITADO)} e {(Restrição do forno “i”) não é MÍNIMA} **ENTÃO** {Diminuir a carga do forno “i” de forma lenta}
- **SE** {(Temperatura “Skin” do forno “i”) está abaixo da (Média das temperaturas “skin”)} e {(Forno “i”) está HABILITADO)} e {(Restrição do forno “i”) não é MÁXIMA} **ENTÃO** {Aumentar a carga do forno “i” de forma lenta}

Fonte: Campos, 2016.

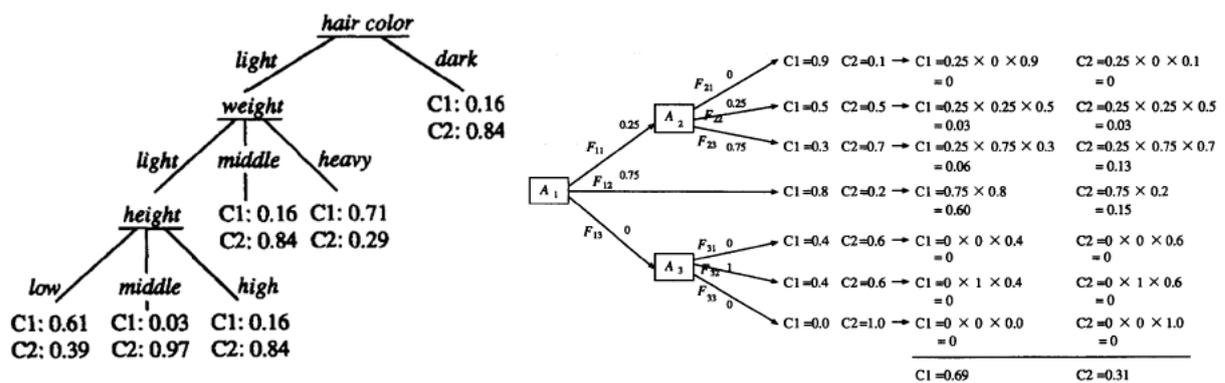
Novaes (2003) cita softwares que podem ser utilizados para elaboração e apoio de sistemas especialistas como o “Spring”, “Nexpert” e “SGBDR”, já Resende *et al* (2017) cita o uso do “Expert” e “Sinta” em seu trabalho e Almeida Junior *et al.* (2003) já fala em “Jess” e “Protegé” para seus estudos, onde pode-se citar que esses aplicativos têm em comum a lógica

presente nos diagramas das figuras 31 e 32, porém aplicados a determinadas áreas de conhecimento e de forma a tornar possível, por um programador experiente, construir sistemas especialistas para situações diversas.

Uma forma eficiente de geração de sistemas especialistas são os baseados em motores de inferência, onde Freitas (2010, p. 55) informa que a capacidade de decisão “deverá ser feita pelo motor de inferência do sistema especialista, que indicará o seu nível de adequação”, promovendo assim o critério de escolha que definirá a próxima ação do algoritmo.

Outra forma interessante de elaborar a lógica fuzzy ou sistema especialista é citado por Umanol *et al.* (1994) ao utilizar a árvore de decisão para elaboração do modelo, como pode ser visto abaixo na figura 33.

Figura 33 – Árvore de decisão para lógica fuzzy.



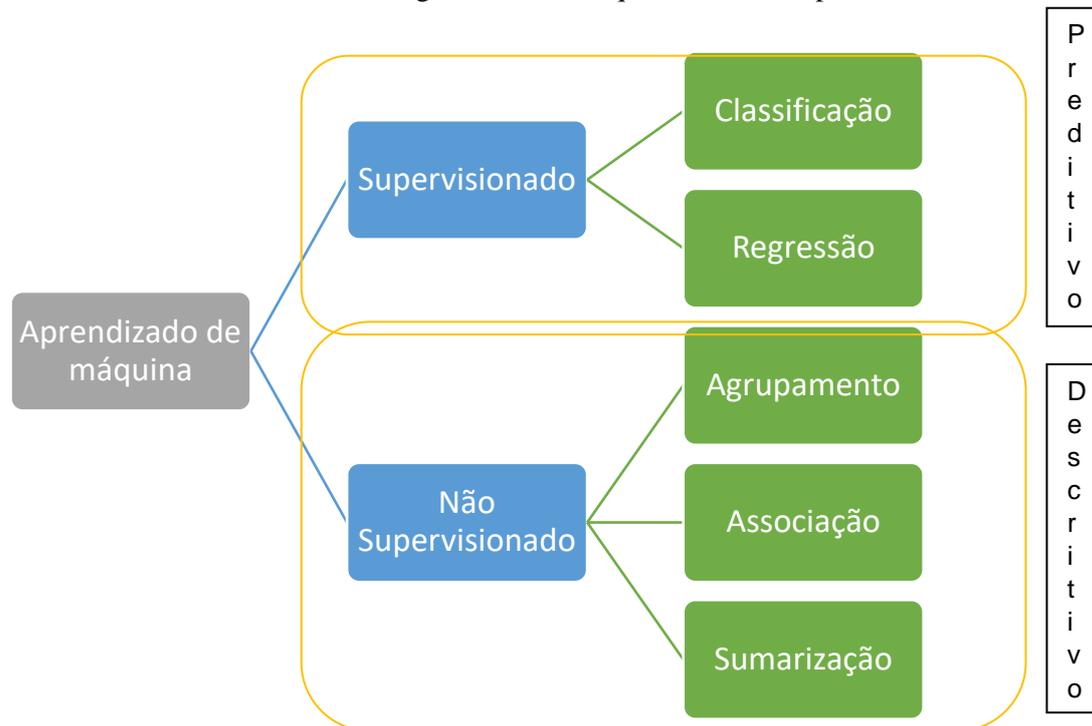
Fonte: Umanol *et al.*, 1994.

Como ficaram a relação entre os graus de pertinência com suas funções de pertinência, o grau de superposição, o tipo de defuzzificação (C-o-A, C-o-M ou M-o-M), as regras de inferência, as relações entre as variáveis e outras informações podem ser vistos na seção de resultados.

2.4 MACHINE LEARNING

Machine learning ou aprendizado de máquina é a ciência que estuda o uso dos algoritmos que dão a habilidade de aprendizagem as máquinas/computadores sem que eles sejam explicitamente programados. Esses algoritmos podem ser divididos em classes por diferentes metodologias, uma delas está exposta conforme figura 34 abaixo.

Figura 34 – Hierarquia clássica de aprendizado.



Fonte: Elaborado pelo Autor com base em Faceli *et al.*, 2021.

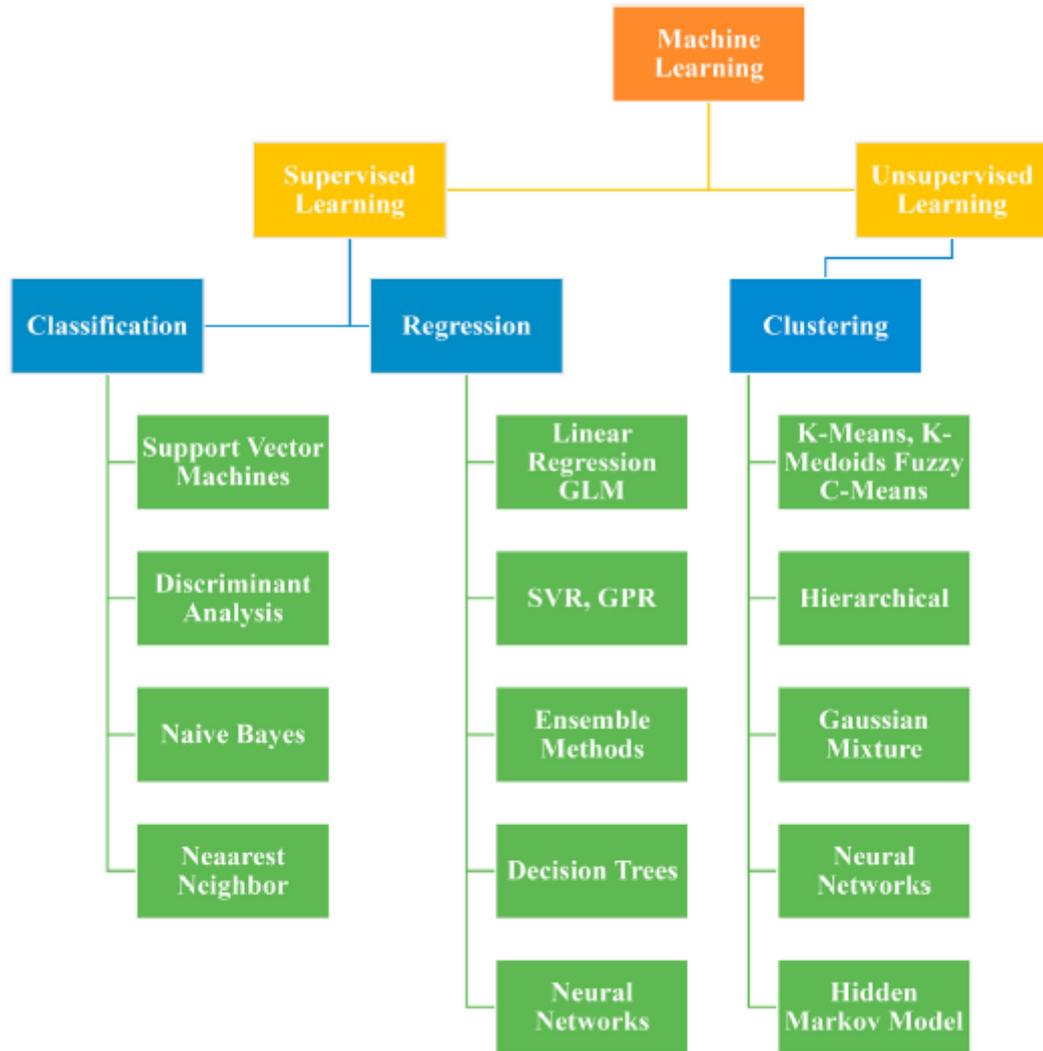
Quando fala-se em aprendizado supervisionado está se falando daquele que apresenta um conjunto de informações para treino, consistindo em entradas e correspondentes saídas desejadas, tendo assim todo o universo de análise conhecido. Já o aprendizado não-supervisionado é aquele onde a rede atualiza seus pesos sem o uso de pares entrada-saídas desejadas e sem indicações sobre a adequação das saídas produzidas, apenas dando situações possíveis de ocorrer.

Nas tarefas preditivas os algoritmos são aplicados a dados em que já se conhece as relações de entrada e saída, fazendo assim o treinamento do método de forma supervisionada, ou seja, criando uma estrutura de predição de valores com base em valores já existentes. As redes neurais utilizadas nesse trabalho são algoritmos desse tipo.

Já os algoritmos genéticos são caracterizados como algoritmos descritivos por agrupamento, que tem a função de, a partir de uma metodologia baseado em relações biológicas, realizar operações matemáticas que dividem os dados em grupos até se chegar no agrupamento de dados desejados de acordo com o que foi parametrizado como função objetivo.

Outra forma de apresentar a divisão entre os tipos de algoritmos de machine learning é apresentado por Sircar *et al.* (2021), conforme descrito na figura 35 abaixo, de forma mais detalhada.

Figura 35 – Etapas envolvidas no processo de aprendizado de máquina.



Fonte: Sircar *et al.*, 2021.

Pode-se notar que nessa classificação as redes neurais aparecem nos dois ramos da árvore em relação ao aprendizado ser supervisionado ou não, já o algoritmo genético aparece como de aprendizado não supervisionado por clusterização do tipo hierárquico, alinhado com o que foi encontrado acima no método proposto por Faceli (2021).

Logo em seguida será apresentado com mais detalhes como funcionam essas ferramentas.

2.4.1 Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais (RNA) começaram a ser pesquisadas há 50 anos e, por isso, se mostram como tecnologia com grande potencial de crescimento na utilização. Inspirado no

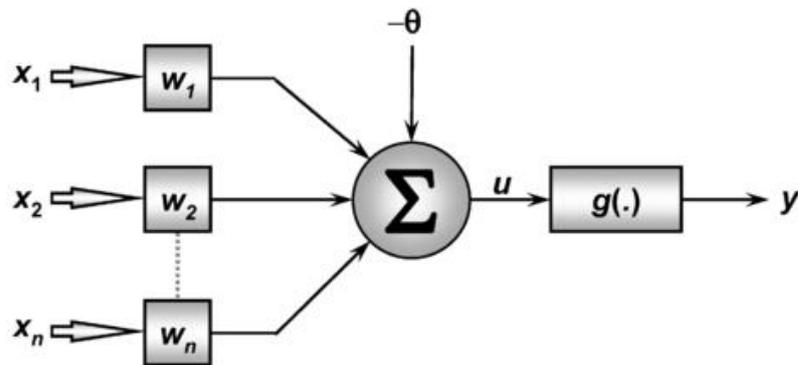
funcionamento dos neurônios do sistema nervoso, por isso esse nome, e pelo fato de conseguirem adquirir dados e manterem esse conhecimento para fazerem previsões ou identificarem padrões, tem como base o fato das suas unidades de conhecimento, chamados de neurônios artificiais, possuírem grande número de interligações, sinapses artificiais, que geram vetores/matrizes de transformação de informações.

Da Silva (2010) traz como principais características das RNAs: adaptação por experiência, capacidade de aprendizado, habilidade de generalização, organização de dados, tolerância a falhas, armazenamento distribuído e facilidade de prototipagem.

São várias as estruturas possíveis de redes neurais, onde se tem como principal componente o neurônio artificial. Abaixo na figura 36 pode-se verificar um esquema simplificado, onde X_n são as entradas (os dados a serem analisados), W_n são os pesos sinápticos (pesos que ponderam as variáveis da rede), Σ é a combinador linear (agrega os valores ponderados), θ como o limiar de ativação (valor de disparo de limiar de ativação), “u” é o potencial de ativação (resultado dos itens anteriores), “g(.)” é chamado de função de ativação (filtra o sinal de saída) e o sinal de saída “y” que é o valor produzido pelo neurônio.

Resumindo, tem-se a fase entrada de dados (X_n), ponderação dos valores (W_n), tratamento do sinal (Σ e θ), filtragem (u e g(.)) e disponibilização da informação (y).

Figura 36 – Representação genérica de um neurônio artificial.



Fonte: Da Silva, 2010.

Matematicamente, pode-se representar a estrutura acima como:

$$y = g\left(\sum_i^D X_i W_i - \theta\right) \quad (4)$$

Onde a equação acima é utilizada por um passo a passo que executa os cálculos até que se chegue no número de interações previstas N (épocas) ou se chegue ao critério objetivo definido para o erro. Pode-se ver abaixo um exemplo de utilização dessa equação para cálculo de pesos e bias até se chegar no valor desejado.

Figura 37 – Pseudo-algoritmo de cálculo de uma rede com um neurônio.

Pseudo-algoritmo do Perceptron

1. Inicialize os pesos w e o bias b
2. Para cada amostra (x_n, y_n) do nosso banco:
 - A. Calcule $\hat{y} = f(\sum_i^D x_i w_i + b)$, onde f é a função **step para classificação e linear no caso da regressão**
 - B. Calcule o **erro** $= y_n - \hat{y}$
 - C. Atualize os pesos $w_i = w_i + \lambda * erro * x_i$
 - D. Atualize o bias $b_i = b_i + \lambda * erro$
3. Repita o passo 2 por N vezes ou até que alguma medida de custo para o **erro** seja menor que um valor pré-determinado.

Fonte: Gualberto, 2020.

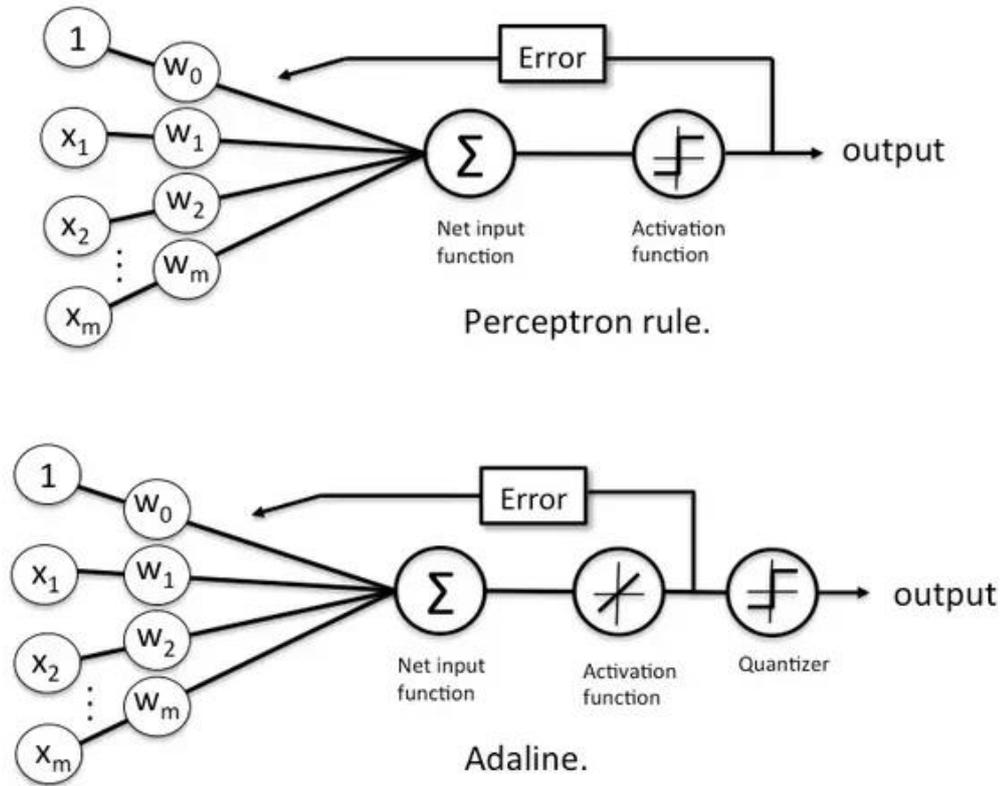
Vale salientar que o erro, como calculado acima, é o representado para um neurônio do tipo perceptron, pois está usando como regra para recalculer seus pesos o erro aritmético obtido após o cálculo da função de ativação, enquanto outros tipos de neurônios como o adaline e o sigmoide apresentam regras diferentes e, com isso, convergências diferentes. Pode-se verificar na figura 38 abaixo a diferença entre um neurônio perceptron e um adaline em relação ao ponto em que se calcula o erro. Com essa diferença se obtém maior precisão no cálculo do hiperplano ótimo de separação das variáveis que o neurônio realiza com seu resultado. Vale salientar que o erro realizado pode ter várias metodologias de cálculo, devendo assim ser expresso qual tipo foi utilizado.

Várias são as formas de cada neurônio ser utilizado no processo de criação da rede ao alterar sua forma de atuação ou pela forma como ele se interliga na rede. Quando a quantidade de informação a ser tratada é grande e envolve muitas camadas escondidas, camadas de neurônios em série após a camada inicial, chamamos isso de Deep Learning, aprendizado profundo, temática essa em expansão de uso em todo o mundo (SIRCAR *et al.*, 2021).

Como mostrado abaixo, para a correta correlação entre as entradas e saídas de uma rede é feito um processo interativo, onde cada interação é chamada de época e representa o cálculo dos pesos sinápticos e dos liminares de ativação (também chamados de bias) de forma a fazer com que o cálculo comparativo entre as amostras de treinamento tenha o menor erro possível em relação as saídas da rede. São vários os cálculos realizados nesse processo, além dos mostrados anteriormente, onde se destaca o uso da taxa de aprendizagem (Learning Rate), o

momentum, o uso de neurônios diferentes e o algoritmo backpropagation para aprimoramento do cálculo dos pesos sinápticos.

Figura 38 – Diferença entre o cálculo do erro entre neurônios.



Fonte: Gualberto, 2020.

Já as funções de ativação são utilizadas de acordo com o objetivo de análise e geralmente se escolhe um tipo por cada camada de neurônios. Nesse caso, elas serão utilizadas para realizar regressão de dados e não classificação, assim o ideal é utilizar funções do tipo linear nas entradas e saídas e sigmóides ou da família ReLU nas camadas intermediárias. Pode-se ver abaixo na tabela 6 os principais tipos de funções e suas equações características.

Nesse trabalho as redes neurais utilizadas estão com suas arquiteturas e topologias descritas na metodologia e nos resultados de forma a encontrar a função de produção de óleo e gás dos poços produtores surgentes interligados a plataforma a partir da abertura das válvulas chokes e pressões de operação. Entende-se como arquitetura de rede a forma com que os neurônios podem se interligarem para formar o resultado e topologia, como a quantidade e arranjos estruturais que esses neurônios podem assumir. São várias as possíveis arquiteturas, com destaque para: arquitetura feedforward de camada simples, arquitetura feedforward de camadas múltiplas, arquitetura recorrente ou realimentada e arquitetura em estrutura reticulada.

Essas arquiteturas já têm modelos de rede bastante conhecidas, como: Rede Perceptron, Rede Adaline, Redes Perceptron Multicamadas, Redes de funções de base radial (RBF), Redes recorrentes de Hopfield, Redes Auto-organizáveis de Kononen etc.

Tabela 06: Funções de ativação.

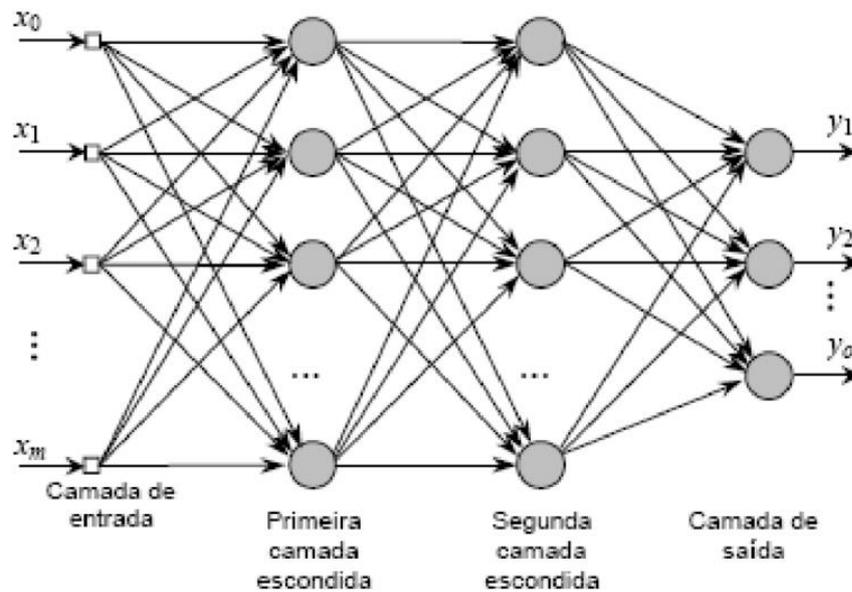
Name	Plot	Equation	Derivative
Identity		$f(x) = x$	$f'(x) = 1$
Binary step		$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < 0 \\ 1 & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$	$f'(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x \neq 0 \\ ? & \text{for } x = 0 \end{cases}$
Logistic (a.k.a Soft step)		$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$f'(x) = f(x)(1 - f(x))$
Tanh		$f(x) = \tanh(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1$	$f'(x) = 1 - f(x)^2$
ArcTan		$f(x) = \tan^{-1}(x)$	$f'(x) = \frac{1}{x^2 + 1}$
Rectified Linear Unit (ReLU)		$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < 0 \\ x & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$	$f'(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < 0 \\ 1 & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$
Parameteric Rectified Linear Unit (PReLU) ^[2]		$f(x) = \begin{cases} \alpha x & \text{for } x < 0 \\ x & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$	$f'(x) = \begin{cases} \alpha & \text{for } x < 0 \\ 1 & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$
Exponential Linear Unit (ELU) ^[3]		$f(x) = \begin{cases} \alpha(e^x - 1) & \text{for } x < 0 \\ x & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$	$f'(x) = \begin{cases} f(x) + \alpha & \text{for } x < 0 \\ 1 & \text{for } x \geq 0 \end{cases}$
SoftPlus		$f(x) = \log_e(1 + e^x)$	$f'(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$

Fonte: Gualberto, 2020.

Segue abaixo, figura 39, esquema com uma RNA formada por arquitetura feedforward de camadas múltiplas com topologia de rede com 3 camadas escondidas, camadas após a primeira até a resposta, sendo 2 intermediárias e uma de saída.

Com a topologia da rede neural definida é necessário fazer uma análise de overfitting (excesso de aprendizado) e underfitting (não atingiu o ponto ideal e ficou preso em um máximo ou mínimo local). O overfitting pode ser resolvido com a análise do erro ao realizar a eliminação de neurônios por dropout, já o underfitting pode ser analisado ao se fazer uma varredura por pontos de máximos e mínimos locais ao se realizar a execução de um planejamento experimental com diversos momentos e learning rates diferentes.

Figura 39 – Representação de uma rede com 3 camadas escondidas.



Fonte: Da Silva, 2010.

2.4.2 Algoritmos genéticos

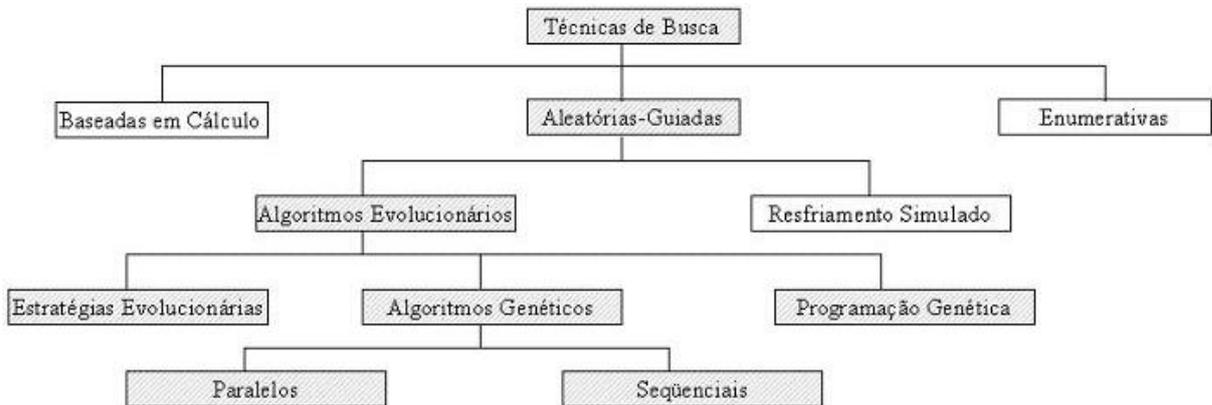
Segundo Freitas *et al.* (2014, p. 25)

desde a década de 1960 tem havido um interesse crescente em imitar os seres vivos na busca pelo desenvolvimento de algoritmos poderosos para aplicação em problemas de otimização complexos, sendo que tais técnicas fazem parte do que pode ser denominado como computação evolutiva.

Vários são os tipos de algoritmos que podem ser utilizados para fazer otimização de processos. A classe acima, chamada de algoritmos evolucionários, são baseados em regras heurísticas, que se assemelham pelo fato de usarem em sua estrutura termos da evolução dos seres humanos, natureza e dos sistemas biológicos, como seleção, mutação e reprodução em suas atividades. Os algoritmos genéticos (AG), uma classe de algoritmos evolucionários, utilizam desses conceitos para criar uma topologia de código que reproduz as etapas de codificação genética de forma a resolver problemas complexos. Pode-se verificar abaixo um organograma que localiza esse método na figura 40.

Percebe-se que esses algoritmos estão dentro da faixa de técnicas aleatórias guiadas no organograma abaixo, já que a aplicação deles se dá em problemas complexos ou com muitas soluções em que é necessário encontrar resultados heurísticos para o problema com aplicação de algum direcionador de busca para redução do espaço amostral em função das gerações.

Figura 40 – Organograma das técnicas de busca.



Fonte: Genéticos, 2021.

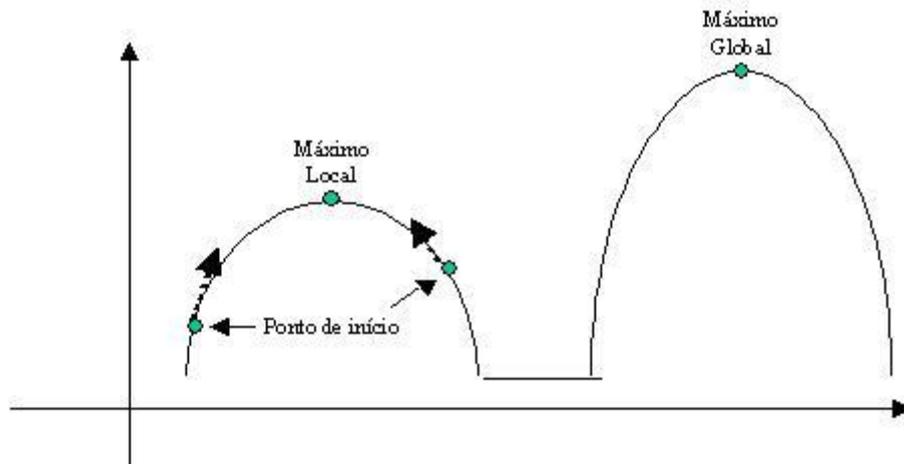
Linden (2012) inicia sua obra apresentando conceitos de esforço computacional e explicando como funciona o tempo de execução no pior caso, tempo médio de execução, tempo de melhor caso e a análise de loops e seus tempos de execução, tudo isso para chegar na definição da notação-O ou big-Oh. Isso é importante, porque mostra qual o limite superior para a taxa de crescimento no processamento do algoritmo em análise, conseqüentemente medindo qual o limite do esforço computacional necessário para a atividade e se deve ou não alterar a forma de execução para reduzir esse esforço, apesar da possibilidade de ocorrer perda da qualidade da informação gerada quando se reduz a precisão de cálculo, sendo função do programador verificar qual a melhor configuração para resolução do seu problema.

Essa situação se aplica ao problema em análise, pois tem-se vários equipamentos interligados, onde 5 deles são vasos, que podem ter suas condições operacionais alteradas em determinados ranges de operação, e para cada situação dessa temos um resultado diferente para a produtividade da planta. Cada vaso pode operar em diversas condições de pressão e temperatura e, com isso, o equilíbrio líquido vapor se altera em determinadas faixas e isso traz uma condição econômica diferente a cada situação possível de operação.

A interação entre esses equipamentos traz um número maior ainda de possibilidades, sendo assim construído um problema para resolução por técnicas evolucionárias, já que se precisa encontrar a melhor solução dentro de um conjunto de possibilidades que envolvem muitos cálculos e, por isso, é necessária uma técnica de busca com hierarquia de execução por priorização de resultados. Nesse caso, cria-se uma função objetivo que visa medir qual a condição econômica mais atrativa de operação com base na margem de retorno econômico para a produção do óleo e gás separados nesses equipamentos. Com os máximos dessa função calculados pelos algoritmos, pode-se parametrizar os setpoints da planta para se modificarem

automaticamente para o ponto ideal calculado, dentro do máximo global da função objetivo, a partir de sistema especialista ou outras técnicas, conforme figura 41 abaixo.

Figura 41 – Representação de máximos locais.



Fonte: Genéticos, 2021.

Pina (2010, p. 39) cita que “o problema de otimização de uma função de n variáveis, $f(x) : R^n \rightarrow R$, consiste em encontrar um elemento $x \in R^n$ tal que a função $f(x)$ seja maximizada ou minimizada”. Ao analisar a otimização a partir da análise das várias vazões possíveis para a produção dos poços, então tem-se uma curva de melhor condição de operação gerada para operacionalizar a mudança de setpoint. Percebe-se que o problema é complexo e depende da precisão requerida, pois para cada vaso se tem a possibilidade de variar 2 bar de pressão a uma precisão de análise de 0,1 bar em torno de seu valor de estado estacionário (20 pontos para análise), 10 °C de temperatura a uma precisão de análise de 0,1 °C em torno de seu valor de estado estacionário (100 pontos para análise), o nível de líquido podendo variar até 1 metro a uma precisão de análise de 0,1 m em torno de seu valor de estado estacionário (10 pontos para análise), para uma vazão de entrada que pode variar em uma vazão de 100 kmol/h em torno do valor de estado estacionário a uma precisão de análise de 1 kmol/h (100 pontos para análise) produzindo um universo de análise para cálculo da função de eficiência/objetivo, para um vaso, de $N_p = 20 \times 100 \times 10 \times 100 = 2 \cdot 10^6$ simulações/respostas. Se aumentarmos o universo de estudo para a otimização dos 5 vasos ao mesmo tempo, teremos $N_p = 20^5 \times 100^5 \times 10^5 \times 100^5 = 3,2 \cdot 10^{31}$ simulações necessárias para serem realizadas a fim de encontrar o conjunto de resultados para a função objetivo que terá como ponto ótimo o valor que a maximize. Vale salientar que, se alterada para mais a precisão informada acima para variação dos valores de cada variável, pode-se aumentar mais ainda o total de simulações a serem

realizadas, como também se aumentado o universo de análise de cada variável ou o número de variáveis.

Com os dados acima, fica justificada a necessidade do uso de técnicas heurísticas para resolução do problema, sendo a escolha pelo algoritmo genético justificado pelo fato de em sua topologia existir a técnica de definição de gerações com cálculo de conjunto de soluções e cálculo da função objetivo, que geram novas gerações sempre em busca de um resultado melhor que o anterior a cada mutação ou recombinação, diferente dos outros algoritmos heurísticos que tem um foco multiobjetivo, que garante uma convergência em busca dos valores ótimos a cada geração com um esforço computacional menor.

Pode-se perceber que alterar os valores das variáveis da forma proposta só é possível porque o processo está sobre um controle PID de cada variável, pois sendo um processo multicapacitivo interativo, sem controle ativo ao se alterar uma variável em um vaso, ocorreriam mudanças nos outros vasos para um nova condição de estado estacionário e eles não ficariam na condição programada, onde com o controle ativo, ao alterarmos uma variável temos uma perturbação nos outros vasos, mas com correção disso pela atuação do controle PID, chegando a uma nova condição, conforme a prevista pela simulação com os setpoint que foram pré-definidos.

Verifica-se que a cada simulação se obtém uma vazão de óleo e gás produzidos diferentes e com as receitas obtidas de cada produto se tem o resultado financeiro daquela simulação, que deve ser o maior possível para termos o melhor retorno econômico. A função objetivo também poderia ter sido elaborada em função de resultados operacionais, como o consumo de eletricidade, vapor, combustível, ou até mesmo o HH (hora-homem) para operação da planta, sendo preferida a maximização da receita obtida com a produção, pois os outros fatores descritos acima têm menor relevância para essa situação, já que são praticamente fixos em relação as mudanças de setpoint previstos e controles implantados. Na seção destinada ao estudo do controle plantwide pode-se ver a formalização dessa função, já que elas são iguais.

Segue abaixo alguns termos importantes utilizados nesse tipo de programação:

- **Função-objetivo:** é o objeto da otimização, seja maximização ou minimização dela. Pode ser apresentado como um problema de otimização ou um resultado que se quer melhorar ou convergir para algo;
- **Indivíduo** é quem porta o **código genético**. O código genético é o espaço amostral do problema a ser resolvido, nesse caso, podemos considerar como espaço os valores em que podemos variar cada variável, ou seja, o número de pontos de análise e os seus

limites. O código genético deve ser capaz de representar todo o universo de análise e precisa ser finito para convergência do método;

- **A seleção:** Usa-se o algoritmo de seleção para escolha de como os indivíduos são ordenados para uso na função-objetivo e quais pesos são atribuídos para a probabilidade de serem escolhidos aleatoriamente de acordo com o método. A exemplo, temos a seleção por "torneio", onde são escolhidos pequenos subconjuntos da população, sendo selecionado o indivíduo que melhor se adequa a função objetivo, temos a seleção por "classificação" e até a seleção por "truncamento", entre outras.
- **A reprodução:** Se inicia com o acasalamento, fase essa em que são escolhidos dois indivíduos para se reproduzirem, ou seja, gerarem descendentes que manterão o tamanho populacional, além disso, temos a etapa de exclusão dos indivíduos descartados no método de seleção. Após isso, temos a recombinação, ou crossing-over, que é quando os descendentes recebem em seu código genético parte do código do pai e parte do código da mãe. Isso garante que os melhores indivíduos sejam capazes de trocar entre si as informações que os levam a ser mais aptos a sobreviver, e assim gerar descendentes ainda mais aptos. Por último, vem as mutações, que são realizadas de forma a ter maior variabilidade genética na população, impedindo que a busca fique estagnada em um mínimo ou máximo local.

Fazendo uma melhor explicação sobre o principal elemento do AG, pode-se observar o que explica Pina (2010, p. 39)

a teoria de Charles Darwin, os indivíduos mais aptos possuem uma probabilidade maior de reprodução e, com isso, seus descendentes mantem o bom material genético na espécie. Este material genético é representado pelo cromossomo, que constitui a identidade única de cada indivíduo.

Vale salientar que o processo de escolha automática de setpoint é muito importante para a otimização da planta e até para a otimização de pessoal. Pinosofa *et al.* (2010) cita a importância de redução de pessoal que trabalha em plataformas, pois a cada posto de trabalho *offshore* temos 2,5 pessoas para ocupar o posto e, com isso, o custo associado. Verifica-se que se o controle ocorrer sem interferência humana, se terá uma necessidade menor de pessoal para esse setor, como o pessoal para acompanhar painéis/supervisão, ideia essa corroborada na conclusão do trabalho de Braswell (2013).

Foi feito um trabalho por Araújo Júnior (2007) que trouxe um resultado melhor na mudança de setpoint de uma coluna de destilação utilizando o esquema Fuzzy-Algoritmo genético do que com o esquema que utilizou apenas a lógica fuzzy, o que corroborou para a

escolha dessa técnica para o problema em análise. Os trabalhos realizados por Sauer (2019) e Junior *et al.* (2010) também confirmam isso.

2.5 DATA SCIENCE

Data Science ou ciência de dados é o ramo da computação responsável pelo tratamento de dados, estruturados e não-estruturados, que visa a extração de conhecimento, detecção de padrões ou adequação deles para determinado fim, onde como a indústria de petróleo gera muita informação para controle e acompanhamento de suas atividades, esse tipo de estudo se torna importante e isso foi confirmado por Hanga (2019) em seu trabalho.

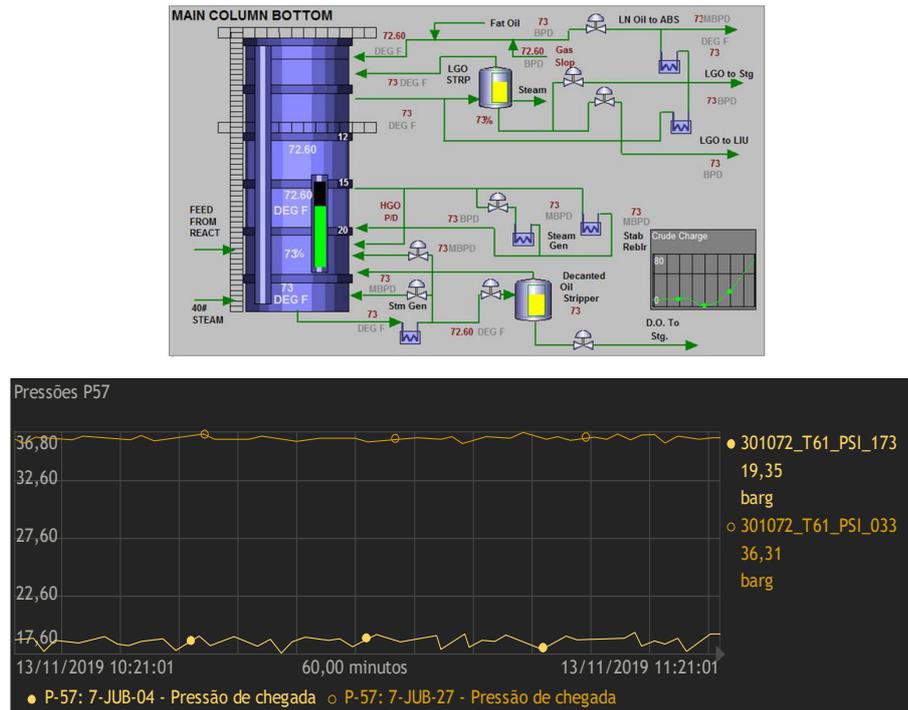
No caso em estudo são várias as maneiras de se utilizar de ciência de dados, pois as informações fornecidas pelo processo precisam ser tratadas para serem utilizadas. Por exemplo, no caso das informações de produção que são utilizadas para validar um modelo, é necessário fazer a média móvel temporal dos dados ruidosos e filtrar as golfadas para avaliar se o simulador está adequado para com o modelo e seus valores encontrados, já para os dados que são utilizados pelas redes neurais é preciso fazer a normalização dos dados em faixas e utilizar-se dos conceitos de compressão e exceção para aquistar as informações em função do tempo entre as amostras disponíveis, sem perder qualidade no dado aquistado.

Para se utilizar Data Science (DS) se faz necessário utilizar artifícios da matemática e estatística unidos a sistemas informatizados de tratamento e filtragem das informações a fim de transformar os dados brutos em dados adequados para a utilização.

A interface desse trabalho que mais utiliza informações tratadas são as redes neurais, já que as RNAs precisam de dados para o aprendizado supervisionado a fim de calcular os pesos e bias para a elaboração do modelo. Nesse caso, as informações necessárias foram retiradas do PI Server® (Servidor do Plant Information) via ProcessBook 2015 R3® do sistema utilizado pela Petrobras que armazena todas as informações da plataforma. Pode-se ver abaixo as imagens das telas do sistema.

O processo de extração de dados do PI Server® se inicia com a seleção do período de análise, período esse em que é preciso ser bem criterioso a fim de selecionar datas para coleta dos dados que compreendam bem a realidade do espaço amostral, nesse caso, os poços precisam estar em atividade e com os dados registrados, já que uma falha no armazenamento de algum dos dados pode levar a falhas de interpretação da realidade pela RNA.

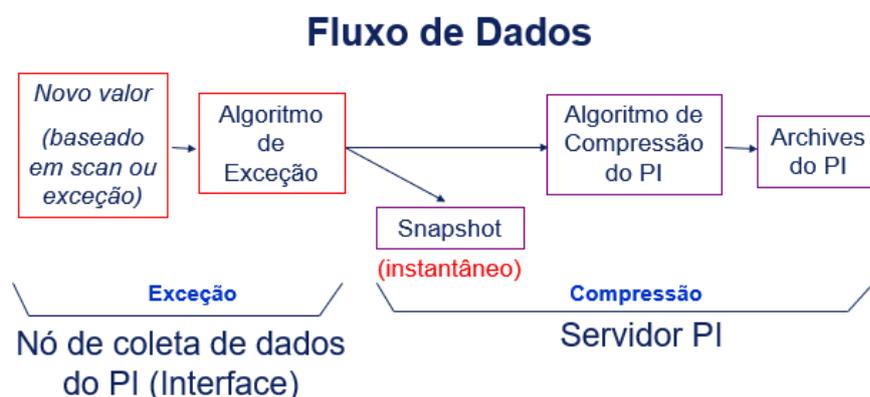
Figura 42 – Exemplos de telas do ProcessBook®.



Fonte: Adaptado pelo autor, 2021.

Uma ação que merece atenção é a interpretação dos dados em relação às técnicas de compressão e exceção que o banco de dados realiza automaticamente. Abaixo pode-se ver o fluxograma que demonstra como isso ocorre e em seguida a explicação de cada etapa:

Figura 43 – Funcionamento do banco de dados PI.



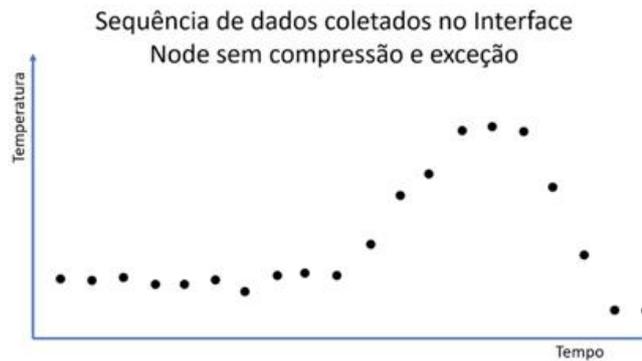
Fonte: Adaptado pelo autor, 2021.

Percebe-se que o valor medido no sensor não vai direto para armazenamento no banco de dados. Antes disso, ele passa por um algoritmo de exceção que avalia se o novo valor é igual ao valor anterior ou não, dentro da precisão requerida adicionada ao programa, onde se for igual ele não registra o novo valor e se for diferente registra, pois aquele valor gera uma nova

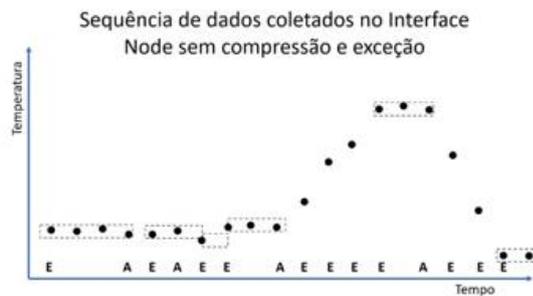
informação. Isso faz com que se reduza o volume de dados adicionado ao sistema sem perda na qualidade da informação, abaixo pode-se verificar um exemplo de como funciona o algoritmo de exceção.

Figura 44 – Teste de exceção e compressão.

Teste de exceção no API Node



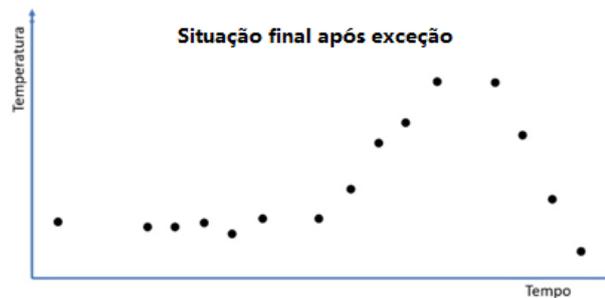
E: Exceção A: Anterior



E: Exceção A: Anterior



E: Exceção A: Anterior



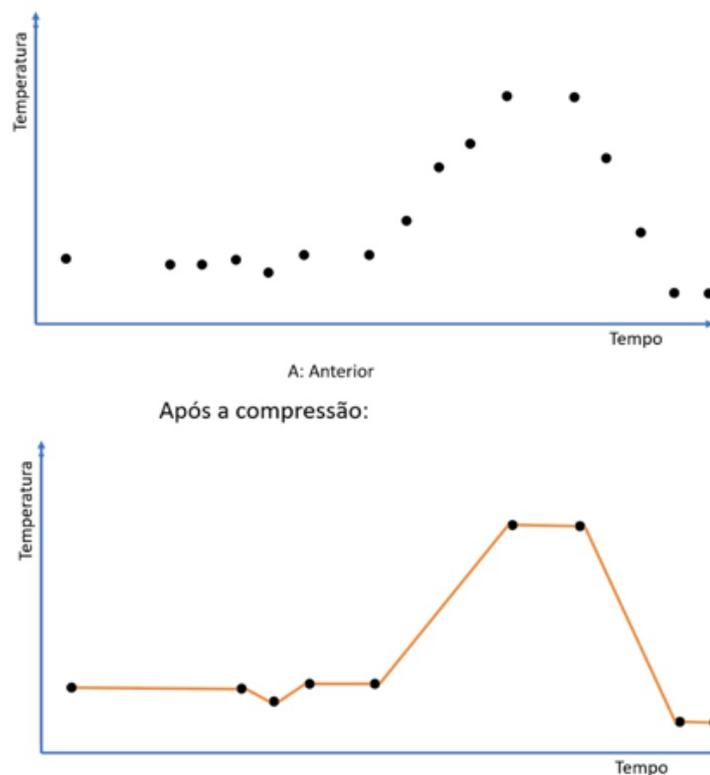
A: Anterior

Já o algoritmo de compressão é o processo de verificação da tendência dos dados dentro do espaço amostrado pelo teste de exceção de forma a só arquivar no sistema os dados que ultrapassam a margem de análise da reta que liga dois pontos sucessivos. Para facilitar o entendimento, pode-se verificar sequência abaixo.

Figura 45 – Teste de compressão e suas etapas.

Teste de compressão no PI Server

O algoritmo de compressão é realizado para determinar quais valores serão arquivados.



Fonte: Dados adaptados pelo autor, 2021.

Na figura 44 vê-se que o sensor mediou 20 pontos e que ao final da figura 45 só 9 foram registrados no banco de dados sem perda na qualidade da informação em relação a sua tendência inicial. Vale salientar que isso é importante de ser frisado, pois um ponto isolado do gráfico deve ser considerado como muito importante, apesar de ser um único ponto, já que o registro por um longo período de tempo com um determinado valor se repetindo pode ser registrado no gráfico por apenas um ponto, logo, cada ponto é importante para a análise, e deve-se sempre atentar que, qualquer ponto fora da curva deve ser analisado, tendo em vista que ele pode representar uma longa linha de tendência onde apenas ele foi registrado.

Outra ação importante de tratamento de dados desse trabalho é o cálculo da média móvel, pois alguns dados são ruidosos e fica difícil se definir a média representativa da amostra só olhando os valores gráficos, assim um tratamento estatístico baseado na média do sistema torna isso possível. No gráfico abaixo pode-se ver um exemplo da representação de um valor ruidoso medido e sua média móvel.

Figura 46 – Média móvel em amarelo.



Fonte: Dados adaptados pelo autor, 2021.

Quanto mais pontos existirem entre o cálculo de um ponto da média móvel a outro, mais lenta é a atualização da média e mais carregada do passado é o valor atual, já se for colocada a atualização do valor da média num curto espaço de tempo mais representativo, aquele valor, porém, mais ruidoso, vai se tornando a amostra, logo, saber dosar esse fator é importante nesse processo.

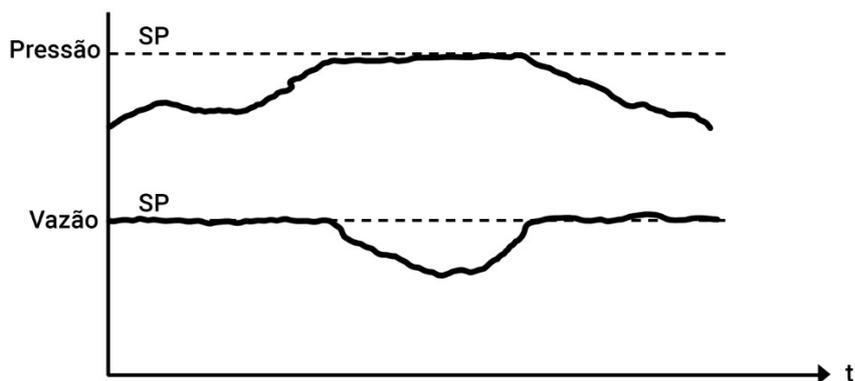
Em vários casos é preciso também se utilizar de regressões para elaboração de modelos empíricos/correlações, sendo cada situação realizada de acordo com o problema em questão.

2.6 CONTROLE OVERRIDE

Para melhorar o controle de uma variável que interfere em diversas outras variáveis da planta, situação essa que ocorre no processo de um FPSO por ser um sistema multicapacitivo com interação e que, ao mesmo tempo, se forem ultrapassados os limites de segurança estabelecidos pode causar problemas, pode-se utilizar um controle seletivo onde diferentes loops de controle podem vir a ser utilizados para controlar o mesmo processo ou variável, quando isso ocorre se tem um controle override, (GARCIA, 2019).

No caso em análise, tem-se o estoque final de óleo no *Cargo Tanks*, no caso, seu nível limite, além dos limites dos vasos da planta em termos de pressão e nível que devem ter seus extremos monitorados de forma a estabelecer um limitante para a vazão de entrada da planta. Essa atividade é importante, pois se observado que nenhum equipamento está na condição limite, então pode-se aumentar a produção de óleo, já para condições de operação próximo a esses limites, existe a necessidade de manter a vazão constante e, se as variáveis estiverem caminhando para algum limite, então se deve restringir a produção para que se mantenha a estabilidade e segurança da planta. Percebe-se que o controle da produção nesse trabalho é feito pelo modelo fuzzy com redes neurais, sendo assim, o controle override ocorre pelo sistema especialista criado para o controle multivariado da planta e para viabilizar a análise plantwide.

Figura 47 – Controle override da vazão sobre a pressão.



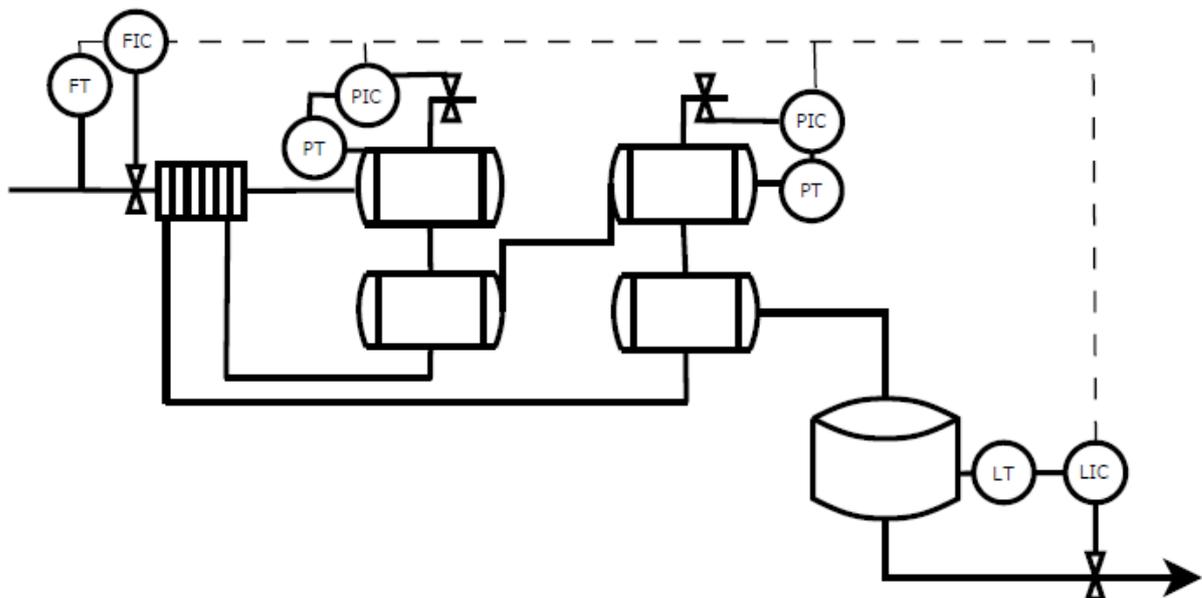
Fonte: Garcia, 2019.

Por exemplo, a figura acima mostra como a pressão influencia no controle da vazão, situação essa que pode ocorrer também no presente estudo, onde o SP deve ser entendido como o limite de pressão, onde se deve reduzir a vazão caso ele seja alcançado, mas ao mesmo tempo a vazão é controlada pelo setpoint de vazão de produção do processo, logo, se tem duas

variáveis controlando uma manipulada. Nesse caso, o sistema especialista precisa informar ao controlador a prioridade de execução, pois o limite sendo alcançado gera a ação de tornar o setpoint de vazão como secundário ao controle e priorizar o controle da pressão pela ação da redução da vazão até que se obtenha a normalidade de pressão e, com isso, o sistema especialista volte a priorizar a ação do controle de vazão a atingir o seu setpoint.

Abaixo segue representação de um controle override de vazão de entrada de uma planta que apresenta duas malhas de controles de pressão e uma de nível acoplados a um controlador de vazão que ajusta a vazão de entrada de toda a planta a partir das restrições impostas pelos controladores. O estudo de como isso deve ocorrer será analisado na seção do controle plantwide, mas vale salientar que o controle override é uma ferramenta necessária a isso.

Figura 48 – Controle override de nível e pressão para controle da vazão de entrada.

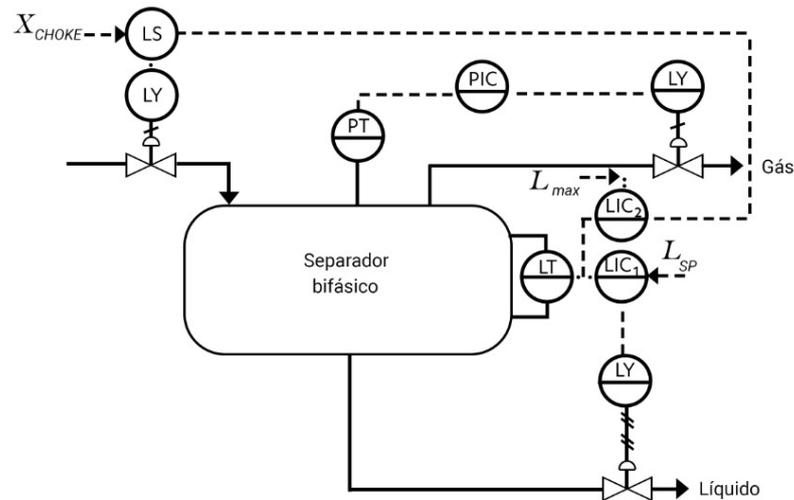


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Veja que normalmente o controle de vazão é realizado pelo FIC, mas no caso acima a malha multivariada gera condições desse FIC ser influenciado pelo LIC e PICs a partir de um limite estabelecido para operação das variáveis.

Esquema parecido com esse é exposto de forma mais detalhada por Nunes (2010, p. 228) na figura abaixo.

Figura 49 – Controle override de nível de vaso separador pela vazão.



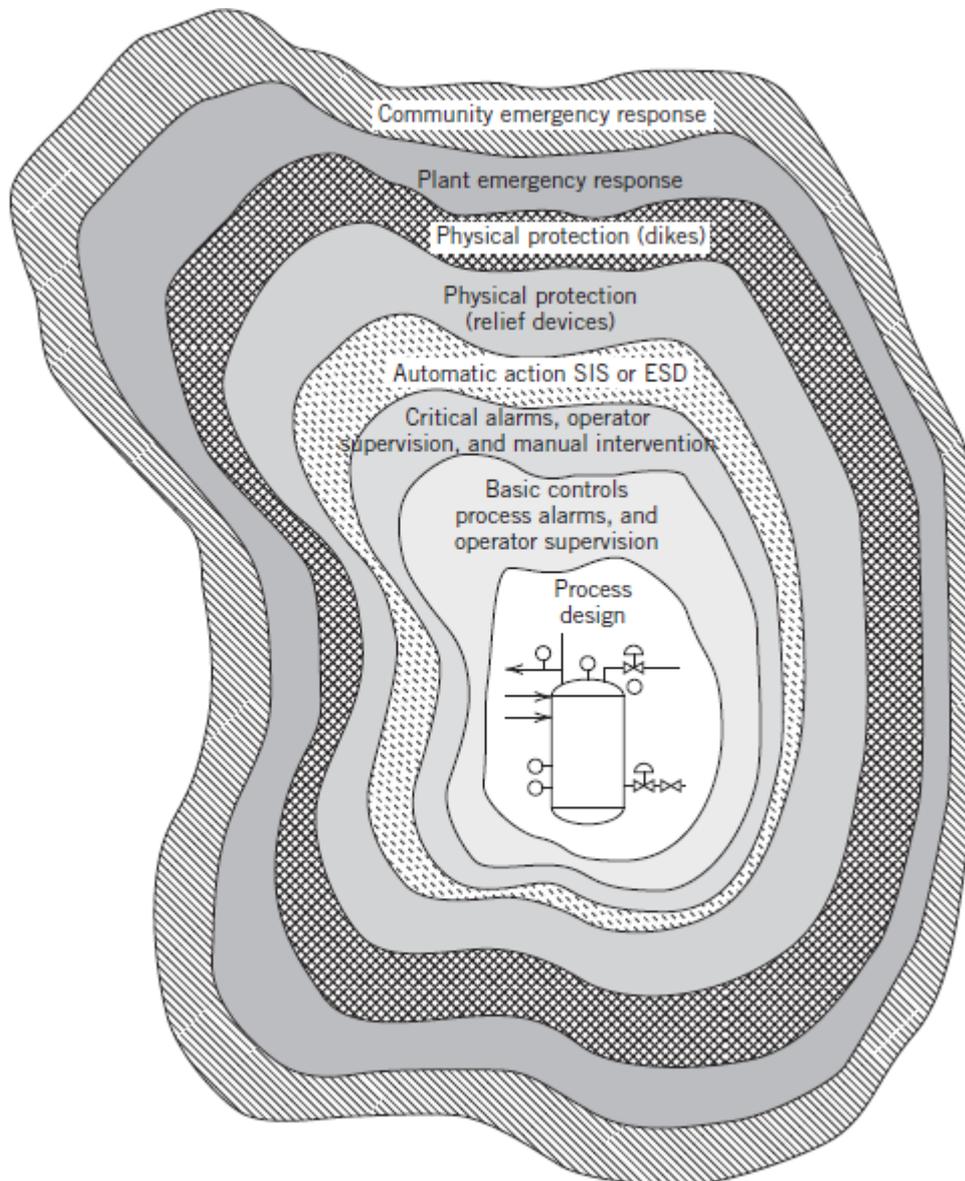
Fonte: Adaptado de Nunes, 2010.

Nesse caso a lógica é ter um controle de nível máximo (LIC₂) em stand-by, que ao ser acionado pela elevação do nível acima do seu SP, gera um sinal para acionamento da LS que aciona a LY para redução da vazão e consequente saída do equipamento da condição de nível alto a partir do funcionamento do LIC₁.

A mesma lógica pode ser usada para ganho de produção, ao fazermos a lógica inversa, ou seja, caso o nível ficar menor que o de referência pode-se enviar uma resposta, geralmente puramente proporcional, ao controlador via sistema especialista e, com isso, ele aumentará a vazão de produção via ajuste de setpoint. Essa estratégia vai ser muito abordada no item de controle override e plantwide desse trabalho e, por isso, se justifica a importância do método.

Vale salientar que ao fazer as afirmações acima se está trabalhando com controle multivariado ou MIMO (multiple inputs, multiple outputs) em detrimento do controle convencional por SISO (single input, single output). Além disso, esse tipo de controle pode atuar como integrante do SIS (Sistema Instrumentado de Segurança) ao atuar abrindo e fechando válvulas para manutenção da segurança da planta, como suporte ao sistema de alarmes ao ativar a função de alarme para quando forem alcançados limites pré-estabelecidos e da forma multivariada de controle, conforme apresentado anteriormente. Abaixo, pode-se ver a representação das camadas de proteção de uma planta industrial, onde pode-se localizar as etapas aqui mencionadas.

Figura 50 – camadas de proteção de uma planta industrial.



Fonte: Seborg (2016).

Além disso, o controle override conforme citamos, já trouxe outros ganhos na indústria, como, por exemplo, o citado por Duarte (2020, p. 2) ao falar que “neste artigo é apresentada a diferença de produtividade obtida ao trocar uma solução de controle de sistema especialista por uma solução de controle de PI em override”. Ele também fala que,

o controlador em override proposto apresentou melhor aproveitamento da capacidade das correias transportadoras nas simulações, aumentando inclusive a taxa de produção e levando a alterações mais suaves nas taxas medidas em cada uma das correias (DUARTE, 2020, p. 6).

Outra boa referência nesse assunto é Forsman (2016) que traz em seu trabalho o ganho ao usar a estratégia acima junto ao controle plantwide, também prerrogativa desse trabalho, chegando a analisar várias estruturas de controle override diferentes a fim de encontrar a que traz a maior estabilidade.

2.7 GAIN SCHEDULING CONTROL (GSC)

O gain scheduling control ou controle de escalonamento do ganho é o controle baseado na alteração da constante proporcional do controlador a partir de alguma função de inferência ou correlação criada para isso, geralmente procurando manter o ganho proporcional a perturbação sentida. Quando se deseja que o controlador se adapte a diversas formas de operação, a processos muito lentos, processos muito rápidos ou a grandes variações da variável medida ou do setpoint desejado, precisa-se reparametrizar as constantes do PID para um bom desempenho do controlador.

De Medeiros (2021) fez um estudo detalhado desse tipo de controle mostrando ganhos de desempenhos expressivos. Ele aplicou a técnica a um vaso separador, também da indústria do petróleo, apresentando toda a análise e informações que encontrou durante suas simulações de forma a trazer uma estabilidade bem melhor para o processo. De Medeiros (2021, p. 1) ainda cita que:

Por simulação do modelo não linear, foi possível confirmar, através de índices de qualidade, melhor desempenho do controlador GSC comparado a um controlador PI convencional tanto para o problema servo quanto para o problema regulatório com redução de até 17,65% no índice IAE, 29,88% no índice ISE, 16,38% no índice ITAE, 29,00% no índice ITSE e 13,20 % no esforço de controle (CE).

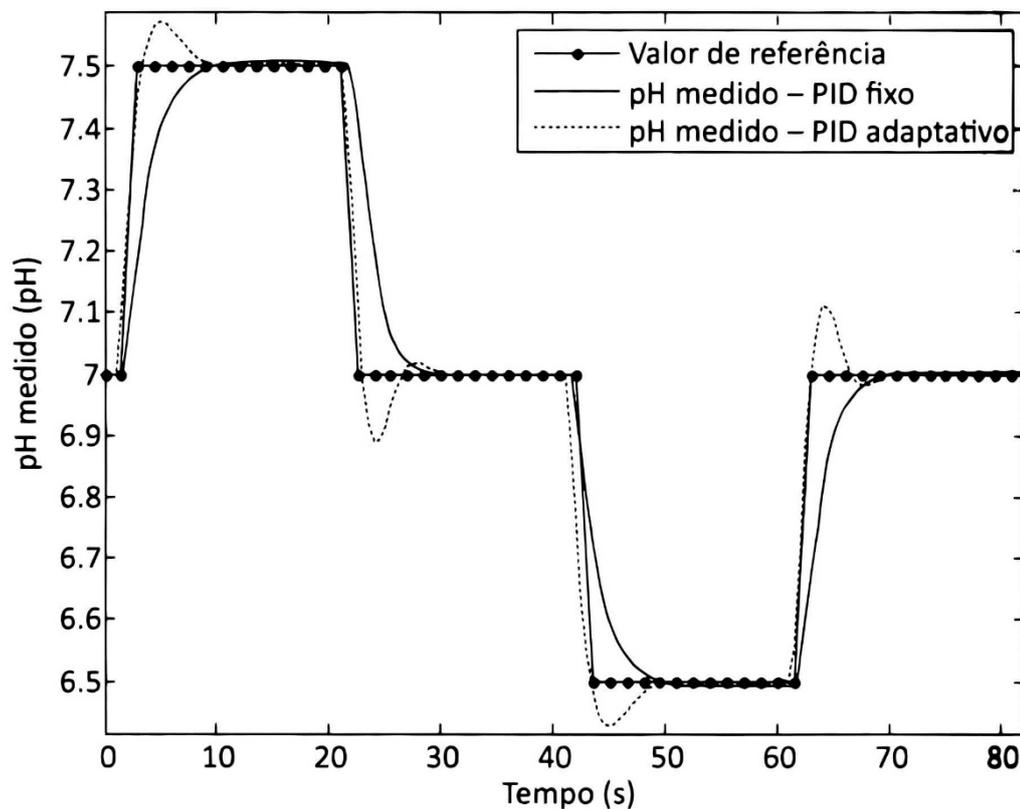
Vale salientar que, segundo Garcia (2019), mesmo com estratégias adaptativas, alguns problemas operacionais podem levar a problemas de sintonia/estabilidade, como: formação de incrustações em função do tempo, perturbações frequentes de grande magnitude, variações ambientes marcantes não considerados na elaboração do modelo inicial, etc.

Além disso, deve-se ver qual estratégia de adaptação utilizar, pois pode-se usar um controle adaptativo com adaptação programada, o qual ajusta os parâmetros do controlador de forma sistemática a partir da predição das mudanças possíveis de ocorrer e o controle adaptativo autoadaptativo ou autoajustável que utiliza uma estratégia de realimentação do modelo de ajuste das constantes do controlador a fim de realizar uma sintonia a variações não previstas. Pode-se verificar que, como no caso em estudo, não é esperada a mudança não prevista das variáveis,

pois a alimentação, entre outros fatores, são controlados, então estima-se usar o modelo de controle adaptativo programado a partir de correlações. Sendo que isso só é utilizado para o caso de instabilidade do controle para quando for alterado o setpoint ou em caso de avaliação de alguma perturbação.

Garcia (2019) traz um gráfico comparativo entre essa técnica e o controle convencional para um processo de medição de pH, conforme demonstrado abaixo:

Figura 51 – Diferença entre controle fixo e adaptativo para o exemplo.



Fonte: Garcia, 2019.

2.8 CONTROLE PLANTWIDE

O controle de uma planta industrial inteira pode ser analisada malha a malha ou a partir da análise do conjunto de malhas que o fazem. Como esse conjunto de malhas de controle pode interagir entre si e quais configurações podem ser utilizadas para propor uma estratégia de controle conjunta melhor que a da operação das malhas individuais em um sistema multivariável, se está falando de controle plantwide, (SEBORG *et al.*, 2016). Várias são as formas de organizar o arranjo de controle a fim de obter uma configuração ótima. Luyben (2002) traz diversos pontos que devem ser analisados como a razão de reciclo, o controle

override e a amplitude das variações, sendo que o projeto é um fator importante e que viabiliza a análise dos arranjos necessários a otimização. Segue um resumo dos tipos de metodologia de controle plantwide já desenvolvidos na literatura e citado por Muñoz (2018, p. 2):

Tabela 07: Metodologias de controle plantwide.

Tipo Abordagem	Principais características	Referências
Híbrida	Nesta metodologia de controle auto-otimizável, o projeto do sistema de controle é dividido em três camadas com base na escala de tempo: otimização local, controle de supervisão e controle regulatório.	Skogestad; Skogestad; Skogestad [2, 3, 4].
Híbrida	O problema de seleção de estrutura de controle é formulado como um problema de <i>Mixed-Integer Linear Programming (MILP)</i> empregando coeficientes de custo.	Jørgensen and Jørgensen [5]
Otimização	Estratégia híbrida integrando <i>Model Predictive Control (MPC)</i> linear e não linear.	Zhu et al. [6].
Análítica	Combinação de análise de controlabilidade de estado estacionário e para avaliar o inventário dinâmico de impurezas.	Groenendijk et al. [7]
Híbrida	Projeto de um sistema PWC descentralizado usando uma abordagem otimizada baseada em controle.	Robinson et al. [8].
Híbrida	Problema de programação inteira não linear mista para minimizar a interação geral e a sensibilidade do sistema em malha fechada à perturbações.	Kookos and Perkins [9]
Híbrida	Problema de MILP em cada um dos três estágios da síntese do sistema de controle: controle de segurança, produção e variáveis de processo remanescentes.	Wang and McAvoy [10]
Híbrida	Este método hierárquico foi baseado em modelos de processo dinâmicos lineares e controladores ótimos de realimentação de saída estática. Mais tarde, Chen et al. [11] aplicou o modelo no processo com múltiplos estados estacionários.	Chen and McAvoy; Chen et al. [12, 11].
Híbrida	Abordagem baseada em decisão, onde a planta é decomposta em módulos menores usando um processo hierárquico analítico modificado.	Vasbinder and Hoo [13].
Análítica	Este é um algoritmo melhorado e mais eficiente do método <i>Branch and Bound (BAB)</i> para triagem de estruturas de controle. Posteriormente, Cao and Kariwala apresentaram um algoritmo BAB bidirecional para manuseio eficiente de processos em larga escala.	Cao and Saha; Cao and Kariwala [15, 14].
Heurística	Estrutura integrada de simulação e heurística, que usa simulação de estado estacionário e dinâmica para tomar ou apoiar as decisões tomadas pela heurística.	Konda et al. [16].
Híbrida	Procedimento de projeto de controlador integrado com controle auto-otimizável com análise de perturbação singular.	Baldea et al. [17]

Fonte: Muñoz, 2018.

Já Hori (2005) traz em sua obra um quadro resumo com o procedimento proposto por Skogestad (2004) para execução do PWC clássico.

A metodologia proposta abaixo faz uma análise geral das condições conhecidas para projeto de malha de controle e foi utilizada como base por diversos autores para o desenvolvimento de suas metodologias de trabalho.

Tabela 08: Metodologia para projeto de controle plantwide - Skogestad (2004).

Etapa	Comentários, análise de ferramentas e modelos requeridos
(I) Análise descendente ("top-down")	
1. Definição dos objetivos operacionais Identificar restrições operacionais e identificar preferencialmente uma função-custo escalar J a ser minimizada.	
2. Variáveis manipuladas e graus de liberdade Identificar os graus de liberdade estacionários e dinâmicos	Podem necessitar equipamentos extras se a análise mostrar que há poucos graus de liberdade.
3. Variáveis controladas primárias Quais variáveis (primárias) c dever-se-ia controlar? - controlar restrições ativas - Graus de liberdade remanescentes: controlar variáveis cujos "set points" constantes resultem em baixa perda (econômica) quando ocorrerem distúrbios	Análise econômica em estado estacionário: - Definição de custo e restrições - Otimização dos graus de liberdade estacionários para vários distúrbios (fornece as restrições ativas) - Avaliação da perda com "set points" constantes
4. Vazão de produto Onde a vazão de produto deveria ser ajustada? (escolha muito importante pois esta determina a estrutura do sistema de controle de inventário remanescente).	A localização ótima segue da otimização estacionária (etapa 3), mas pode modificar dependendo das condições de operação.
(II) Projeto ascendente ("bottom-up") (com variáveis controladas e manipuladas dadas)	
5. Camada de controle regulatório 5.1. Estabilização 5.2. Rejeição local de distúrbio Propósito: "Estabilizar" a planta usando controladores de "baixa" complexidade (controladores PID de malha simples) tais que: 1- a planta não se desvie muito de seu ponto de operação nominal 2- a camada supervisória (ou os operadores) pode lidar com o efeito dos distúrbios nas saídas primárias ($y_1 = c$) Principal problema estrutural: O que mais (y_2) se deveria controlar? - Selecionar variáveis controladas secundárias (medidas) y_2 Pareá-las com variáveis manipuladas m , evitando m 's que saturem (atingam restrições)	5.1. Análise de vetores de pólo (Havre e Skogestad, 1998) para selecionar variáveis medidas e entradas manipuladas para controle estabilizante. 5.2. Análise de planta parcialmente controladas: controlar medidas secundárias (y_2) de forma que a sensibilidade dos estados (x) aos distúrbios seja pequena em frequências intermediárias. Modelo: Modelo dinâmico linear multivariável. Estado estacionário geralmente sem importância
6. Camada de controle supervisório Propósito: Manter as saídas (primárias) controladas $y_1 = c$ em seus "set points" ótimos usando, como graus de liberdade (entradas), os "set points" y_{2i} para a camada de controle regulatório e quaisquer variáveis manipuladas não-usadas. Principal problema estrutural: Controle centralizado ou descentralizado? 6a. Controle descentralizado (malha simples) Possivelmente com adição de "feed-forward" e controle de razão ("ratio") - Pode usar controladores PI ou PID simples - Problema estrutural: escolher o pareamento de entradas e saídas 6b. Controle multivariável Usualmente com tratamento explícito de restrições (MPC) Problema estrutural: Tamanho de cada aplicação multivariável	6a. Controle descentralizado: Preferido para processos não-iterativos e casos em que as restrições ativas permanecem constantes Análise de pareamento: Parear com RGA próximo à matriz identidade na frequência de "crossover", desde que não seja negativo no estado estacionário. Use CLDG para uma análise mais detalhada 6b. Controle multivariável: 1- usar para processos iterativos e para fácil tratamento de controle "feedforward" 2- usar MPC com tratamento de restrições para mover suavemente durante a mudança de restrições ativas (evita a lógica necessária no esquema descentralizado 5a) Modelo: Veja item 5
7. Camada de otimização Propósito: Identificar restrições ativas e computar "set points" ótimos c_i para variáveis controladas Principal problema estrutural: É necessário otimização em tempo real?	Modelo: Modelo não-linear em estado estacionário mais custos e restrições
8. Validação	Simulação dinâmica não-linear de partes críticas

Fonte: Hori (2005).

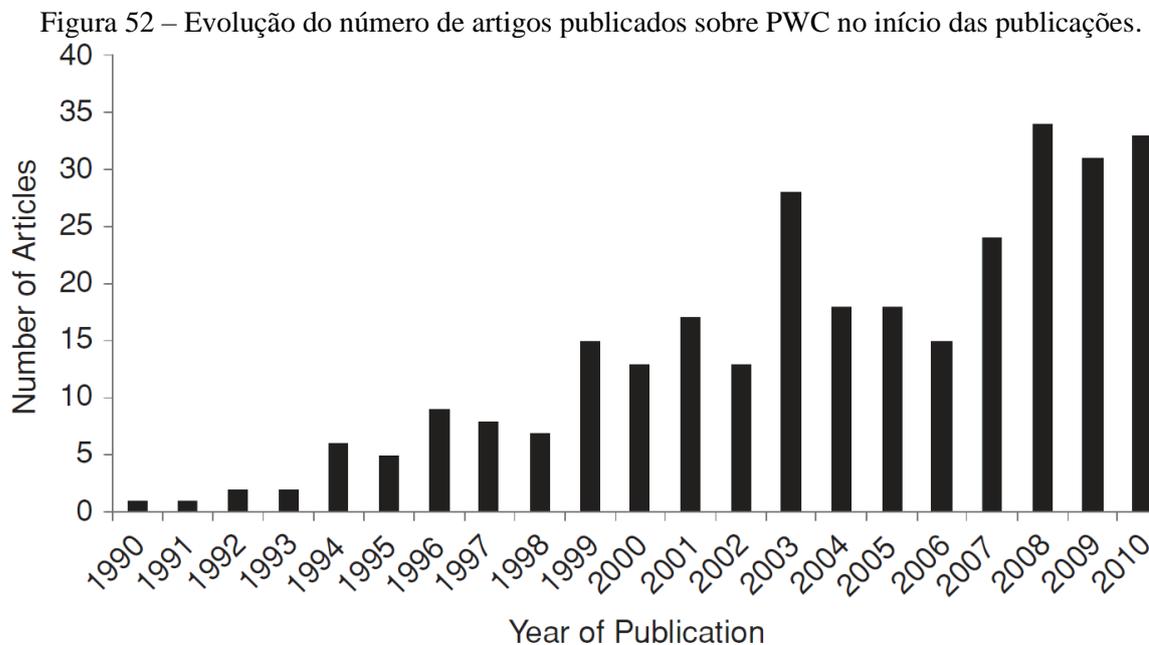
Um conceito importante introduzido por Seborg (2016) e muito utilizado quando se fala de PWC é o de sensibilidade. Ao avaliar quanto uma variável de saída, y_i , em um determinado estado estacionário (\bar{x}, \bar{y}) varia para uma perturbação em uma variável de entrada x_j , é utilizada a expressão abaixo.

$$\left. \frac{\partial(y_i/\bar{y})}{\partial(x_j/\bar{x})} \right|_S = \left. \frac{\partial y_i}{\partial x_j} \right|_S \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}} \right)$$

(5)

Com isso, verifica-se qual vai ser a influência causada nas variáveis a partir de uma perturbação na variável de entrada para com as variáveis de interesse e para o resultado da função objetivo, assim pode-se avaliar condições como estabilidade e resultado da situação projetada.

Vale salientar que PWC é uma tecnologia moderna e por isso carece de muito estudo. Godoy (2017) propõe um modelo de PWC baseado em otimização de processo e ainda apresenta a evolução na publicação de artigos sobre PWC desde quando se iniciou o estudo da tecnologia pela comunidade científica, conforme pode ser observado abaixo.



Fonte: Godoy, 2017.

2.9 AUTORIZAÇÃO DA EMPRESA

A empresa detentora da plataforma em análise nesse estudo é a Petrobras S.A., fundada em 3 de outubro de 1953, impulsionada pela lei do petróleo e que, em 2014, chegou a ser a maior empresa da América Latina em valor de mercado (EXAME, 2014).

Segundo Chaves (2018), a Petrobras é considerada uma empresa integrada de energia, que fundou em 1961 a Reduc (Refinaria Duque de Caxias) no Rio de Janeiro, em 1963, o Cenpes (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento), que hoje é um dos centros de pesquisas técnicas mais importantes do mundo e, em 1968, foi construída a primeira plataforma auto-elevatória - a P-I, sendo responsável pela primeira descoberta de petróleo no mar do Brasil, mais precisamente em Sergipe (TODA MATERIA, 2018).

Do site da Petrobras (2018), na aba de estratégia, a empresa definiu um Plano de Negócios e Gestão para o quadriênio 2018-2022 que tem como base duas métricas principais, uma de segurança, que visa ter o menor número de acidentes registrados com o comparativo com seus pares, e outra financeira, que visa a redução do seu endividamento e apresenta a seguinte visão de ser: “Uma empresa integrada de energia com foco em óleo e gás que evolui com a sociedade, gera alto valor e tem capacidade técnica única”. Os últimos resultados da companhia (PETROBRAS, 2021), apontam que essas metas já foram superadas.

A empresa tem como principal cliente o mercado interno brasileiro de consumo de petróleo e derivados, vindo a exportar petróleo cru, óleo combustível, combustível para navios e óleo diesel para outros países (FATOS E DADOS, 2018).

O presente estudo se deu em uma das plataformas do tipo FPSO da companhia que hoje opera no campo de búzios explorando o pré-sal brasileiro a partir de poços localizados em águas ultra profundas. O estudo foi autorizado pelos gestores imediatos da plataforma em análise, pelos engenheiros responsáveis e pela cadeira de gestores da unidade operacional de Sergipe.

A unidade em análise tem capacidade de processar até 28.600 m³/d de líquido e para comprimir até 7.000.000 Sm³/d de gás, sendo que pode exportar até 24.000 m³/d de óleo, tratar 24.000 m³/d de água produzida e injetar até 31.800 m³/d de água.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MODELAGEM DO TRATAMENTO DE ÓLEO

Para realizar a simulação proposta é necessário que se conheça como ocorrem as transformações da matéria em cada estágio do processamento. Para isso se utiliza de modelos matemáticos não lineares de parâmetros concentrados a fim de viabilizar a análise do comportamento transiente do processo para avaliação da implantação das técnicas de controle propostas. Neto *et al.* (2019, p. 13) descreve que “um modelo matemático é um exemplo do uso da modelagem simbólica que descreve um sistema por meio de símbolos e de equações”. Ainda afirma que “a modelagem é uma representação de um sistema em diversas áreas da engenharia e a simulação é a resposta temporal do processo modelado”, corroborando com o explicado acima pelo autor.

Já Nunes (2010) define equações de balanço como as que descrevem o comportamento do processo a partir de leis que regem os fenômenos físicos e químicos e chama essa modelagem de fenomenológica. Também define que podem ser utilizadas equações empíricas construídas a partir de dados experimentais ou correlações, sendo essa a forma de modelar chamada de identificação de processos.

Nas simulações realizadas foram utilizados os dois tipos de modelagem, já que o importante é a representação do processo da forma mais fiel possível e não a sua origem de modelagem. Além disso, foram utilizados modelos não lineares para melhor representação do comportamento do processo e de parâmetros concentrados para se ter a visão homogênea do sistema.

3.1.1 Modelagem do separador bifásico

Como o processo se inicia pelo separador gravitacional, temos o seguinte balanço de massa/volume:

$$\frac{\text{Acúmulo de } L}{\text{tempo}} = \frac{\text{Entrada de } L}{\text{tempo}} - \frac{\text{Saída de } L}{\text{tempo}} + \frac{\text{Geração de } L}{\text{tempo}} - \frac{\text{Consumo de } L}{\text{tempo}} \quad (6)$$

Onde L representa o elemento em análise, que pode estar na unidade de kg ou outra unidade de massa, e o tempo em segundos, minutos ou outra unidade de tempo.

Fazendo a interpretação de cada termo da equação acima para o balanço de massa de óleo no SG, encontra-se:

$$\frac{\text{Acúmulo de } L}{\text{tempo}} = \frac{dM_L(t)}{dt} = \rho_L \frac{dV_L(t)}{dt} \quad (7)$$

Sendo $V_L(t)$ o volume de líquido no vaso (m^3) em função do tempo, ρ_L a massa específica do líquido (kg/m^3) e $M_L(t)$, a massa de líquido que entra no SG (kg) em função do tempo. Pode-se verificar que a massa específica foi considerada constante, pois o líquido é considerado incompressível para as pressões e temperaturas do sistema em análise. Para o termo de entrada de líquido, pode-se chamá-lo de $M_{in}(t)$ (kg/s), para a saída de líquido tem-se o $M_{out}(t)$ (kg/s), para o termo de geração e consumo considera-se 0 (zero), pois não temos reação química e nem decomposição de produtos, enfim, chegando a:

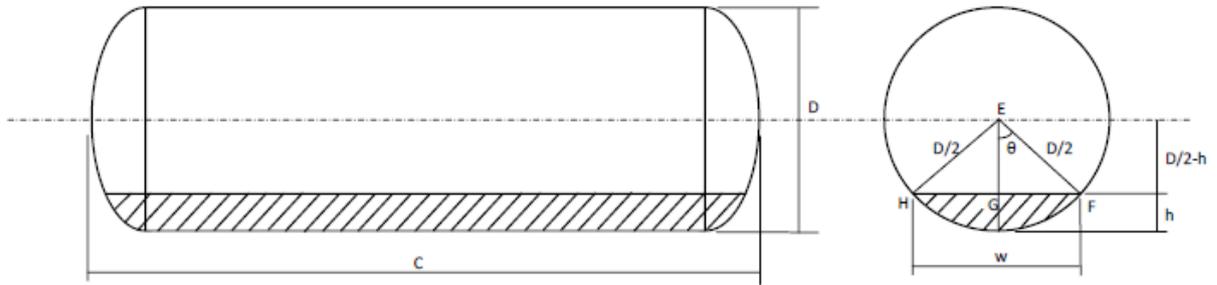
$$\rho_L \frac{dV_L(t)}{dt} = M_{in}(t) - M_{out}(t) \quad (8)$$

Sabe-se que o volume de líquido presente no vaso tem relação com sua geometria e seu tempo de residência, para isso foi desenvolvida uma equação característica para definição do volume, deduzida no seu apêndice 1 – Relações Geométricas de Vasos Horizontais na obra de Nunes (2010, p. 385), com C e D em metros, conforme exposto abaixo, e que pode ser interpretado como a equação que mostra como o volume de líquido dentro do vaso varia em função da altura de interface da mistura e das dimensões do equipamento.

$$V_L(t) = \frac{CD^2}{4} \left[\arccos \left[\frac{D-2h_L(t)}{D} \right] - \left[2 \frac{\sqrt{(D-h_L(t))h_L(t)}}{D} \right] \left[\frac{D-2h_L(t)}{D} \right] \right] \quad (9)$$

Abaixo é mostrado como as dimensões estão dispostas no equipamento de acordo com o modelo criado para representação do volume do equipamento desenvolvido por Nunes (2010) e corroborado por De Medeiros (2021). As unidades são em metros e pode ser visto o perfil frontal e radial na figura abaixo.

Figura 53 – Dimensões típicas de separadores.



Fonte: De Medeiros, 2021.

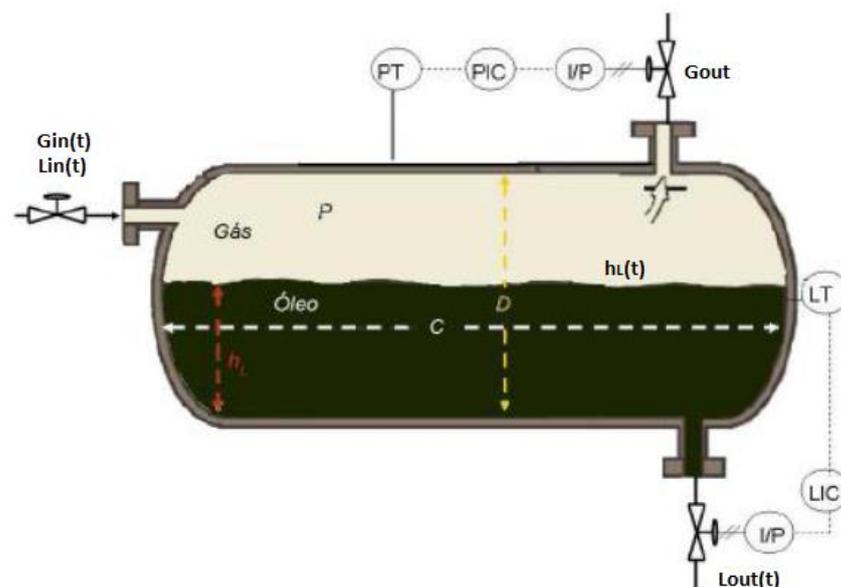
Onde, em caso de derivação da equação (9) em função do tempo, obtém-se a equação (10) abaixo, conforme descrito em Nunes (2010).

$$\frac{dV_L(t)}{dt} = 2C\sqrt{(D - h_L(t))h_L(t)} \frac{dh_L(t)}{dt} \quad (10)$$

Aplicando a equação (10) na equação de balanço e isolando a altura da interface, chega-se a:

$$\frac{dh_L(t)}{dt} = \frac{L_{in}(t) - L_{out}(t)}{2C\sqrt{[D - h_L(t)]h_L(t)}} \quad (11)$$

Figura 54 – Esquema das variáveis deduzidas no desenho do equipamento.



Fonte: Silva, 2013.

Onde:

$V_L(t)$: Volume de líquido no vaso (m^3);

ρ_L : Massa específica do líquido (kg/m^3);

$L_{in}(t)$: Vazão volumétrica de líquido de entrada no vaso (m^3/s);

$L_{out}(t)$: Vazão volumétrica de líquido de saída no vaso (m^3/s);

$h_L(t)$: Altura do líquido da base até a interface (m);

$M_{in}(t)$: Vazão mássica de entrada de líquido (kg/s);

$M_{out}(t)$: Vazão mássica de saída de líquido (kg/s);

C: Comprimento do separador (m);

D: Diâmetro do separador (m).

Pode-se notar que nessa dedução não foi considerado a altura da interface de líquido que separa a câmara de água da de óleo pelo vertedouro, pois no presente momento o vaso opera como bifásico e não trifásico pela baixa quantidade de água hoje produzida pelos poços, logo, se pode desprezá-la.

Dado o balanço de líquido, agora pode-se desenvolver o de gás, partindo do mesmo princípio utilizado acima para o óleo por balanço de massa:

$$\frac{\text{Acúmulo de } G}{\text{tempo}} = \frac{dM_G(t)}{dt} = \frac{d(V_G(t)\rho_G(t))}{dt} \quad (12)$$

Para o termo de geração e consumo, considera-se 0 (zero), pois não se tem reação química e nem decomposição de produtos, e fazendo a mesma analógica que se fez para o óleo, agora já representado em condições volumétricas, com $G_{in}(t)$ e $G_{out}(t)$ em m^3/s , chega-se a:

$$\frac{dM_G(t)}{dt} = (G_{in}(t) - G_{out}(t))\rho_G(t) \quad (13)$$

Como nesse caso não se pode considerar o gás incompressível, logo, faz-se a derivada de forma a utilizar a regra da cadeia:

$$\frac{d(V_G(t)\rho_G)}{dt} = \frac{\rho_G(t)d(V_G(t))}{dt} + \frac{V_G(t)d(\rho_G(t))}{dt} \quad (14)$$

Como se tem que:

$$\rho_G(t) = \frac{P(t)MM}{ZRT} \quad (15)$$

Então:

$$\frac{d(V_G(t)\rho_G)}{dt} = \frac{MM}{ZRT} \left(\frac{P(t)d(V_G(t))}{dt} + \frac{V_G(t)d(P(t))}{dt} \right) \quad (16)$$

Como $V(t) = V_G(t) + V_L(t)$, logo, $dV_G(t) = V(t) - V_L(t)$, com $V(t) = 0$, já que o volume total do vaso não varia com o tempo, fica-se com:

$$\frac{dV_G(t)}{dt} = -\frac{dV_L(t)}{dt} = -(L_{in}(t) - L_{out}(t)) \quad (17)$$

$$(G_{in}(t) - G_{out}(t))\rho_G(t) = \frac{\rho_G(t)}{P(t)} \left(\frac{V_G(t)d(P(t))}{dt} - P(t)(L_{in}(t) - L_{out}(t)) \right) \quad (18)$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{P(t)(G_{in}(t) - G_{out}(t) + L_{in}(t) - L_{out}(t))}{V_G(t)} \quad (19)$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{P(t)(G_{in}(t) - G_{out}(t) + L_{in}(t) - L_{out}(t))}{V - V_L(t)} \quad (20)$$

Onde:

$V_L(t)$: Volume de líquido no vaso (m^3);

$V(t)$: Volume total do vaso (m^3);

ρ_G : Massa específica do gás (kg/m^3);

$L_{in}(t)$: Vazão volumétrica de líquido de entrada no vaso (m^3/s);

$L_{out}(t)$: Vazão volumétrica de líquido de saída no vaso (m^3/s);

$G_{in}(t)$: Volume de gás de entrada no vaso (m^3/s);

$G_{out}(t)$: Volume de gás de saída no vaso (m^3/s);

$P(t)$: Pressão do vaso (bar);

$M_G(t)$: Massa de gás acumulado (kg).

O tempo de residência é representado pela equação abaixo:

$$T_{RL}(t) = \frac{V - V_G(t)}{L_{out}(t)} \quad (21)$$

Com a dedução das equações de nível de líquido e pressão de operação acima, agora pode-se avaliar o equacionamento da vazão de líquido e gás do sistema.

Segundo Bega (2011), aplicando a equação de Bernoulli em um medidor ou válvula, considerando que o mesmo está na mesma cota na sua entrada e saída, obtém-se:

$$\frac{(V_1)^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{(V_2)^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} \quad (22)$$

Agora, considerando a vazão de entrada função da abertura da válvula e coeficiente de vazão da sede, considerando a velocidade em função da vazão e aplicando na equação (22) e isolando-a, chega-se a:

$$L_{out} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot C_v f(x) \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho_L / \rho_w}} \quad (23)$$

Com C_v igual a uma constante chamada de coeficiente de vazão que depende da construção da válvula e o $f(x)$, que é chamado de característica inerente da válvula, dependente da abertura da válvula (x_v) e a geometria do seu obturador/sede. Pode-se verificar abaixo alguns tipos de $f(x)$:

Tabela 09: Tipos de característica inerente de válvulas.

Tipos de $f(x)$	Fórmula
Raiz Quadrada	$\sqrt{x_v}$
Linear	x_v
Igual porcentagem	$R^{(x_v-1)}$
Hiperbólica	$\frac{1}{R - (R - 1)x_v}$
Abertura rápida	e^{x_v}

Cada processo tem seu tipo de válvula e com isso seu $f(x)$. Existe uma fórmula empírica para ver qual situação acima é a mais adequada. Abaixo verifica-se que a variação de pressão em um trecho de duto é proporcional a vazão de operação ao quadrado vezes uma constante, onde, segundo Nunes (2010), pode-se representar isso por:

$$\Delta P_v = \Delta P_{v,max} - kL_{in}^2 \quad (24)$$

$$\Delta P_{v,min} = \Delta P_{v,max} - kL_{max}^2 \quad (25)$$

Manipulando as equações acima, chega-se em:

$$\frac{L_{in}^2}{L_{max}^2} = \frac{\Delta P_{v,max} - \Delta P_v}{\Delta P_{v,max} - \Delta P_{v,min}} \quad (26)$$

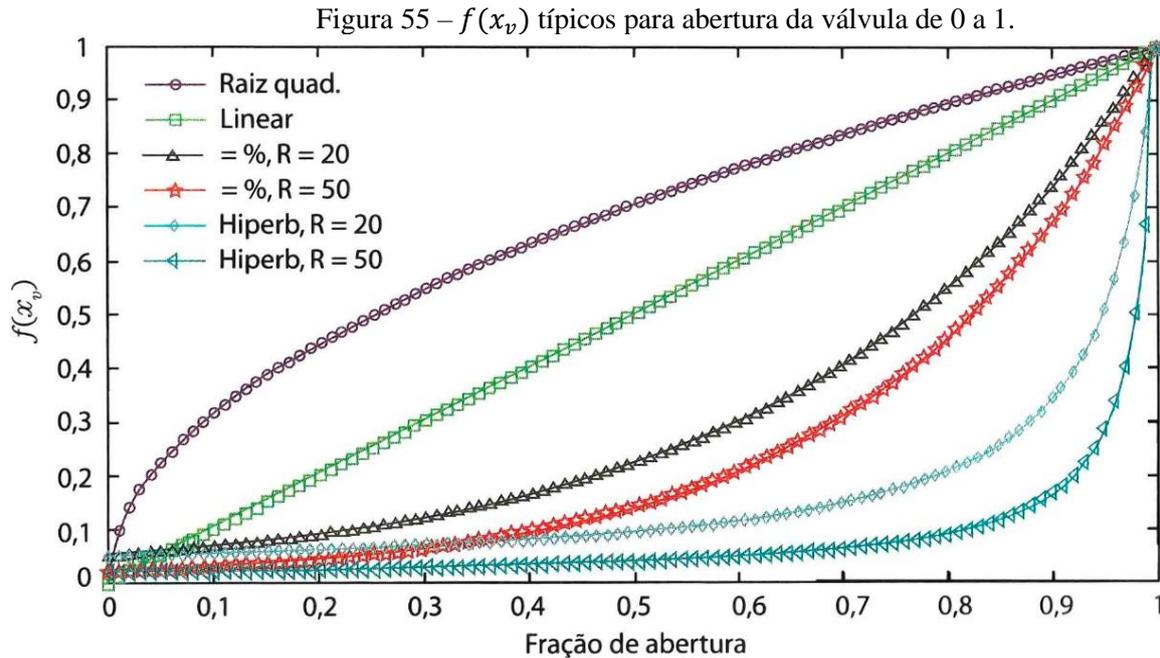
Com a fórmula genérica de vazão em uma válvula apresentado como equação (23), aplicando as condições para vazão máxima, chega-se a:

$$L_{max} = C_v f(x_v) \sqrt{\frac{\Delta P_{v,min}}{\rho_g / \rho_w}} \quad (27)$$

Combinando a equação (26) com a equação (27), obtém-se a função abaixo que pode ser usada com os dados reais de pressão e abertura advindas do processo para ver qual o viés da válvula de acordo com as respostas do $f(x_v)$:

$$f(x_v) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{x_v^2} - 1\right) \frac{\Delta P_{v,min}}{\Delta P_{v,max}}}} \quad (28)$$

Com os resultados da aplicação da equação (28) pode-se encontrar qual função de característica inerente de válvula, mostrado na figura abaixo, mais se aproxima a curva empírica encontrada e, com isso, escolher que perfil de $f(x_v)$ a ser usado na simulação e para representar o processo, quando necessário. Vale salientar que as curvas abaixo mudam de acordo com a reologia dos fluidos, porém pode-se aproximar o seu uso caso tenha boa correlação com os dados experimentais encontrados com o equacionamento proposto.



Considerando a água incompressível como o óleo, então se tem a mesma fórmula para o cálculo de sua vazão, apenas diferenciando os índices:

$$W_{out} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot C_v f(x) \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho_{wp} / \rho_w}} \quad (29)$$

Já para o gás é preciso considerar a sua compressibilidade e, com isso, as relações mudam. Para isso, pode-se usar o estudo de determinação de vazão em medidores deprimogênicos, definidos por Bega (2011).

Bega (2011) traz o fator de expansão isentrópico do gás, que mede seu fator de compressibilidade para o caso, descrito por:

$$\varepsilon = 1 - \left[(0,41 + 0,35\beta^4) \left(\frac{\Delta P}{Pk} \right) \right] \quad (30)$$

Sendo ε o fator de expansão isentrópica, o β dependente da abertura (d/D) e o k o expoente isentrópico. Combinando as equações acima com a dedução de Bernoulli, chega-se a seguinte equação de vazão para o gás, aplicando no que foi exposto em Silva (2013):

$$G_{out} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot C_v f(x) \beta \varepsilon P(t) \sqrt{\frac{(P(t)-P_2)}{P(t) Z T \left(\frac{\rho_g}{\rho_{ar}} \right)}} \quad (31)$$

Com isso, já se tem os modelos para vazão de saída de líquido e gás, pressão de operação e nível, deixando, assim, o separador com a modelagem completa.

3.1.2 Modelagem dos separadores eletrostáticos

Já os desgaseificadores e os tratadores eletrostáticos têm modelagem semelhante ao do separador bifásico, porém com a adição da eficiência do processo eletrostático e do BSW (Basic Sediment and water) de separação para os tratadores.

Nessa fase é incluída a eficiência de separação, assim como destaca Nunes (2010, p. 275), que representa o quanto de água foi retirada pelo processo de separação para aquela condição imposta:

$$\epsilon(t) = \frac{\text{Vazão de água descartada pelo tratador}}{\text{Vazão de água na entrada do tratador}} = \frac{W_{out}(t)}{L_{out1}(t) BSW_{in}(t)} \quad (32)$$

$$BSW_{out}(t) = BSW_{in}(t) + a T_{RL}^b(t) \quad (33)$$

$$T_{RL}(t) = \frac{V - V_W(t)}{L_{out2}(t)} \quad (34)$$

Vale salientar que as variáveis acima têm unidades e significados, conforme já mostrado na seção dos separadores bifásicos, sendo apenas substituídos os índices referentes a nova situação, o que pode ser visto na figura 56 abaixo, onde cada variável se encontra nos equipamentos.

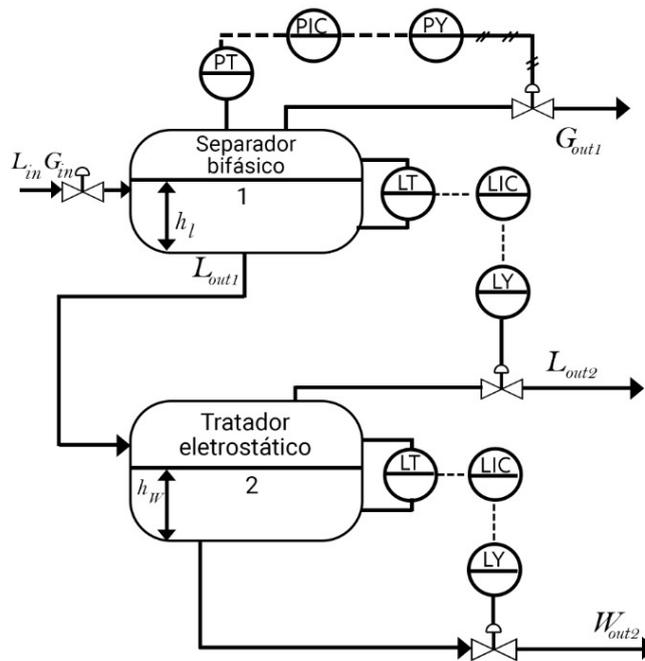
Quando se avalia o separador eletrostático como sendo um separador líquido-gás se tem as mesmas fórmulas já deduzidas para o bifásico, e ele é chamado de desgaseificador, já para os tratadores do tipo óleo-água, inclui-se a eficiência de separação associado ao BSW de separação:

$$L_{out1}(t) = L_{out2}(t) + W_{out}(t) \quad (35)$$

$$C_1 D_1 \frac{dh_L(t)}{dt} = L_{in}(t) - L_{out2}(t) - W_{out}(t) \quad (36)$$

$$\frac{dh_W(t)}{dt} = \frac{L_{out1}(t) BSW \varepsilon(t) - W_{out}(t)}{2 C_2 \sqrt{[D_2 - h_W(t)] h_W(t)}} \quad (37)$$

Figura 56 – Esquema de separação por tratamento eletrostático.



Fonte: Nunes, 2010.

As relações geométricas são iguais ao deduzido anteriormente, agora a diferindo entre a interface de óleo e a de água:

$$V_W(t) = \frac{C_2 D_2^2}{4} \left[\arccos \left[\frac{D_2 - 2h_W(t)}{D_2} \right] - \left[2 \frac{\sqrt{(D_2 - h_W(t)) h_W(t)}}{D_2} \right] \left[\frac{D_2 - 2h_W(t)}{D_2} \right] \right] \quad (38)$$

$$V_L(t) = \frac{C_1 D_1^2}{4} \left[\arccos \left[\frac{D_1 - 2h_L(t)}{D_1} \right] - \left[2 \frac{\sqrt{(D_1 - h_L(t)) h_L(t)}}{D_1} \right] \left[\frac{D_1 - 2h_L(t)}{D_1} \right] \right] \quad (39)$$

Já as vazões escoadas nas saídas de cada equipamento passando pelas válvulas de controle recebem o mesmo equacionamento deduzido anteriormente, apenas mudando os índices, conforme apresentado abaixo:

$$L_{out,2} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot C_v f(x) \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho_L / \rho_w}} \quad (40)$$

$$W_{out,2} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot C_v f(x) \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho_{wp} / \rho_w}} \quad (41)$$

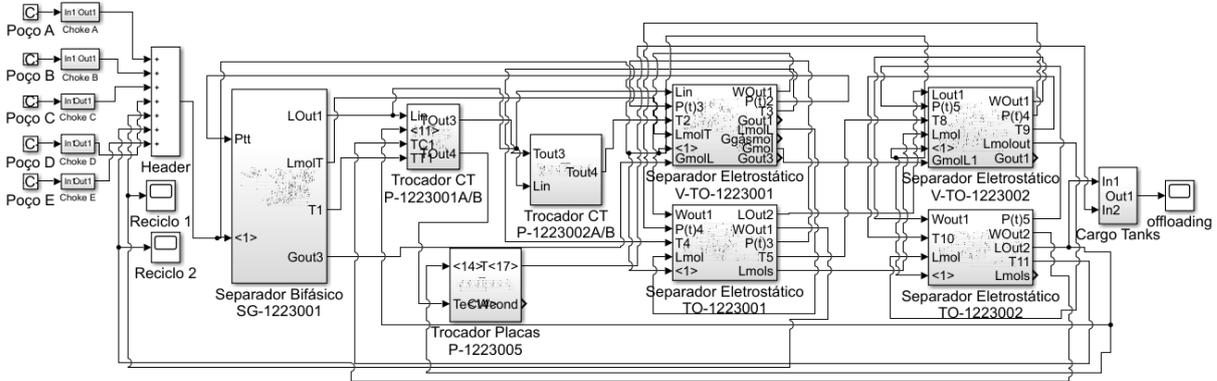
$$G_{out} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot C_v f(x) \beta \varepsilon P(t) \sqrt{\frac{(P(t) - P_2)}{P(t) Z T \left(\frac{\rho_g}{\rho_{ar}} \right)}} \quad (42)$$

Focando no escopo desse trabalho, que é o processamento de petróleo e sua especificação para exportação, não foram analisadas as fases de tratamento de água e gás, ficando isso a cargo de outros trabalhos, pois, no caso em análise, os poços ainda não produzem água de forma significativa, situação esperada quando se fala em novas concessões com bom gerenciamento de produção, tendo apenas uma pequena produção intermitente e que não carece de análise do seu tratamento, pois os equipamentos da plataforma são suficientes para tratar essa água, já o gás requer mais atenção dado o volume produzido e o alto número de equipamentos integrados para sua especificação. O número de equipamentos para tratamento de gás chega a ser de 3 a 4 vezes maior que o número de equipamentos da etapa de tratamento de óleo, porém os equipamentos de tratamento de óleo têm dimensões maiores, podendo um SG ser até 10 vezes maior que alguns equipamentos de tratamento de gás. Como o petróleo tem um valor agregado bem maior que o gás natural, esse trabalho irá se ater a otimização da planta de processamento de óleo, pois trará maior retorno econômico. Para mais informações sobre o controle plantwide de unidades de tratamento de gás pode-se ver Muñoz (2018).

O fluxograma de processo usado nesse trabalho leva em conta a condição atual da plataforma em análise. Nesse contexto, tem-se como modelo um processo formado por cinco poços produtores, um separador trifásico que opera como bifásico pela não produção significativa de água pelos poços atualmente, quatro vasos tratadores (2 desgaseificadores e 2 eletrostáticos), dois trocadores de calor do tipo casco e tubo, um trocador de calor do tipo placas compacto e um tanque de armazenamento da plataforma (*Cargo tanks*). Além dos equipamentos anteriormente citados, a planta contém um trocador de calor de placas compacto para aquecimento de água para a etapa de dessalinização do óleo, porém ele não foi incluído na simulação, pois essa etapa não está sendo utilizada no momento para as condições reais e, por isso, não foi incluída a etapa de diluição para dessalinização. Abaixo, na figura 57, segue

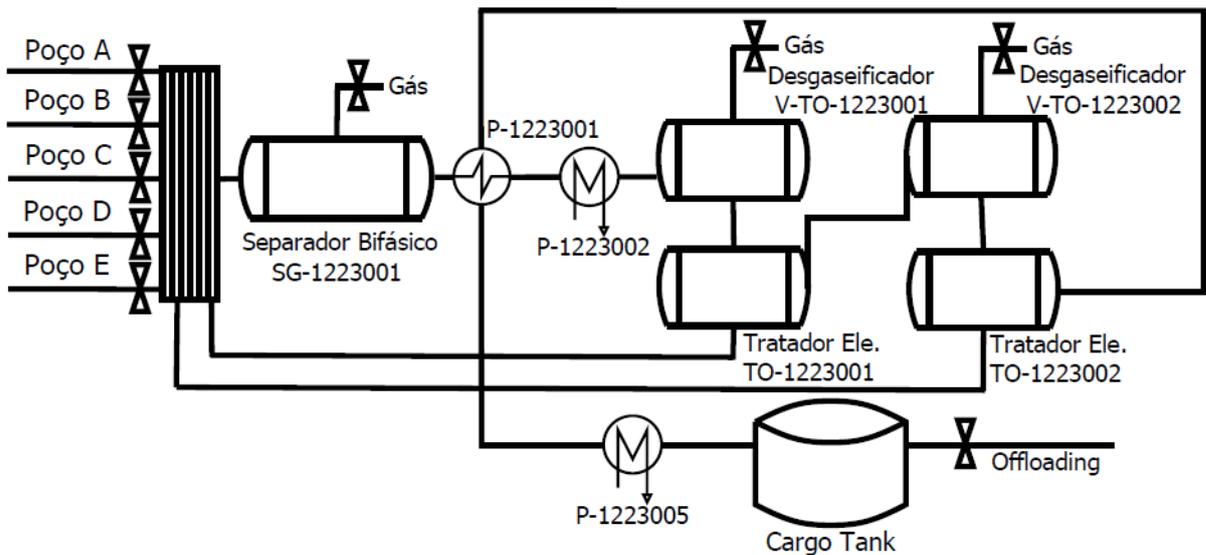
diagrama de blocos da simulação feita em Simulink® para esse trabalho de acordo com a situação atual da plataforma e, na figura 58, o fluxograma de processo.

Figura 57 – Simulação da planta de processo de tratamento de óleo no Simulink®.



Fonte: Dados do autor, 2021.

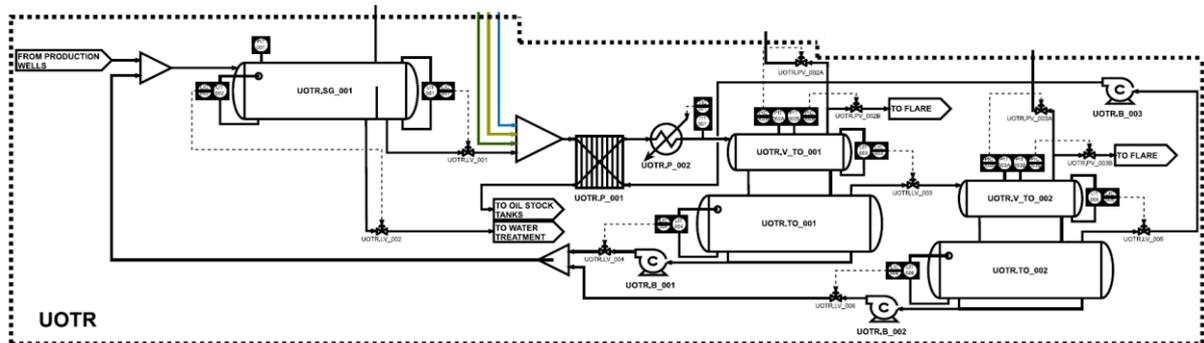
Figura 58 – Fluxograma de processo de tratamento de óleo na configuração atual.



Fonte: Dados do autor, 2021.

Nota-se que o processo se inicia com os poços e termina nos tanques de carga. A inclusão da etapa dos tanques de carga é uma das principais diferenças entre a produção por FPSO e outros tipos de unidade, pois o FPSO tem armazenamento próprio da produção, que fica em seu lastro, enquanto outros sistemas de produção transferem por dutos ou para navios aliviadores. Essa vantagem competitiva será explorada junto ao controle override na análise plantwide de forma a trazer ganhos para o processo. Abaixo, pode-se verificar a similaridade da planta simulada com a utilizada por Trica (2022) em seu trabalho:

Figura 59 – Fluxograma de processo de tratamento de óleo na configuração do trabalho do Trica (2022).



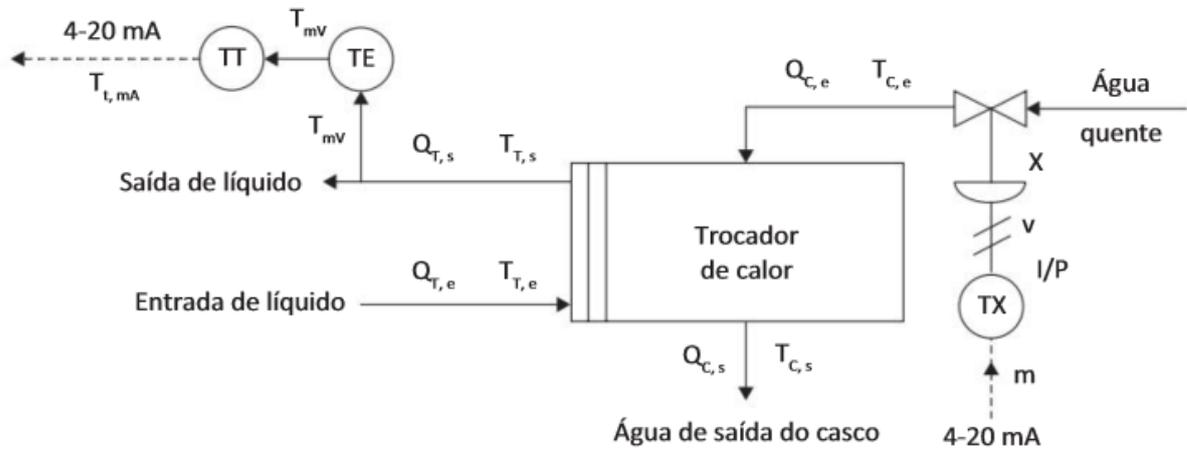
Fonte: Trica (2022).

Pelo que foi proposto nas figuras 57, 58 e 59 tem-se o que Neto *et al.* (2019, p. 16) afirma ao falar que “a tendência dos sistemas de engenharia é tornarem-se cada vez mais complexos, visto que a maioria dos sistemas modernos tem múltiplas entradas e saídas variando com o tempo”.

3.1.3 Modelagem dos trocadores de calor

Os trocadores de calor são utilizados para promover a transferência de calor de uma substância para outra sem que elas entrem em contato diretamente ou se misturem. Vários são os tipos de modelagem para prever o comportamento deles, sendo os modelos de parâmetros concentrados úteis para prever a transferência global de calor entre os componentes, mas não são úteis para prever o comportamento transiente da variação de temperatura a ser medido por um medidor de temperatura, pois nesse caso o importante é a temperatura local no medidor e não a diferença na temperatura total trocada entre as partes. Para resolver essa questão sem precisar utilizar modelos em CFD (computer fluid dynamics), sendo que esses não estão disponíveis para uso no Simulink®, é que Garcia (2017) trouxe uma metodologia que pode ser usada ao fazer a divisão do trocador em seções de transferência de calor e nelas o calor é transferido levando em conta cada volume de controle, ao final se assemelhando com uma modelagem a parâmetros distribuídos. Abaixo pode-se ver a representação esquemática do trocador de calor como um todo e suas variáveis, segundo Garcia (2017):

Figura 60 – Esquema de um trocador de calor casco e tubos.



Fonte: Garcia, 2017.

Para modelar esse sistema ele utilizou de 4 seções de transferência de calor com as seguintes equações para definição do transiente para cada seção:

$$\frac{d(T_{T,média})}{dt} = \frac{\rho_{T,e} Q_{T,e} c_{P,T} (T_{T,e} - T_{T,s}) + UA \Delta T_{CT}}{\rho_T V_T c_{P,T}} \quad (43)$$

$$\frac{d(T_{C,média})}{dt} = \frac{\rho_{C,e} Q_{C,e} c_{P,C} (T_{C,e} - T_{C,s}) - UA \Delta T_{CT}}{\rho_C V_C c_{P,C}} \quad (44)$$

$$\text{Com: } \Delta T_{CT} = \frac{\Delta T_{\text{Casco em cada seção}}}{2} - \frac{\Delta T_{\text{tubos em cada seção}}}{2} \quad (45)$$

Onde:

$T_{T,média}$ = Temperatura média nos tubos (°C);

$T_{C,média}$ = Temperatura média no casco (°C);

$c_{P,T}$ = Calor específico do fluido nos tubos (J/(kg.K));

$c_{P,C}$ = Calor específico do fluido no casco (J/(kg.K));

$T_{T,e}$ e $T_{T,s}$ = Temperatura de entrada e saída dos tubos em cada seção (°C);

$T_{C,e}$ e $T_{C,s}$ = Temperatura de entrada e saída do casco em cada seção (°C);

$Q_{T,e}$ = Vazão do fluido nos tubos (m³/s);

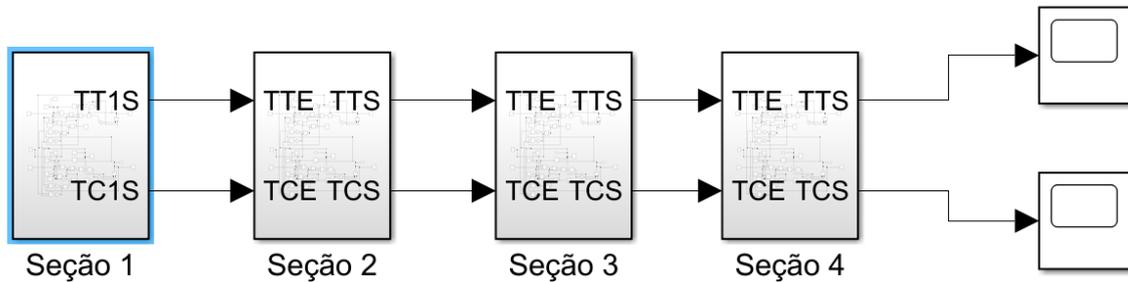
$Q_{C,e}$ = Vazão do fluido no casco (m³/s);

UA = Coeficiente global de troca térmica (W/K);

V_T e V_C = Volume dos tubos e volume do casco.

Abaixo segue visão esquemática em simulink® elaborado pelo autor do que foi proposto por Garcia (2017):

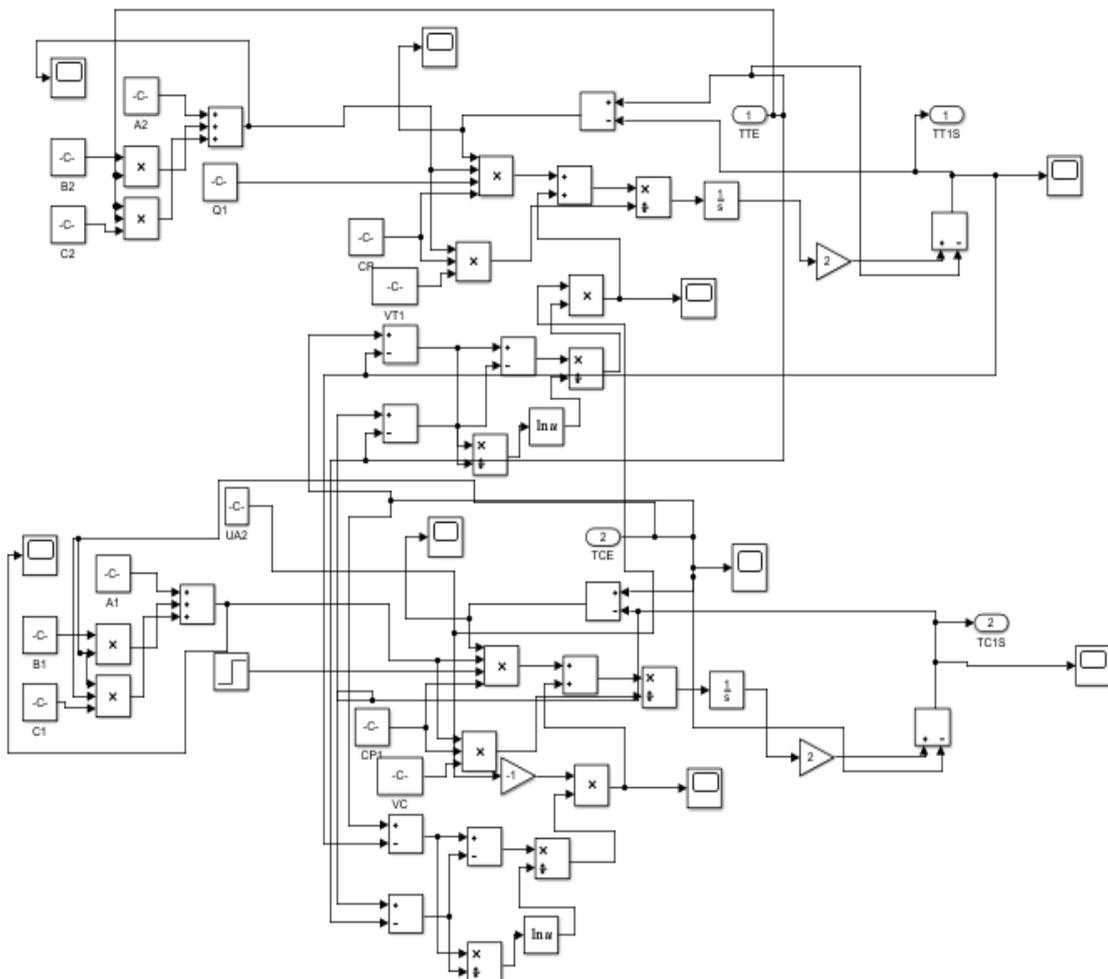
Figura 61 – Esquema proposto por Garcia – 4 seções.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O circuito que representa as equações apresentadas na página anterior em simulink® para cada seção pode ser visto abaixo:

Figura 62 – Esquema elaborado pelo autor – segunda seção.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Percebe-se que Garcia (2017) discretizou a massa específica a ser utilizada no seu método a cada seção a partir de uma tabela de densidades em função da temperatura, enquanto no esquema acima foram utilizadas as correlações de Racket e Lu descritas, conforme modelado em Bega (2011).

Racket é utilizado para cálculo da massa específica de líquido saturado:

$$V_s = \frac{RT_c}{P_c} Z_{RA} [1+(1-T_r)^{2/7}], \text{ sendo } \rho_{Csat} = MM/V_s \quad (46)$$

Já Lu faz a correção da compressibilidade por:

$$Z_L = 0,269T_r - 0,5163T_r^2 + 0,3521T_r^3 - 0,0461 \quad (47)$$

$$F_p = 1 + Z_L P_r, \text{ sendo } \rho_c = \rho_{Csat} F_p \quad (48)$$

Ao final, pode-se gerar uma curva variando os dados acima em função da temperatura de interesse e criar uma correlação típica, onde A, B e C são constantes:

$$\rho_c = A + BT + CT^2 \quad (49)$$

Foi feito isso para os fluidos desse trabalho e, com isso, garantiu-se a variação da densidade em cada seção, evitando, assim, erros da ordem de até 10% no valor final realizado.

Além do formulário acima, foram utilizadas as informações presentes na obra do Incropera (2014) para complementar o equacionamento necessário para o dimensionamento do equipamento, conforme abaixo é mostrado na tabela 10.

Junto a sua curva característica, a qual é mostrado o exemplo na figura 63, e que depende também do número de passes nos tubos e das características dos fluidos que estão sob efeito da troca térmica.

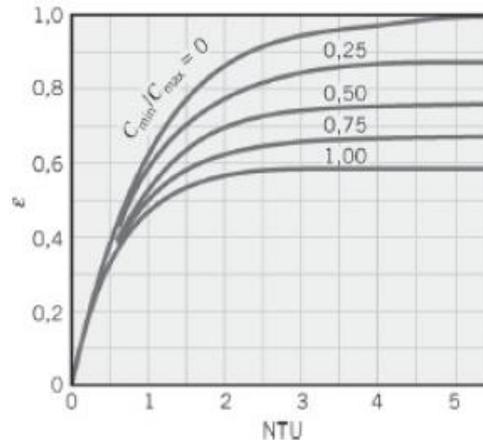
Vale salientar que nesse trabalho o trocador foi dividido em 6 partes, ganhando mais precisão no cálculo do transiente final da temperatura para implementação do controle, como pode ser visto no exemplo abaixo, na figura 64. Essa mudança é importante, porque apesar do maior esforço computacional, tem-se uma aproximação melhor do processo de um modelo a parâmetros distribuídos, mais próximo do comportamento real do processo para os itens de controle implementados, preservando, assim, o transiente e curvas características.

Tabela 10: Efetividade e NUT do trocador de calor casco e tubo.

NÚMERO DE PASSES	EQUAÇÃO
Um passe no casco (2, 4, ... passes nos tubos)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp[-(NTU)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-(NTU)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$
n passes no casco ($2n, 4n, \dots$ passes nos tubos)	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1}$
Um passe no casco (2, 4, ... passes nos tubos)	$(NTU)_1 = -(1 + C_r^2)^{-1/2} \ln \left(\frac{E - 1}{E + 1} \right)$ $E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}}$
n passes no casco ($2n, 4n, \dots$ passes nos tubos)	$\varepsilon_1 = \frac{F - 1}{F - C_r} \quad F = \left(\frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1} \right)^{1/n} \quad NTU = n(NTU)_1$

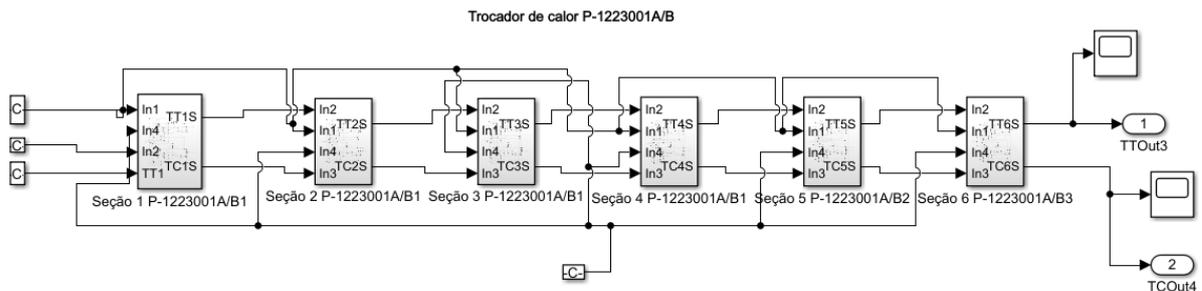
Fonte: Adaptado de Incropera (2014).

Figura 63 – Efetividade em função da razão entre capacidades caloríficas.



Fonte: Incropera (2014).

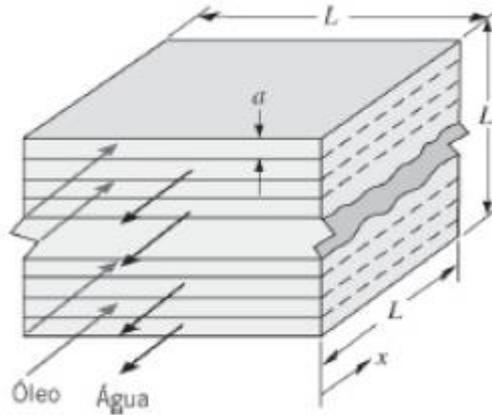
Figura 64 – Esquema proposto pelo autor – 6 seções.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Já para a troca térmica no trocador de calor de placas compacto, utilizou-se a mesma metodologia descrita acima, só mudando as informações de dimensionamento propostas pelo Incropera (2014), como o representado pelo esquema abaixo:

Figura 65 – Esquema proposto de placas e suas dimensões.



Fonte: Incropera, 2014.

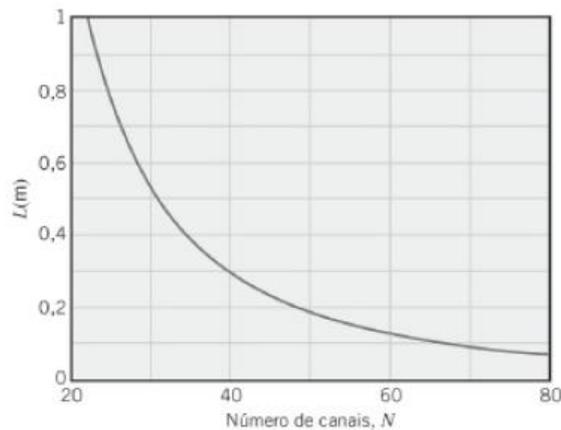
Onde nesse processo são utilizadas as seguintes fórmulas e diagrama:

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k} \quad (50)$$

$$h_f = h_q = Nu_D k N / 2L \quad (51)$$

$$UA = \frac{L^2(N-1)}{\frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_q}} = q / \Delta T_{lm} \quad (52)$$

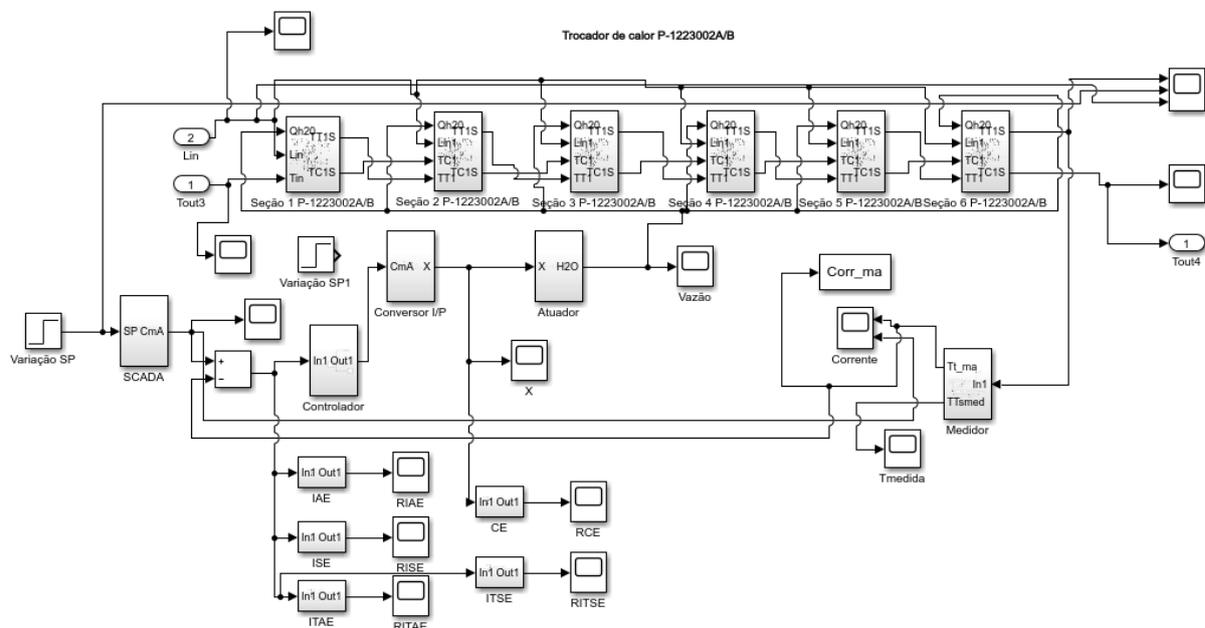
Figura 66 – Diagrama de placas e suas dimensões.



Fonte: Incropera (2014).

Após implantado o equacionamento da transferência de calor no Simulink® é a vez de ser implementado os elementos necessários ao fechamento das malhas de controle, como é o caso dos medidores, os controladores, os atuadores e os conversores. Além disso, foram incluídos os elementos de medição dos fatores de desempenho dos controladores, onde, no caso, foram os IAE, ISE, ITAE, ITSE e CE. Segue abaixo esquema criado para realizar o controle de temperatura dos trocadores desse trabalho em ambiente Simulink®. Vale salientar que os controles de nível e pressão dos vasos separadores e tratadores desse trabalho também foram tratados como abaixo, porém, considerando as peculiaridades de cada tipo de controle e as condições impostas pelos equipamentos.

Figura 67 – Trocador de calor casco e tubo utilizado na simulação já com controlador.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Nesse caso, foi utilizado um controlador do tipo PID de acordo com o recomendado por Teixeira *et al.* (2015). Diferente do controle de interface e pressão, o medidor de temperatura tem dinâmica considerável no processo de controle e, por isso, foi considerado no dimensionamento do controle, sendo modelado por uma curva de primeira ordem com atraso e tempo morto, mas com data hold de ordem 0 para simplificar a análise ao invés do de ordem 1 como requerido para processos que tem o termo derivativo, pois, nesse caso, teve valor absoluto pequeno, onde o restante dos itens foram considerados puramente proporcionais e os atuadores com dinâmica de primeira ordem com atraso e tempo morto com data hold de ordem 0.

3.1.4 Modelagem dos *Cargo Tanks*

Os *Cargo Tanks* são os tanques que recebem a produção do óleo tratado e o armazenam para posterior *offloading*.

Pela simplicidade do esquema, pode-se fazer seu balanço de acordo com o que é descrito por Coughanowr (1965, p. 100):

$$\frac{\text{Acúmulo de } L}{\text{tempo}} = \frac{\text{Entrada de } L}{\text{tempo}} - \frac{\text{Saída de } L}{\text{tempo}} + \frac{\text{Geração de } L}{\text{tempo}} - \frac{\text{Consumo de } L}{\text{tempo}} \quad (53)$$

$$\frac{d(\rho Ah)}{dt} = \rho Q_{in} - \rho Q_{off} \quad (54)$$

Nesse caso, tem-se a massa específica constante, ficando com a seguinte equação:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{in}}{A} - \frac{Q_{off}}{A} \quad (55)$$

h = Nível do tanque (m);

A = Área do tanque (m²);

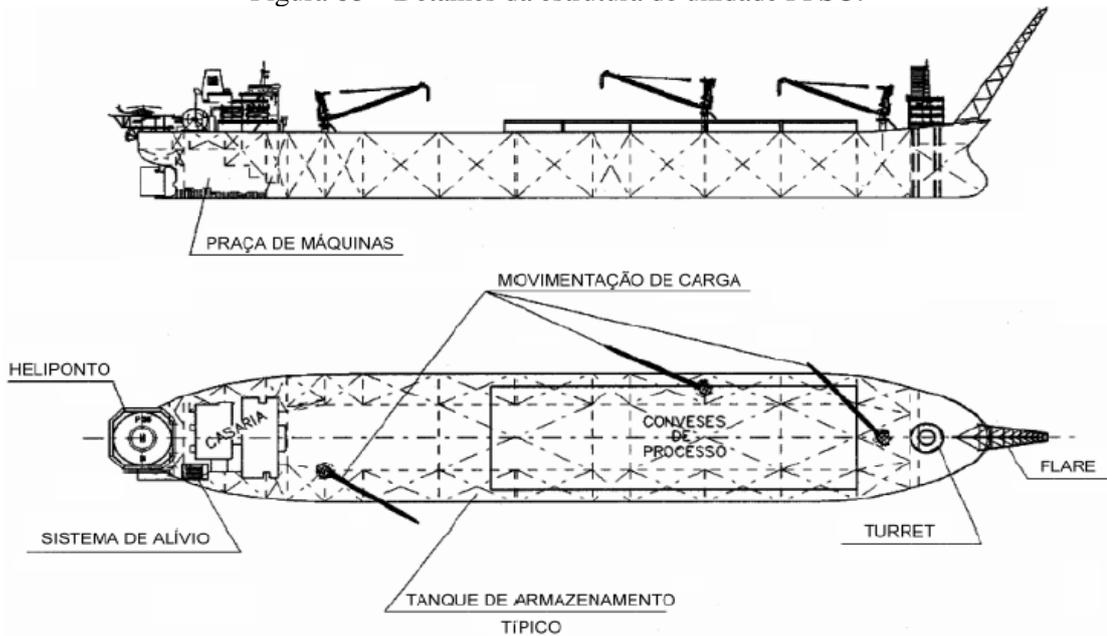
Q_{in} = Vazão de alimentação dos tanques (m³/s);

Q_{off} = Vazão de *offloading* (m³/s).

Com esse modelo pode-se prever o acúmulo de produção nos tanques para que se possa inferir se a vazão de alimentação para eles pode ser aumentada ou não, informação importante para o processo de plantwide e override. Outro dado interessante é que, segundo Pinosofa *et al.* (2010), somente 10% dos sistemas de produção *offshore* do mundo são do tipo FPSO, enquanto no pré-sal, temos que isso é de 100%, o que aumenta a relevância dessa análise.

Segue desenho ilustrativo de um FPSO e seu *Cargo Tank*, segundo Pina (2010, p. 18):

Figura 68 – Detalhes da estrutura de unidade FPSO.



Fonte: Pina, 2010.

3.1.5 Do equilíbrio líquido-vapor

O Equilíbrio líquido-vapor é muito importante para definição da quantidade de gás que se desprende do óleo a cada estágio de depressurização da planta. Neto *et al.* (2015, p. 1) confirma isso ao falar que “a predição do comportamento termodinâmico de fases é essencial para o desenvolvimento e otimização da produção de hidrocarbonetos em aplicações na engenharia de petróleo”.

Já Saber (2011) fala que um modelo termodinâmico fornece a relação entre as propriedades termodinâmicas utilizadas no processo e pode ser utilizado junto às relações fundamentais para gerar as propriedades requeridas a fim de conseguir realizar os cálculos de equilíbrio de fases.

Dois tipos de modelos podem ser usados nesse estudo, os modelos por equações de estado e o por correlações empíricas. Como modelo de estado, pode-se citar o criado por Peng-Robson em 1978, que pode ser apresentado de várias formas, como a seguinte (NETO *et al.*, 2015):

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{aa(T)}{V(V+b)b(V-b)} \quad (56)$$

Com seu fator de compressibilidade definido por:

$$Z^3 + (B - 1)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \tag{57}$$

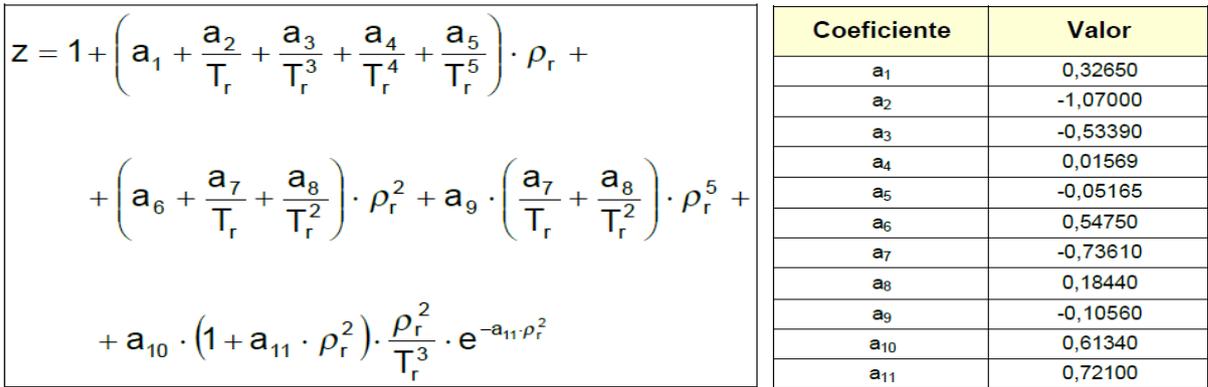
Outra forma de cálculo muito comum na indústria de petróleo é o do fator de compressibilidade (Z) obtido por Redlich/Kwong na forma:

$$Z = 1 + \beta - q\beta \frac{Z - \beta}{(Z + \epsilon\beta)(Z + \sigma\beta)} \tag{58}$$

Nos dois casos, pode-se corrigir o Z quando a concentração de contaminantes for alta. Por exemplo, o Z aumenta cerca de 1% para cada 5% de nitrogênio no gás e no caso da presença de sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono, que causam grandes erros nos fatores de compressibilidade, assim, pode-se corrigir por correlações específicas e ábacos.

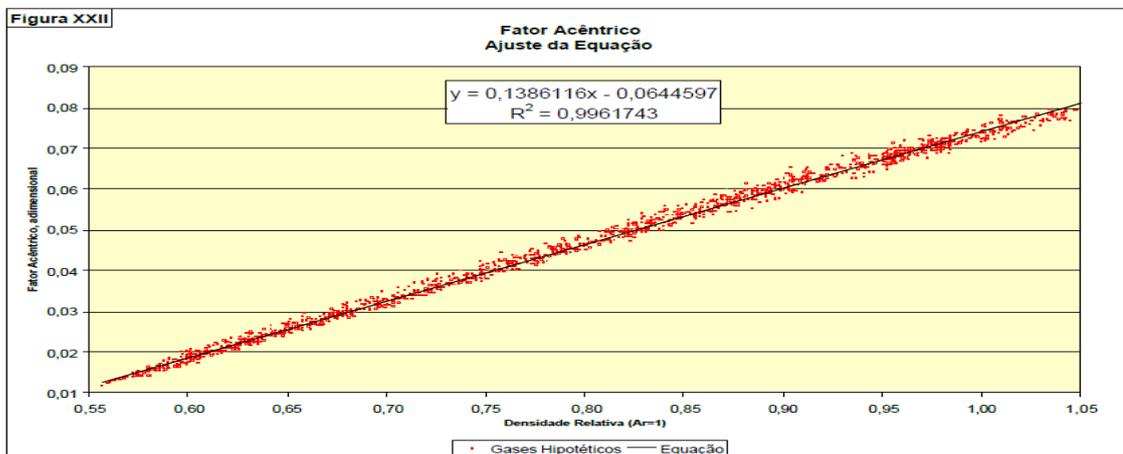
Uma outra forma de viabilizar a realização do equilíbrio líquido vapor é por correlações especificamente criadas para isso. Nesse trabalho, destaco as criadas por Borges (2009):

Figura 69 – Correlação para fator de compressibilidade.



Fonte: Borges, 2009.

Figura 70 – Correlação para fator Acêntrico.



Fonte: Borges, 2009.

Nesse trabalho, preferiu-se trabalhar com correlações para a fase de simulação de modelagem em controle no Simulink®, a partir de correlações obtidas com o projeto da unidade e dados reais, e com equações de estado para a etapa de otimização baseada em algoritmos genéticos.

3.2 APLICANDO AS TÉCNICAS DE CONTROLE, INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MACHINE LEARNING

A fim de viabilizar o que se é proposto nos objetivos é preciso utilizar a técnica de controle plantwide associado as técnicas apresentadas anteriormente na revisão bibliográfica. Pode-se notar que o esquema proposto por Skogestad (2004), conforme tabela 08 da seção 2.8, seria adequado para essa pesquisa, pois estaria de acordo com o que é pregado nos objetivos específicos e metodologia, no sentido de quais etapas realizar para a construção do PWC, no entanto, ele e os outros pesquisadores citados na tabela 7 da seção 2.8 não elaboraram sua função objetivo com base no aumento da produção da planta para obter maior receita e lucro, como proposto por essa pesquisa, e sim em minimizar custos, situação essa não tão vantajosa como o de aumentar a produtividade, pois em indústrias de produção de produtos de alto valor agregado com processos com peso maior em custos fixos em relação ao custo variável, a receita de venda dos produtos se torna mais importante que os custos para obtê-los, visto que aumentar a produção se torna uma forma de aumentar o lucro de forma mais preponderante que reduzir custos variáveis (Chiavenato, 2003). Além disso, nas metodologias propostas, não são empregadas ferramentas de inteligência artificial e machine learning como base para a otimização do processo, o que diferencia o esquema proposto por esse trabalho de todos os outros já feitos.

Já o esquema proposto por essa dissertação segue a metodologia criada pelo autor, a qual é representada na Tabela 11 que segue abaixo.

Conforme pode ser observado, o objetivo desse método, intitulado controle plantwide inteligente AIML (plantwide control with artificial intelligence and machine learning – PWC AIML), é o de maximizar a produtividade do processo utilizando ferramentas de inteligência artificial e machine learning a partir de um procedimento que visa aumentar as receitas e lucros obtidos. Nos resultados desse trabalho é mostrado como cada etapa desse projeto foi executado na prática e como o desempenho final é melhorado em relação ao PWC convencional. Vale salientar que cada etapa do processo PWC foi revista de forma a se obter o melhor retorno

possível com as técnicas atuais disponíveis para controle do processo e otimização de resultados. Visões antigas, como a de que as malhas de controle deveriam ser as mais simples possíveis, foram substituídas pela ação de inclusão de malhas de controle multivariadas e por inteligência artificial, de forma a obter a maior receita possível do processo, pois a visão atual, mostrada de forma ampla no referencial teórico, é que os processos estão cada dia mais complexos e, por isso, precisam de métodos mais modernos de controle, além de que, como já explicado, a depender da empresa, maximizar receitas é mais importante que reduzir custos, logo, a função objetivo tem que refletir isso.

Tabela 11: Proposta de metodologia para projeto de controle plantwide.

<p>1° - OBJETIVOS E GANHOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1. Definição dos objetivos; • 2. Definir função objetivo de ganho por aumento de produtividade ou eficiência a ser maximizado;
<p>2° - DELIMITAÇÃO DA PLANTA</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1. Definir condições de contorno do problema, como: graus de liberdade, restrições, limites, condições esperadas, etc; • 2. Identificar modelos necessários a realizar a avaliação dinâmica e estática do processo conforme objetivos; • 3. Identificar processos que precisam utilizar redes neurais/deep learning para criar modelos precisos de seu comportamento;
<p>3° - AVALIAÇÃO EM ESTADO ESTACIONÁRIO</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1. Definir variáveis a serem controladas visando promover o aumento da produção de forma segura e de forma a manter a estabilidade da produção de acordo com as restrições e configurações impostas; • 2. Definir situações que influenciam na produtividade da planta e propor controles convencionais, controles multivariados e/ou por inteligência artificial levando em conta a interação/acoplamentos/desacoplamento dos controles; • 3. Realizar avaliação do processo em estado estacionário, avaliando sua produtividade e a sensibilidade das variáveis escolhidas para controle frente a produção realizada para cada condição prevista para o processo;
<p>4° - AVALIAÇÃO EM ESTADO DINÂMICO</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1. Avaliar estabilidade das malhas de controle de acordo com as configurações e tipos escolhidos; • 2. Avaliar desempenho das malhas de controle a partir de critérios de análise do erro e desvio em relação as restrições da planta; • 3. Gerar e avaliar a utilização dos setpoints candidatos a pontos máximos de produção/rendimento utilizando algoritmos genéticos; • 4. Modificar controles necessários a operar nas faixas definidas pelos algoritmos genéticos que maximizaram a função objetivo, garantindo estabilidade e desempenho;
<p>5° - VALIDAÇÃO</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1. Realizar simulação dinâmica não-linear para validação do projeto com avaliação dos setpoints candidatos a máximo da função objetivo e do não atingimento dos limites do processo.

A primeira etapa, objetivos e ganhos, compreende a definição da função objetivo e da planta a ser analisada. Com a definição da planta vem a descrição dos processos utilizados, os equipamentos e suas dimensões, e os produtos e insumos necessários à produção para que seja possível definir sua função objetivo que prioriza a maximização do lucro ou produção, sendo esse lucro definido geralmente pela produção vezes sua margem de lucro ou pela produção vezes o volume de vendas menos os custos.

Para o sistema analisado, a função de maximização é o de receita obtida por venda dos produtos óleo e gás, que é dependente do equilíbrio líquido vapor definido pelas condições de setpoint impostas, obtendo, dessa forma, o resultado do processo, porém, sem praticamente alterar as condições de custo da planta com as variações nas condições operacionais, pois os custos continuam fixos mesmo se alterando os setpoints, e os custos de aquisição de medidores e controladores é ínfimo perto das receitas obtidas com o processo, logo, ao final, temos como função objetivo a forma abaixo:

$$J = RG \sum G + RL \sum L \quad (59)$$

Com J como resultado da função objetivo em R\$ por unidade de tempo, RG a receita de venda do gás em R\$/m³, RL a receita de venda do óleo em R\$/m³, G a vazão de gás produzida em m³ por unidade de tempo e L a vazão de óleo produzida em m³ por unidade de tempo. Essa função é similar ao que foi proposto por Gunnerud (2013), conforme mostrado abaixo, com exceção que não se tem produção em arranjos submarinos nesse trabalho, pois são poços submarinos satélites, e ele não colocou em função do valor financeiro o resultado, mas com a mesma lógica de maximização do resultado da produção:

$$\max \sum_{m \in M^S} \sum_{l \in I_m} q_{mlo}^L + \sum_{m \in M^T} \sum_{j \in J_m} q_{mj\sigma}^W x_{mj} \quad (60)$$

Nota-se que, para cada conjunto de setpoints propostos pelos algoritmos genéticos, tem-se um valor diferente dessa função objetivo, onde essa função é igualmente usada no algoritmo genético e para a otimização do PWC AIML, a diferença é que nem todas as soluções propostas pelo algoritmo genético são possíveis de implantação na prática por causa das restrições da planta ou pela condição de controle dos equipamentos, sendo assim, existe uma análise a ser

feita para ver qual condição ótima existe para cada caso e ainda possível de ser implantado na prática, incluindo a análise de implantar o sistema adaptativo de controle, se necessário, para viabilizar a mudança de setpoint.

No segundo momento, tem-se a delimitação da planta com a identificação dos modelos, graus de liberdade, restrições, limites e condições esperadas durante a operação. Vale salientar que nesse método devemos ter uma boa precisão dos modelos, logo, em caso de modelos imprecisos ou inexistentes, deve-se usar deep/learning ou redes neurais para elaborar um modelo preciso para ser utilizado nas simulações.

Nesse projeto já foram apresentados os modelos de todos os equipamentos a serem simulados, com exceção dos poços, esses que são alvos da utilização de redes neurais para definição de seu comportamento.

Para viabilizar isso foi utilizado uma biblioteca da linguagem Python a PyBrain, no ambiente de desenvolvimento (IDE) Spyder, para elaboração da rede neural que viabilizou o fuzzy de controle de vazão dos poços. Como dados de entrada foram fornecidos a rede, as aberturas das válvulas e as pressões a montante das válvulas e, como saídas, foi fornecida a vazão de óleo e gás total produzidos pelos poços, medidos na saída dos equipamentos de processo, com isso, é possível elaborar uma curva de resposta da variação de produção dos poços para com suas aberturas a fim de usar essas curvas como insumo para o fuzzy-PID que controla a produção da planta, fazendo-a operar com setpoint definido e em malha fechada, situação essa bem melhor que a atual que é em malha aberta. Faz-se necessário essa abordagem, pois os dados que temos sobre as medições de vazões dos poços é para uma determinada abertura e pressão fixa realizada uma vez a cada 90 dias para o vaso de teste, enquanto o que queremos realmente é manipular a vazão dos poços em função da abertura da válvula e da pressão, que é naturalmente decrescente com o tempo por redução da produtividade do poço diretamente para o vaso separador do processo, informações essas que não temos por poço, pois, nesse caso, todos produzem ao mesmo tempo, e, por isso, se faz necessário gerar um modelo com os dados do sistema de aquisição de dados (PI server) de forma a se obter informações confiáveis.

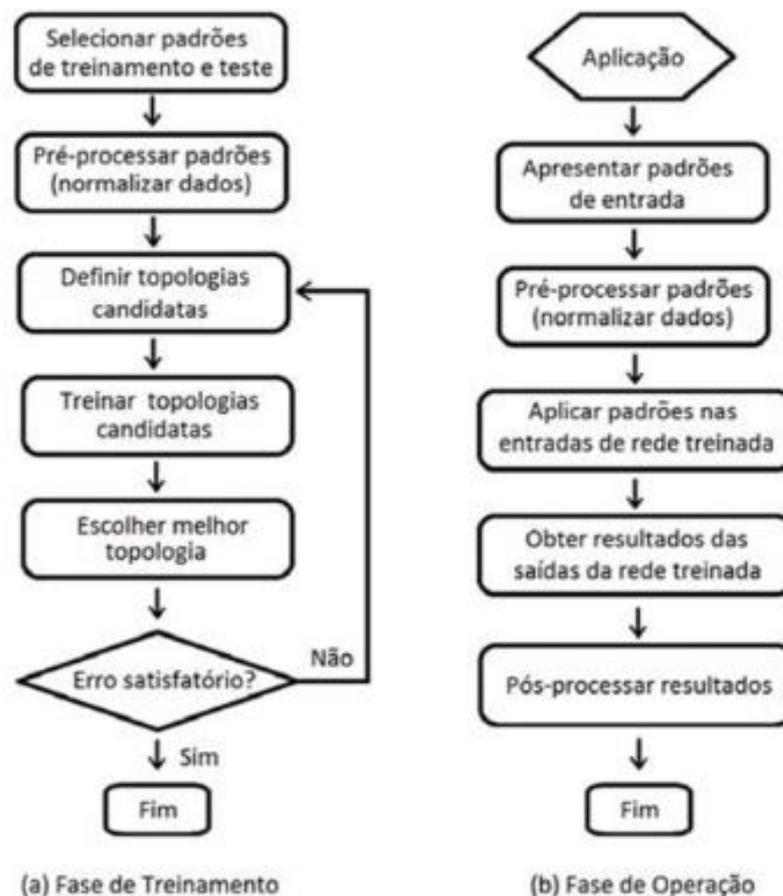
Vale destacar que esse trabalho visa implementar uma lógica parecida com o que foi realizado por Carvalho *et al.* (2010, p. 2) que retratou que

Nos últimos anos, o potencial de manuseio de incertezas e de controle de sistemas complexos, tornados possíveis pela teoria dos sistemas nebulosos (fuzzy), estão sendo combinados às Redes Neurais Artificiais (RNA), que por sua vez apresentam como principais características, a capacidade de adaptação e aprendizagem. Desta combinação, surgem os Sistemas Neurofuzzy.

Percebe-se que Carvalho *et al.* (2010) retrata em seu trabalho a dificuldade para trabalhar com redes que tem aprendizado online e, por isso, esse trabalho preferiu usar a rede para gerar uma correlação que possa orientar um sistema de inferência Fuzzy que irá controlar a produção da planta, eliminando, assim, as dificuldades de se trabalhar com aprendizado online.

Como etapas para se obter o melhor treinamento e o melhor uso de dados da rede criada, nesse trabalho foi utilizado o seguinte diagrama de blocos, proposto por Barbosa *et al.* (2017) em seu trabalho:

Figura 71 – Esquema de treinamento e operação da rede.



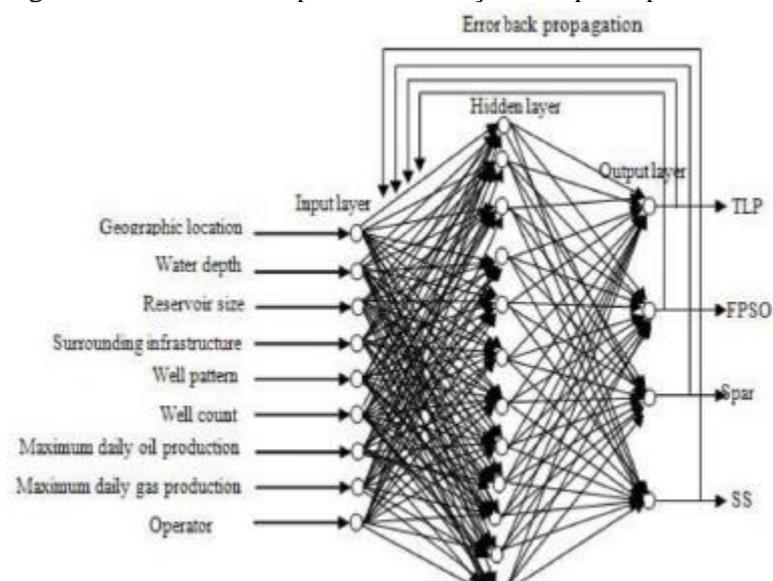
Fonte: Barbosa *et al.*, 2017.

Na análise houve o cuidado de se gerar uma curva de topologias possíveis em função do erro encontrado para avaliar a rede melhor candidata ao estudo, dropout, e para identificar se foram encontrados pontos de equilíbrios instáveis e estáveis, máximos e mínimos locais, bem como se ocorreu underfitting e overfitting. O número de épocas programadas para aprendizado

respeitou o limite estabelecido pela técnica, onde será mostrado nos resultados a que obteve o melhor custo benefício a partir da variação do momento e learning rate aplicados.

Além disso, foram consideradas as possíveis perturbações que podem causar erros na elaboração do resultado da rede, como as citadas por Wang *et al.* (2011), tendo cuidado com a fonte de dados, o tipo de discretização dos dados, a análise dos mínimos locais e a limitação da quantidade de alguns tipos de dados. Essa análise é apresentada nos resultados. Abaixo, pode ver a proposta de rede utilizada por Wang *et al.* (2011):

Figura 72 – Rede neural para determinação do tipo de plataforma.



Fonte: Wang *et al.*, 2011.

Dando continuidade à aplicação dessa etapa do PWC AIML para o problema em análise, tem-se o equacionamento/modelagem e graus de liberdade como os já demonstrados nos primeiros itens desse capítulo, ficando os limites para cada equipamento coletados no manual de operação da planta e incluídos na simulação proposta.

Na etapa 3 tem-se a definição das variáveis a serem controladas de acordo com a importância delas para com a produtividade da planta e promovendo estratégias que visem manter o objetivo na melhor condição possível e não somente pela visão antiga de estabilidade do controle, pois pode-se ter mais de uma situação estável para controle do equipamento sem perder de vista que o resultado é que deve ser o foco do processo. Verifica-se que as definições de que variáveis devem ser controladas já foram explicitadas no referencial teórico em relação a nível, pressão e temperatura com as devidas justificativas técnicas.

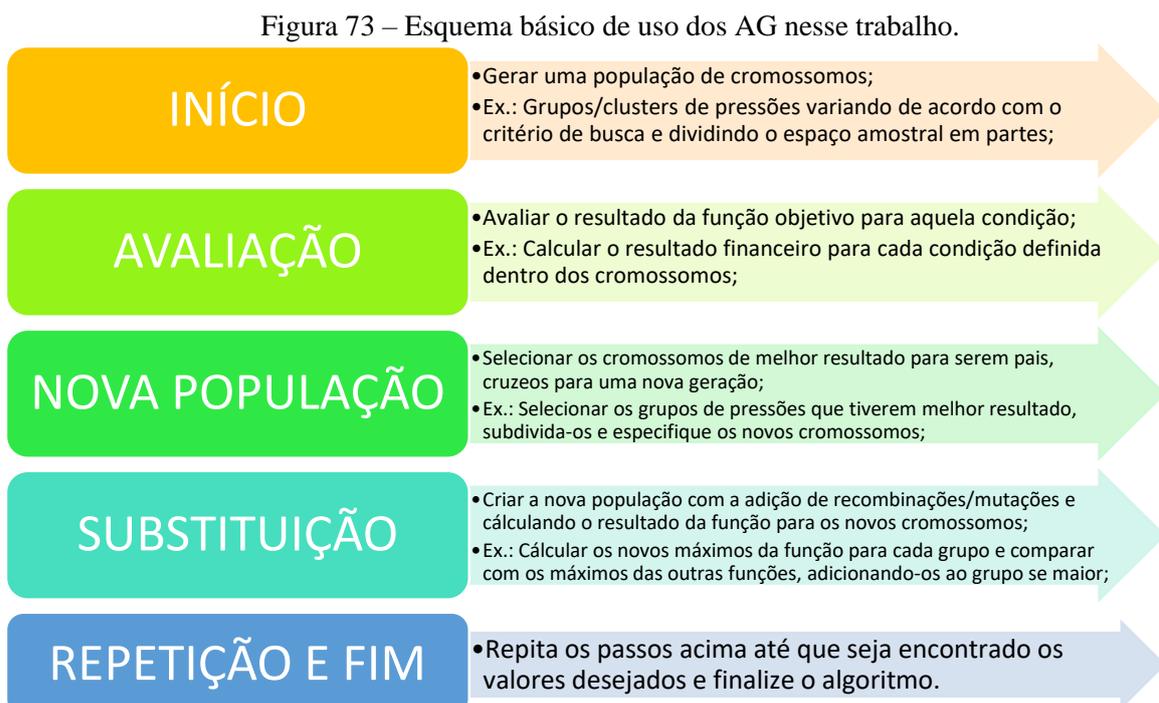
Uma diferença entre a metodologia PWC convencional e o PWC AIML é que os modos de controle não devem ser limitados a situações simples, pois o importante é manter a maior

produtividade possível, nem que para isso todo o sistema seja multivariado ou com técnicas de controle avançado. O incremento de custo para implantação de controles multivariados ou avançados é pequeno frente ao lucro possível com a maximização da produção. Nesse contexto, foi adicionado ao projeto o controle da vazão de alimentação, o controle dos setpoints do processo e o controle override de forma a garantir maior produtividade ao processo. Ainda deve-se realizar a avaliação em estado estacionário e avaliar a sensibilidade das variáveis importantes para correta implantação das malhas de controle.

No contexto em análise, já se fez a definição das variáveis e controles a serem utilizados nos tópicos apresentados acima nesse capítulo, sendo assim, a análise em estado estacionário apresentado nos resultados conclui esse item.

Já na etapa 4, será preciso avaliar a estabilidade das malhas de controle escolhidas e o seu desempenho, mostrando, assim, a viabilidade da estratégia. A análise dessa estabilidade é feita conforme demonstrado na seção 2.2 com o critério de Routh-Hurwitz e Ultimate-Gain e o desempenho pelos critérios dispostos na Tabela 03 também da seção 2.2. Ainda nessa etapa é explorado o universo de otimização criado pelos algoritmos genéticos ao serem aplicados a fim de verificar a possibilidade do uso do controle de setpoint ótimos e se é preciso revisar o projeto das malhas de controle para sua implantação.

Abaixo segue um resumo do uso do método criado a partir dos conceitos mostrados por Linden (2012) e já com um exemplo de aplicação para esse caso:



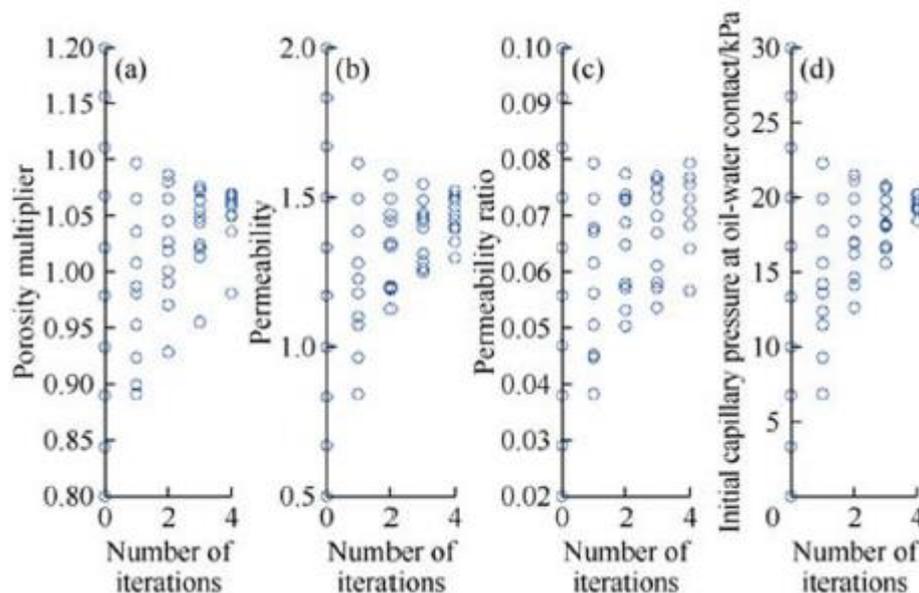
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Nesse caso, precisamos encontrar um espaço de soluções para as vazões de entrada de produção que maximize a função objetivo, gerando uma função de escolha de setpoint que garanta isso. Como o método é heurístico, é possível encontrar várias soluções ótimas e será necessário avaliar a que melhor se adequa para aplicação prática via experimentação na simulação.

Como pode ser visto acima, a busca pela melhor solução utilizando o algoritmo genético reduz o esforço computacional a depender do tamanho da população escolhida e pelo critério utilizado para finalizar o método. Com isso, pode-se tornar um problema, antes insolúvel ($3,2 \cdot 10^{31}$ simulações necessárias), em um problema com soluções aproximadas, que pode ser utilizado na prática para ganhos no processo.

Nota-se que ao final se obterá um resultado parecido com o que foi encontrado por Deli *et al.* (2020) em seu trabalho, mas deve-se considerar que, nesse caso, essa convergência se dará pela maximização da função objetivo, sendo que o número de iterações que ele reporta é interpretado pelo número de gerações que se terá no algoritmo genético.

Figura 74 – Convergência da solução com o número de iterações.



Fonte: Deli *et al.*, 2020.

O processamento do sistema especialista que opera o controle dos setpoints e override e o da malha de controle dos poços serão em paralelo, pois como afirma Simões (2007, p. 64) “processamento paralelo é veloz. O controlador fuzzy completa a tarefa de processamento sem envolver muitos cálculos, e com isso a velocidade de processamento é aumentada”.

Não será utilizado aprendizado online no processo para que o método criado não seja inviável de aplicação técnica na prática por falta de tecnologia real para implantação ou falta de capacidade de processamento, ou seja, um fuzzy com redes neurais convertidos em funções podem ser utilizados em PLCs convencionais sem dificuldades para implantação, enquanto que técnicas de aprendizado online, como redes neuro-fuzzy online, requerem maior investimento em infraestrutura e capacidade computacional, podendo dificultar a sua implantação.

Além disso, para fechamento das malhas de controle são feitos ensaios em malha aberta para verificar o comportamento do processo, nessa situação, adquirindo informações como a constante do processo (K_p), o tempo morto (θ) e a constante de tempo (τ) a partir da análise da curva de resposta de Ziegler Nichols, Método de Smith e Sundaesan e Krishnaswamy. Verifica-se abaixo a função para um processo de primeira ordem (First Order Transfer Function - FOTF):

$$G_p(s) = \frac{K_p}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (60)$$

Em seguida, é feito o fechamento da malha com a sintonia definida pelo método apropriado para cada caso, destacando sintonias como a SD (Método da Síntese Direta), SINC (Simple Internal Model Control), Cohen-Coon e Ziegler e Nichols, avaliando para isso o resultado dos indicadores de desempenho para o processo em malha fechada com perturbações na corrente de alimentação (Modo Regulatório) e variações no setpoint (Modo Servo), sendo escolhido a sintonia que trouxer o melhor resultado para o conjunto de indicadores analisados e descritos na tabela 03 da seção 2.2. Os valores de vazão de perturbação na vazão de alimentação são na faixa de 5% do valor nominal da planta e os de setpoint variando para cada controlador, mas sendo sempre variações menores que 10%. As condições iniciais e finais da simulação para cada controle em que for avaliado a estabilidade e desempenho, junto dos tempos de simulação e parâmetros utilizados, estão dispostos nos resultados desse trabalho para cada etapa realizada.

Ao final, temos a realização da simulação dinâmica não-linear para validação do projeto, já testando o uso dos setpoints ótimos e da não ultrapassagem dos limites durante o comportamento esperado que ocorra com a planta em função do tempo, controle override, onde para o estudo proposto isso é demonstrando nos resultados, já com a aplicação de cada situação esperada.

É importante frisar que a metodologia proposta acima tanto pode ser realizada com a planta ainda em projeto para construção quanto para uma unidade já em operação, só sendo necessário cuidado na interpretação de itens, como o uso de redes neurais para os casos que se conhece o processo e se tem os dados para isso e o de usar sistemas de controle já projetados e estabilizados ou não.

Conforme exposto nos trabalhos de Luyben (2002) e Seborg (2016), entre as várias estratégias possíveis para se elaborar o projeto, será testada a do controle multivariado do tipo override entre a vazão de operação e a vazão de entrada da planta, analisando sua sensibilidade em relação as vazões de reciclo entre equipamentos e as variações possíveis ao utilizar lógica neuro-fuzzy como forma de varrer o conjunto de possibilidade de controle para a planta.

3.3 METODOLOGIA

Esse item é utilizado para apresentar as questões que conduziram à concretização dessa pesquisa a partir da apresentação dos tópicos: caracterização do estudo, questões de pesquisa, método da pesquisa, fontes de evidências, definições construtivas, categorias analíticas e elementos de análise, protocolo de estudo, análise do caso e limitação do estudo.

Segundo Barbosa *et al.* (1990, p. 5) “a Metodologia é a explicação minuciosa, detalhada, rigorosa e exata de toda ação desenvolvida no método (caminho) do trabalho de pesquisa”.

3.3.1 Caracterização do estudo

O presente estudo foi elaborado de forma a ter natureza quantitativa, dado que a análise da estabilidade do processo, desempenho e aumento de produção vão ocorrer pela interpretação dos resultados expressos pelo simulador com a aplicação das técnicas sugeridas e com base nos dados do processo real. Ferreira (2015, p. 115) afirma que esse tipo de pesquisa se aplica bem ao caso em análise porque

de acordo com o ponto de vista de quantitativista, uma pesquisa só terá validade científica, se der margem à classificação, testagem de hipótese, medição e tabulação, com todo esse processo carregado de uma estrutura e de uma forma tão rígida que, nos seus resultados, não revelará nenhum aspecto significativo duvidoso sobre os fenômenos analisados.

O estudo é de tipologia exploratória, visto que existe pouco conhecimento acumulado e sistematizado para o tema em análise, conforme discutido que não foram encontrados trabalhos semelhantes para a área em estudo. Para Gil (2008, p. 28) pesquisa com fim exploratório “tem como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores”.

3.3.2 Questões de pesquisa

As questões de pesquisa são fundamentais para a condução de um estudo quantitativo exploratório, dada a necessidade de se especificar bem o que vai ser realizado para análise e conclusão da pesquisa. Segundo Holanda (2012, p. 369) “[...] reconhece-se a necessidade de obter informações sobre o que influencia e dirige as situações ... que estão sendo estudados” com as questões elaboradas. Além disso, as questões auxiliam a elaboração do roteiro do trabalho.

As questões de pesquisa para esse estudo são:

- a) Quais modelos são adequados para a simulação da planta de processamento de óleo de um FPSO e se esses modelos podem ser validados?
- b) Como implantar controles convencionais de acordo com o caso real estudado de forma a ter uma boa representação do processo real e obter a estabilidade necessária às simulações?
- c) Qual tipo, arquitetura, topologia, taxa de aprendizagem e outras informações são mais adequadas para a realização da estimativa da vazão dos poços utilizando redes neurais?
- d) Como deve ser feita a implantação da lógica fuzzy de controle de vazão baseado nos estudos de redes neurais?
- e) Como deve ser feito o ajuste de setpoint de um equipamento utilizando sistema especialista, algoritmos genéticos e controle override, e quais equipamentos precisam ter PID adaptativo?
- f) Como deve ser feito o projeto dos controladores da planta de forma otimizada de acordo com as técnicas de controle PWC AIML proposto?

3.3.3 Método da pesquisa

As informações coletadas para análise tiveram como meio a verificação documental e dados informatizados associados ao estudo de caso único com múltiplas fontes de evidências.

Segundo Holanda (2012, p. 369) para uma pesquisa desse tipo deve-se coletar primariamente os dados de campo a partir de múltiplas coletas. “A teoria é gerada durante o processo de pesquisa e concomitante à coleta dos dados, ou seja, à medida que os dados vão sendo coletados”. Nesse caso, foi feita uma investigação empírica com os dados reais da planta analisada e verificou-se a disponibilidade de elementos para explicá-los para esse estudo de caso, visto que segundo Yin (2001, p. 27) o estudo de caso é caracterizado como “[...] uma questão do tipo ‘como’ ou ‘por que’ sobre um conjunto contemporâneo de acontecimentos sobre o qual o pesquisador tem pouco ou nenhum controle”. O aprofundamento e detalhamento proposto pelo estudo de caso é importante para essa pesquisa, pois ela foi delimitada para estudo a partir do caso específico do controle de uma plataforma de petróleo da Petrobras do pré-sal, conforme já defendido no referencial teórico e introdução.

3.3.4 Fontes de evidência

Das 6 fontes de evidências possíveis de existir que foram descritas no trabalho de Yin (2001), que são: documentação, registros em arquivos, entrevistas, observação direta, observação participante e artefatos físicos, foram utilizadas como fontes de evidências nesse trabalho os documentos, registros em arquivos e a observação direta.

Sobre os documentos, Gil (2008, p. 147) descreve que

Essas fontes documentais são capazes de proporcionar ao pesquisador dados em quantidade e qualidade suficiente para evitar a perda de tempo e o constrangimento que caracterizam muitas das pesquisas em que os dados são obtidos diretamente das pessoas.

Ainda Gil (2008, p. 147) descreve que “para fins de pesquisa científica são considerados documentos não apenas os escritos utilizados para esclarecer determinada coisa, mas qualquer objeto que possa contribuir para a investigação de determinado fato ou fenômeno”. Nesse trabalho foram utilizados documentos e registros em arquivos pertencentes à empresa em análise, como o projeto da plataforma, o bando de dados (Plant Information – PI) das variáveis estudadas, o manual de operação da planta, o P&ID do processo e o material técnico disponibilizado pelas referências como documentos.

A observação direta foi utilizada sem elaboração de protocolo de observação, e sim de forma a analisar e registrar os acontecimentos e a dinâmica do processo em tempo real da planta, diretamente do banco de dados para a simulação via correlações empíricas, quando cabível.

Esse estudo levou em conta o modo de operação atual da plataforma e usou o banco de dados de todo o período de produção da plataforma, que opera há cerca de 4 anos.

3.3.5 Definições construtivas

Segundo Gil (2008, p. 79), as definições construtivas representam “a operacionalização das variáveis, que pode ser definido como o processo em que sofre uma variável (ou um conceito) a fim de se encontrar os correlatos empíricos que possibilitem sua mensuração ou classificação”. Nesse caso, temos as seguintes definições:

1. Automatizar o processo com lógica de inteligência artificial, machine learning e controle avançado: É o processo de utilizar as ferramentas mais avançadas existentes para automatizar processos visando obter ganhos não possíveis com os processos de automação convencionais;
2. Utilização de simulação e modelagem de processos: Consiste em avaliar quais modelos são representativos para prever o comportamento do processo em análise de forma a ser possível simular condições diferentes da atual condição de operação da plataforma;
3. Conceitos das técnicas de controle avançado, inteligência artificial e machine learning: Cada ferramenta tem características peculiares ao seu método de aplicação e utilização e, por isso, precisam ter esses conceitos definidos para aplicação nas condições de contorno do problema;
4. Impactos em se utilizar as técnicas pretendidas por esse estudo: Analisar os impactos em se utilizar as ferramentas em análise no processo pode reduzir o número de desvios na implantação das práticas pretendidas, caso a empresa analisada opte por realizar a proposta.

3.3.6 Categorias analíticas e elementos de análise

A tabela 12 que segue abaixo apresenta as categorias analíticas e os elementos de análise alinhados aos objetivos específicos que constituíram a base para o estudo, assim como apresenta os quesitos que foram analisados para atingir cada objetivo específico, onde vale salientar que a descrição de como cada elemento foi analisado e seus achados estão apresentados na seção de resultados desse trabalho.

Com isso, as simulações e programas foram elaboradas conforme a necessidade de se avaliar os quesitos dos elementos de análise da tabela abaixo e, com isso, obter o conhecimento necessário para atendimento dos objetivos específicos, levando em conta que a conclusão dessa

dissertação é pautada na resposta as questões da pesquisa, assim, cada tópico abaixo analisado deve estar presente na discussão, relacionados a resolução das questões da pesquisa e seus resultados, o que culminará nas conclusões. Na tabela abaixo, as categorias de análise são referências resumidas das questões de pesquisa, a fim de se demonstrar a aderência da metodologia em relação ao encadeamento das ações necessárias a realização desse trabalho.

Tabela 12: Objetivos específicos, categorias de análise e elementos de análise.

Objetivos específicos	Categorias de análise	Elementos de análise
Modelar, simular e validar uma simulação da planta de processamento de óleo de um FPSO do pré-sal brasileiro;	Simulação e modelagem	- Aderência dos modelos utilizados; - Simulação confere com os modelos e realidade; - Validação da simulação.
Projetar e implantar controladores convencionais nos equipamentos simulados conforme esquema hoje utilizado pela plataforma;	Controle convencional	- Escolher os controles a implementar; - Projetar controles; - Implantar controles; - Analisar desempenho e estabilidade.
Elaborar estudo com redes neurais que determine como saídas as vazões de produção dos poços a partir das condições impostas nas válvulas de abertura dos poços;	Redes neurais	- Extrair dados do PI; - Tratar os dados com Data science; - Analisar qual a arquitetura e topologia de rede que fornece o menor erro; - Gerar as correlações para controle com fuzzy.
Implantar lógica fuzzy de ajuste de abertura das válvulas dos poços, com base no estudo de redes neurais, a fim de controlar a vazão produzida para o processo;	Fuzzy	- Parametrizar Fuzzy; - Implantar lógica; - Validar controle; - Analisar desempenho.
Realizar estudo de otimização do processo por algoritmos genéticos para parametrizar a mudança de setpoint em diversas condições de operação e inserir controle adaptativo (Gain Scheduling Control) nos processos em que a mudança de setpoint gere instabilidade;	Algoritmos genéticos e gain scheduling control	- Modelar problema para análise conforme metodologia do algoritmo; - Buscar condições ótimas de operação para os equipamentos; - Implantar Sistema especialista para mudança de set-point e override; - Avaliar estabilidade e inserir Gain Scheduling Control, quando necessário.
Fazer estudo do controle plantwide do processo em relação ao controle da alimentação da planta, dos seus recírculos e dos controles override baseados nas restrições de saída.	Plantwide e override	- Realizar metodologia de projeto proposto pelo autor de forma a obter o controle da planta com a nova técnica plantwide AIML; - Avaliar ganhos com o uso do novo controle plantwide AIML;

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.3.7 Protocolo de estudo

O protocolo de estudo é um documento que define o planejamento do projeto contendo as informações necessárias para se dar confiabilidade ao estudo. Na tabela 13 são apresentados os elementos que compõem o protocolo de estudo de caso realizado na presente pesquisa.

Tabela 13: Questão de pesquisa, unidade de análise e procedimentos.

Questão de pesquisa	Como aliar as técnicas de controle avançado, inteligência artificial, machine learning e data science para aumentar a produção de uma plataforma do tipo FPSO e maximizar sua receita de forma segura?
Unidade de análise	Plataforma do tipo FPSO.
Organização	Petrobras S.A.
Limite de tempo	De 2021 a 2022.
Fontes de dados e confiabilidade	Cruzamento entre dados coletados mediante análise documental e estudo de caso.
Questões do estudo de caso	<p>a) Quais modelos são adequados para a simulação da planta de processamento de óleo de um FPSO e se esses modelos podem ser validados?</p> <p>b) Como implantar controles convencionais de acordo com o caso real estudado de forma a ter uma boa representação do processo real e obter a estabilidade necessária as simulações?</p> <p>c) Qual tipo, arquitetura, taxa de aprendizagem e outras informações são mais adequadas para a realização da estimativa da vazão dos poços utilizando redes neurais?</p> <p>d) Como deve ser feito o ajuste de setpoint de um equipamento utilizando algoritmos genéticos e quais precisam ter PID adaptativo?</p> <p>e) Como deve ser feito a implantação da lógica fuzzy de controle baseado nos estudos de redes neurais e algoritmos genéticos?</p> <p>f) Como deve ser feito o projeto dos controladores da planta de forma otimizada de acordo com as técnicas de controle PWC proposto?</p>
Procedimento de campo do protocolo (PREPARAÇÃO)	Análise das informações e modelos pertinentes, análise das condições reais e proposição das alternativas pertinentes.
Procedimento de campo do protocolo (AÇÃO)	Realizar simulações, validar modelos e técnicas, e verificar resultados válidos.

Relatório do estudo de caso	Consolidação dos dados. Confronto dos dados com os objetivos da pesquisa.
------------------------------------	--

Fonte: Elaborado a partir de Yin, 2001.

O protocolo de estudo dá mais confiabilidade ao estudo, pois verifica a linha seguida pelo pesquisador para orientar a sua pesquisa, segundo Yin (2001).

3.3.8 Análise do caso

A análise do caso foi realizada por meio da análise quantitativa. Segundo Gil (2008, p. 175) “os critérios adotados para a análise seguem a seguinte ordem: (a) Redução; (b) Apresentação; e (c) Conclusão e verificação”. A redução, de acordo com Gil (2008, p. 175), “consiste no processo de seleção e posterior simplificação dos dados que aparecem nas notas redigidas no trabalho de campo”, situação essa que podemos interpretar como a análise da simulação e seus achados. Já “a apresentação consiste na organização dos dados selecionados de forma a possibilitar a análise sistemática das semelhanças e diferenças e seu inter-relacionamento” (GIL 2008, p. 175), situação essa referente a validação da simulação e análise dos seus resultados, e, por último, a “conclusão/verificação requer a revisão para considerar o significado dos dados, suas regularidades, padrões e explicações” (GIL, 2008, p. 176).

Com esses critérios foi possível elaborar o que foi exposto nos resultados e conclusões que completam esse trabalho. Sendo assim, as simulações foram elaboradas em conformidade com os objetivos específicos, considerando os resultados necessários para abranger toda a pesquisa.

3.3.9 Limitações do estudo

Uma das limitações está relacionado ao tipo de pesquisa exploratória utilizada, uma vez que o pesquisador realiza sua análise tendo como base as informações obtidas por documentos elaborados anteriormente a pesquisa, sendo que as condições reais podem ter sofrido alterações em função do tempo sem que a devida atualização no documento tenha ocorrido.

Para Yin (2001), há três fatores que envolvem a limitação do estudo de caso, sendo eles: (a) falta de rigor metodológico; (b) dificuldade de generalização; e (c) tempo destinado a pesquisa. Em relação ao rigor metodológico, o presente trabalho foi estruturado com tópicos suficientes na sua metodologia para que a coleta de dados minimize os erros possíveis de

ocorrer e se possa chegar aos resultados e conclusões no mesmo nível ou em nível maior ao que se encontra no estado da técnica na literatura para os itens estudados. Já a dificuldade de generalização ocorre pelo caráter subjetivo da interpretação dos dados analisados, que associado ao nicho específico do mercado que está sendo analisado dificulta a comparação, já que há pouca margem para comparação ou associação com dados de outras empresas e setores do ramo de forma estruturada para o caso estudado, até porque as técnicas analisadas são consideradas avançadas em relação as principais técnicas hoje utilizadas nas plataformas.

Por fim, o tempo proposto é suficiente para realizar o planejamento e execução da pesquisa prevista, visto que o espaço amostral foi reduzido ao processo de tratamento de óleo da plataforma estudada, o que gera uma quantidade de informações a ser analisada não impeditivo para a execução da tarefa no tempo proposto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para que seja possível realizar o que se é proposto no PWC AIML e apresentar os dados que respondem as questões de pesquisa é preciso seguir os passos propostos na metodologia e, com isso, a execução das atividades pertinentes ao cumprimento dos objetivos específicos. A seguir, será abordado como cada objetivo específico foi cumprido e quais resultados e informações foram obtidos.

4.1 SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS DA PLANTA DE PROCESSAMENTO DE ÓLEO

Os modelos apresentados no capítulo 3 foram implantados no Simulink® do Matlab® em forma de circuitos, como exemplo mostrado na figura 62, e sequenciados em blocos, como mostrado nas figuras 57 e 64. Como condições de contorno para efetivar a simulação foram utilizadas as informações reais, atuais, presentes no processamento de petróleo do FPSO para os pontos em que existe medição, a partir da análise das variáveis no Plant Information®, e algumas informações que não são passíveis de medição contínua por serem fixas, como as dimensões dos equipamentos, foram retiradas das premissas do projeto da plataforma. Como essas informações são reservadas por serem tecnologias desenvolvidas pela Petrobras, elas são apresentadas nas tabelas abaixo em forma de resultados relativos ou percentuais, garantindo com isso a condição de análise, mas sem expor a tecnologia da empresa, valendo salientar que os resultados apresentados são relativos ao erro percentual do valor previsto no simulador e o real encontrado na plataforma ou projeto.

Foram realizadas 4 simulações para validação dos modelos, sendo que as 3 simulações da planta como um todo foram realizadas na unidade de tempo de minutos e a simulação do trocador de calor na unidade de tempo de segundos. Essas unidades foram escolhidas por representarem de forma melhor o processo com os valores disponíveis para validação, onde as 3 simulações foram comparadas com os valores de vazão na planta em m^3/min e temperatura em $^{\circ}C$. Já a validação do modelo do trocador de calor de casco e tubos teve como unidade de medida m^3/s e $^{\circ}C$ para que ficasse com o gráfico de validação igual aos dados fornecidos pelo livro de Garcia (2017), sendo todas essas simulações realizadas em malha aberta, sem os controles implementados, para avaliação das condições de estado estacionária da planta encontradas na simulação para os mesmos dados de entrada da planta em operação hoje e nas

condições de projeto a fim de comparar se os modelos propostos tem boa correlação com a prática.

Abaixo segue tabela com as simulações realizadas para validação dos modelos, onde percebe-se pelas informações do quadro que cada simulação validou um conjunto de equações de modelos, sendo que, a seguir, são apresentadas as justificativas que contemplam os motivos e achados de cada validação.

Tabela 14: Simulações realizadas para validação dos modelos.

COMPARATIVO	UNIDADES	O QUE FOI VALIDADO
Projeto x Simulação 1	m ³ /min e °C	Equações de vazão, nível e temperatura
Real a plena carga x Simulação 2	m ³ /min e °C	Equações de pressão, vazão, nível e temperatura
Real a 85% da carga x Simulação 3	m ³ /min e °C	Equações de pressão, vazão, nível e temperatura
Exemplo Garcia (2017) x Simulação 4	m ³ /s e °C	Equações de temperatura

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Quando foi realizado o primeiro comparativo, nesse caso, o da simulação 1, com os dados de projeto, foi possível ver boa correlação, baixo erro, segundo a tabela 15 abaixo, entre os valores encontrados com os modelos de vazão de óleo e gás, temperatura no sistema como um todo e de nível nos vasos separadores. Não foi possível observar boa correlação da equação que calcula a pressão, pois existiram divergências entre os valores encontrados na simulação 1 com os valores do projeto, sendo isso justificado pelo fato de a situação atual propiciar aos vasos separadores trabalharem com pressões menores que a pressão prevista no projeto, obtendo, assim, melhor resultado na separação do gás, sendo possível validar essa visão pelas simulações 2 e 3 realizadas por comparativo com os dados reais da planta. Assim, temos erros maiores mostrados na coluna que representam a pressão de entrada e saída dos vasos desgaseificadores V-TO-1223001 e V-TO-1223002, onde a condição atual é uma otimização aplicada pela Petrobras, pois como pode ser verificado no estudo da função objetivo do algoritmo genético, visto na seção 4.5 dos resultados, a condição atual é bem mais próxima da ótima financeira do que a condição de projeto.

Já com as simulações 2 e 3 foi possível validar as equações de cálculo de pressão, vazão, nível e temperatura para duas condições diferentes de vazão da planta. A simulação 2 utilizou os dados de entrada, que no caso são as pressões e vazões de entrada do SG-1223001 e das correntes de troca térmica dos trocadores, com a vazão de operação igual a 100% da vazão nominal da planta, e a simulação 3 foi comparada com a vazão de operação da planta a 85% da vazão nominal em um período em que a plataforma ficou nessa condição. Essa faixa de vazão foi escolhida para validação por ser o universo de análise das perturbações previstas para se verificar a efetividade dos controladores desse trabalho. Normalmente, não temos perturbações com variações maiores que 15% no dia a dia da operação dos equipamentos e, por isso, o controle deve ser efetivo para esse universo, além disso, não se espera operar muito a baixa da vazão nominal durante a vida útil da instalação. A seguir, pode-se analisar os dados nas tabelas 16 e 17:

Tabela 15: Comparativo entre o resultado da Simulação 1 versus o Projeto do FPSO.

COMPARAÇÃO SIMULAÇÃO X PROJETO								
Equipamento	Pressão Ent. (kPa)	Pressão Saída (kPa)	Temp. Ent. (°C)	Temp. Saída (°C)	Q entr. Líq. (m3/h)	Q saída Líq. (m3/h)	Q Saída Gás (m3/h)	Nível (m)
SG-1223001	0%	1%	0%		-4%	-4%	-1%	4%
P-1223001 Tub	-	-	0%	5%	-4%	-3%	-	-
P-1223001 Cas	-	-	-1%	1%	-2%	-3%	-	-
P-1223002	-	-	5%	-1%	-3%	-2%	-	-
V-TO-1223001	-20%	-20%	-2%		-5%	-	-5%	16%
TO-1223001	-20%	-20%	1%			-	-	-4%
V-TO-1223002	13%	13%	1%		-2%	-	1%	9%
TO-1223002	13%	27%	-1%			2%	-	-18%
P-1223005	-	-	1%	-9%	-3%	-3%	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 16: Comparativo entre o resultado da Simulação 2 versus a produção do FPSO a 100%.

COMPARAÇÃO SIMULAÇÃO 2 X REALIDADE PLENA CARGA								
Equipamento	Pressão Ent. (kPa)	Pressão Saída (kPa)	Temp. Ent. (°C)	Temp. Saída (°C)	Q entr. Líq. (m3/h)	Q saída Líq. (m3/h)	Q Saída Gás (m3/h)	Nível (m)
SG-1223001	-1%	-1%	-2%		-	1%	-1%	-7%
P-1223001 Tub	-	-	2%	1%	-	-	-	-
P-1223001 Cas	-	-	2%	3%	-	-	-	-
P-1223002	-	-	1%	1%	-	-	-	-
V-TO-1223001	-3%	-3%	4%		-	-	-4%	-8%
TO-1223001	-7%	-7%	2%		-	-	-	6%
V-TO-1223002	-6%	-5%	5%		-	-	-2%	-4%
TO-1223002	-5%	7%	4%		-	2%	-	7%
P-1223005	-	-	3%	-4%	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 17: Comparativo entre o resultado da Simulação 3 versus produção do FPSO a 85%.

COMPARAÇÃO SIMULAÇÃO 3 X REALIDADE 85% CARGA								
Equipamento	Pressão Ent. (kPa)	Pressão Saída (kPa)	Temp. Ent. (°C)	Temp. Saída (°C)	Q entr Líq. (m3/h)	Q saída Líq. (m3/h)	Q Saída Gás (m3/h)	Nível (m)
SG-1223001	-3%	-3%	-2%		-	3%	-2%	2%
P-1223001 Tub	-	-	1%	2%	-	-	-	-
P-1223001 Cas	-	-	2%	2%	-	-	-	-
P-1223002	-	-	3%	4%	-	-	-	-
V-TO-1223001	-6%	-6%	4%		-	-	-7%	5%
TO-1223001	-8%	-8%	5%		-	-	-	4%
V-TO-1223002	-9%	-7%	5%		-	-	-9%	6%
TO-1223002	-7%	7%	2%		-	4%	-	3%
P-1223005	-	-	2%	-3%	-	-	-	-

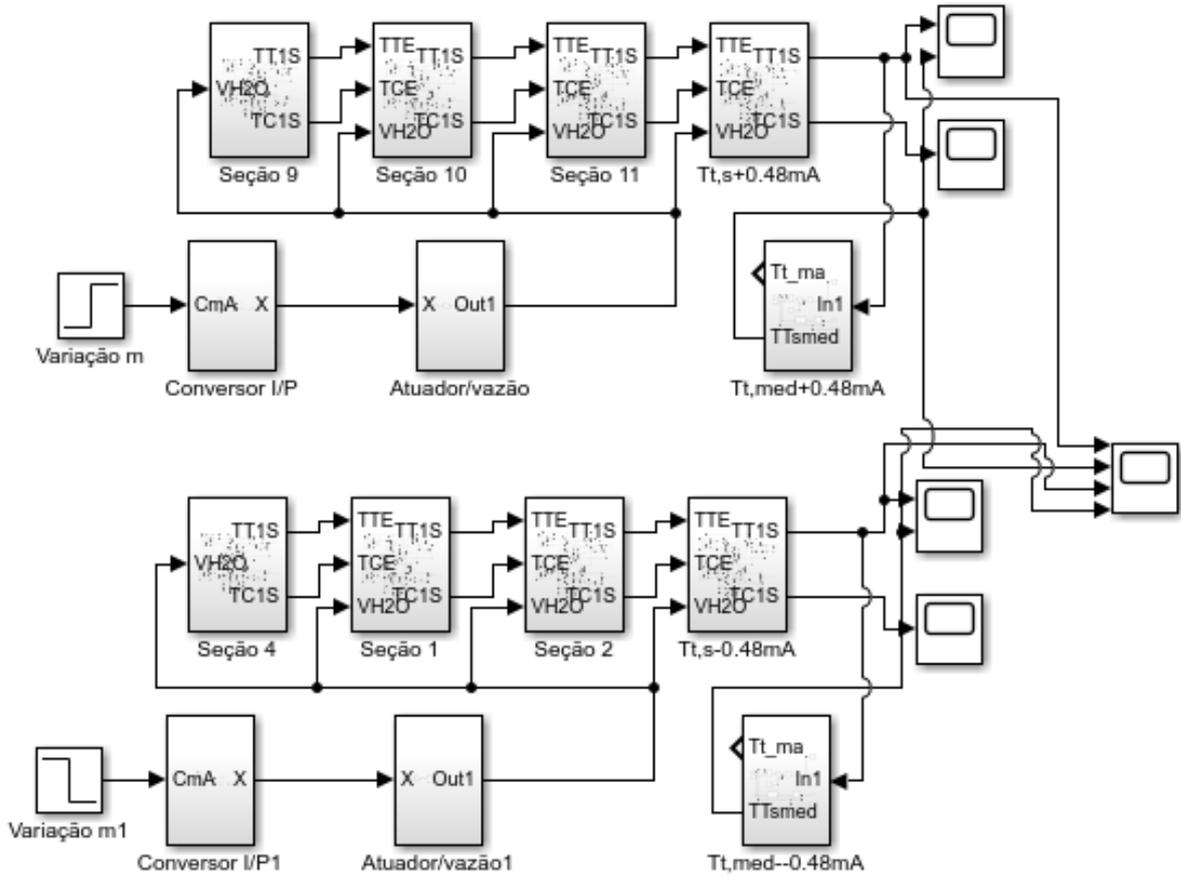
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

É possível notar que os erros são relativamente baixos de uma forma geral, sendo que o modelo de nível/interface apresenta uma variação menor com os dados reais, pois, na prática, o nível dos tratadores TO-1223001 e TO-1223002 estão sob efeito de controle ON-OFF que os levam a ficar no nível na região inferior da base dos vasos, pois os poços não estão produzindo água e, com isso, a espessura de água nos vasos existem apenas para manter o reciclo operacional. As outras variáveis estão com bons resultados, sendo o erro um pouco maior na pressão no final do processo do que no início, pois o valor absoluto da pressão ao final do processo é bem menor que no início, logo, qualquer pequena variação no total se torna mais representativo em porcentagem.

Ainda a fim de validar o modelo do trocador de calor casco e tubo proposto por Garcia (2017) e replicado aqui nas condições de processo, foi montada uma simulação, simulação 4, para validar o modelo com os dados presentes no exemplo encontrado em Garcia (2017, p. 535). O diagrama elaborado no Simulink® se encontra na figura 75, onde existe o mesmo trocador repetido duas vezes, sendo aplicada uma perturbação positiva em um e uma negativa no outro a fim de expor no mesmo gráfico e tempo os valores de resposta ao degrau aplicado, podendo ser visto o resultado disso na figura 77 a fim de fazer comparativo entre os resultados mostrados na figura 76, retirada do livro Garcia (2017, p. 535).

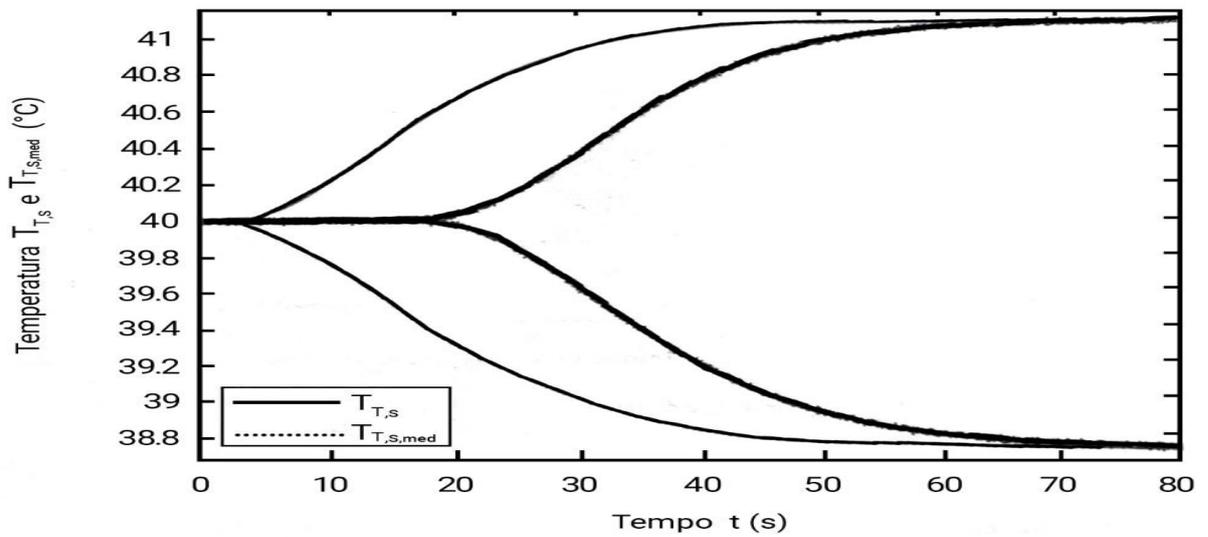
Percebe-se que os trocadores se encontram em malha aberta e a perturbação segue o que foi indicado no livro em relação a um degrau de 0,48 mA na saída do controlador e, com isso, avaliando a resposta do medidor e saída do trocador a essa perturbação, podendo ser visto no mesmo gráfico tanto a perturbação positiva quando a negativa.

Figura 75 – Esquema da simulação 4 para validação do modelo do trocador.



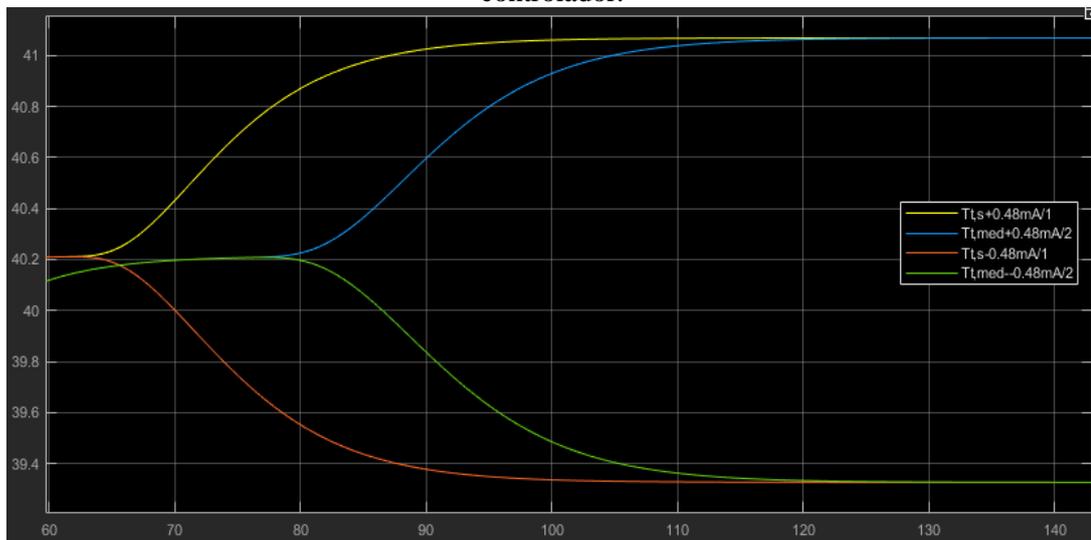
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 76 – Gráfico de temperatura exportada no livro ao degrau de 0,48mA na corrente de saída do controlador.



Fonte: Garcia, 2017.

Figura 77 – Temperatura exportada no simulador ao degrau de 0,48mA na corrente de saída do controlador.



Temperatura(°C) x Tempo (s)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Pode-se notar a boa correlação entre as figuras 76 e 77 em relação a abertura das respostas, tempo morto e aos atrasos de tempo. As pequenas diferenças encontradas entre o valor de partida e o valor final mostrado ocorrem pela variação na metodologia de cálculo de densidade, onde o Garcia usa uma matriz para o seu cálculo e, na metodologia aqui empregada, foi usada uma correlação com base em Racket e Lu. Vale salientar que os tempos iniciais entre os gráficos são diferentes porque existe um tempo necessário a estabilização do cálculo de temperatura na simulação realizada pelo autor, dado o método numérico utilizado pelo Simlunk®, e a capacidade de processamento do microprocessador do equipamento utilizado para simulação, enquanto no gráfico do Garcia (2017), o processo já está estabilizado no tempo zero e, por isso, não precisa aguardar tempo de estabilização. No Garcia, os degraus são aplicados no tempo 0 e, nessa simulação, 4 são aplicados em 60 segundos de simulação.

4.2 PROJETO E IMPLANTAÇÃO DOS CONTROLADORES CONVENCIONAIS NOS EQUIPAMENTOS SIMULADOS CONFORME ESQUEMA HOJE UTILIZADO PELA PLATAFORMA

Os vários equipamentos que estão interligados para promover o tratamento do petróleo na plataforma têm controles convencionais feedback em suas estruturas para garantia da estabilidade do tratamento no equipamento. Com isso, é interessante aproveitar essa lógica já implantada, pois não apresenta custo adicional usá-los, além de seguir as configurações recomendadas no amplo referencial teórico estudado, como o exposto por Nunes (2010) e Garcia (2017).

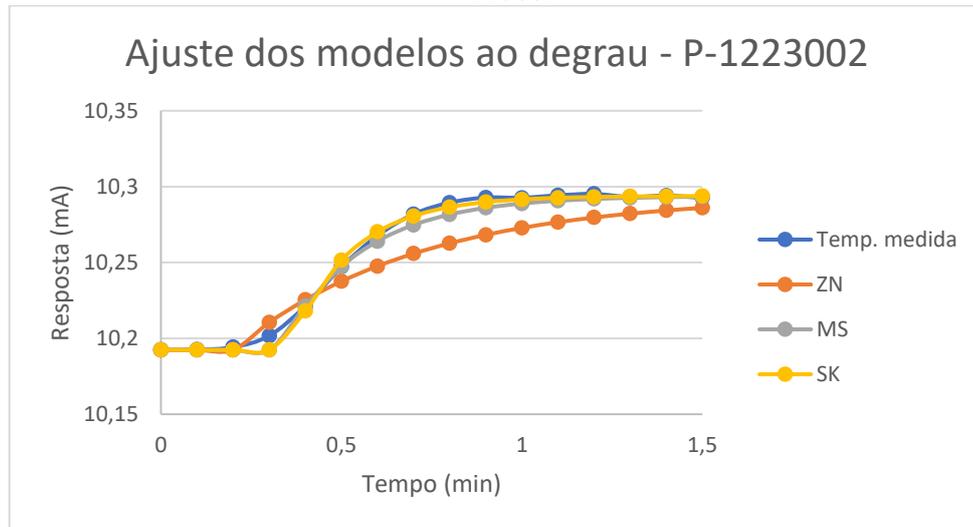
Muñoz (2018), Hori (2005) e Skogestad (2004) iniciam o projeto das malhas, após as definições iniciais previstas em seus métodos, definindo os graus de liberdades e analisando os ganhos e eficiências dos layouts analisados, porém esses passos foram suprimidos na análise dessa dissertação, conforme já justificado acima, haja vista o alto grau de amadurecimento da utilização das tecnologias já implantadas, agora cabendo utilizar o método do PWC proposto para otimizar o modo de operação com base nos objetivos apontados e inclusão de novas tecnologias. Isso corrobora com o fato desse trabalho ser um estudo de caso, assim, os instrumentos, equipamentos e medidores já implantados são mantidos/aproveitados e o estudo passa a ocorrer sobre a forma de usá-los e na inclusão da inteligência artificial e aprendizado de máquina para evolução dos métodos implantados.

4.2.1 Do controle de temperatura

Para implantação do controle de temperatura no P-1223002 e P-1223005 se fez necessário realizar um ensaio em malha aberta com perturbação do tipo degrau igual ao incremento de 0,48 mA na saída do controlador a fim de avaliar no medidor de temperatura a sua deformação ao degrau e, com isso, fazer a análise do comportamento do processo pelas curvas de Ziegler Nichols (ZN), Método de Smith (MS) e Sundaresan e Krishnaswamy (SK) ao definir K_p , θ e τ para cada caso. Lembrando que o P-1223002 é um aquecedor e o P-1223005 é um resfriador.

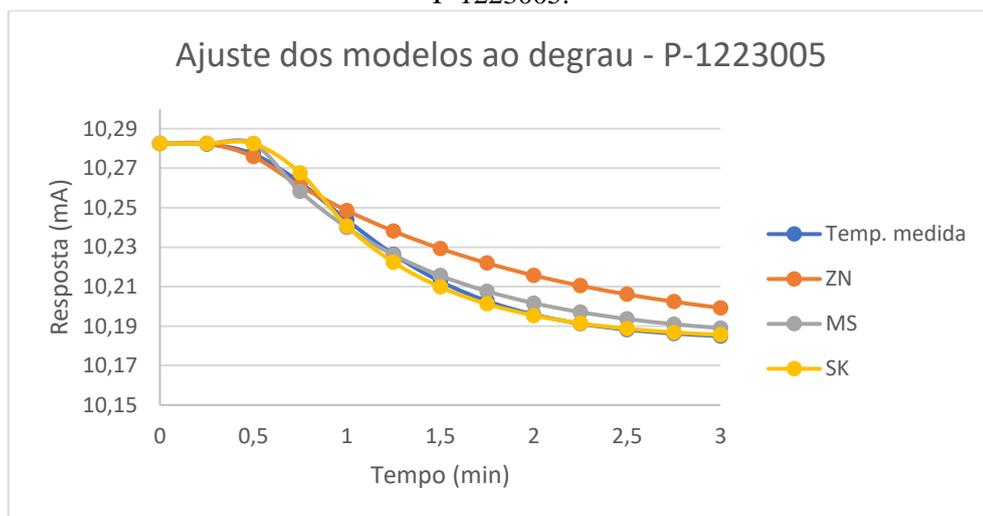
Abaixo seguem os gráficos que mostram a correta utilização dos métodos na aferição da curva de resposta dada a aderência aos resultados para cada equipamento:

Figura 78 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o P-1223002.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 79 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o P-1223005.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A partir daí, foi feito o cálculo das sintonias possíveis para controle dessas variáveis e escolhidos para testes aqueles que tinham valor coerente com as premissas de controle do método, por exemplo para o método de sintonia de Ziegler Nichols é avaliado o fator de incontabilidade. Ao final, foi aplicada a sintonia na simulação e avaliados os indicadores de desempenho para uma perturbação de 4% na vazão de alimentação e 2,2% no setpoint em uma simulação de 60 minutos. Para cada combinação de método de análise de curva de resposta junto a sintonia mais adequada foi feito um ensaio, onde nas tabelas abaixo são mostrados os resultados encontrados e qual sintonia foi a escolhida (taxada em amarelo).

Tabela 18: Tabela de sintonias possíveis para temperatura e indicadores de desempenho para o P-1223002.

AJUSTE DE RESPOSTA EM MALHA ABERTA	SINTONIZADO POR	Modo	IAE	ISE	ITAE	ITSE	CE
Ziegler e Nichols	Ziegler e Nichols	Servo	2,74	0,82	12,38	1,92	0,018
Ziegler e Nichols	Ziegler e Nichols	Regulatório	0,72	0,053	3,68	0,15	0,011
Ziegler e Nichols	Cohen-Coon	Servo	2,05	0,62	6,92	1,074	0,019
Ziegler e Nichols	Cohen-Coon	Regulatório	0,54	0,0392	2,24	0,09	0,011
Ziegler e Nichols	IMC $\tau_c=(\theta+\tau)/2$	Servo	1,84	0,55	5,8	0,909	0,033
Ziegler e Nichols	IMC $\tau_c=(\theta+\tau)/2$	Regulatório	0,49	0,0341	1,87	0,07	0,015
Método de Smith	IMC $\tau_c=\tau/10$	Servo	1,05	0,35	1,95	0,359	0,066
Método de Smith	IMC $\tau_c=\tau/10$	Regulatório	0,28	0,0206	0,778	0,03	0,019
Sundaresan e Krishnaswamy	IMC $\tau_c=\tau/10$	Servo	1,31	0,42	2,76	0,47	0,025
Sundaresan e Krishnaswamy	IMC $\tau_c=\tau/10$	Regulatório	0,35	0,0258	0,988	0,04	0,013

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 19: Tabela de sintonias possíveis para temperatura e indicadores de desempenho para o P-1223005.

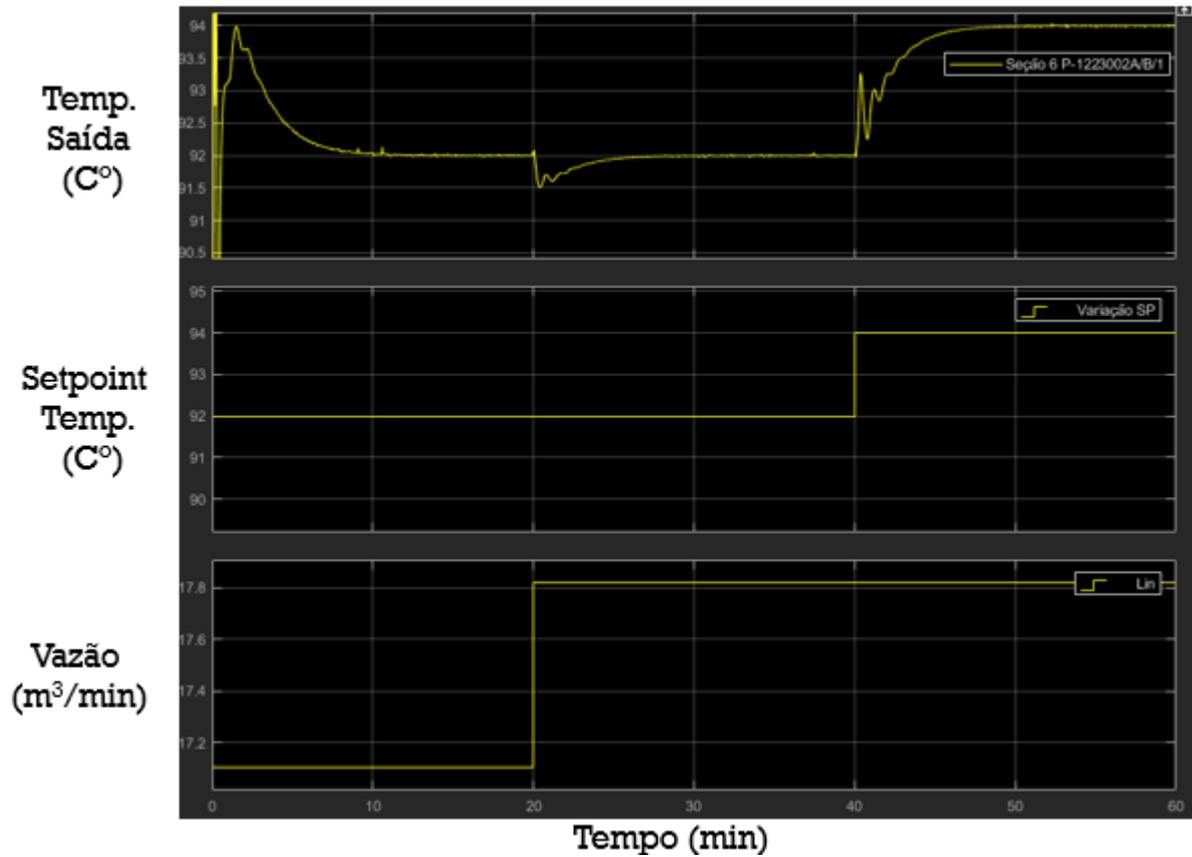
AJUSTE DE RESPOSTA EM MALHA ABERTA	SINTONIZADO POR	Modo	IAE	ISE	ITAE	ITSE	CE
Ziegler e Nichols	Ziegler e Nichols	Servo	7,41	6,87	30,17	15,69	0,0175
Ziegler e Nichols	Ziegler e Nichols	Regulatório	0,66	0,03	4,54	0,159	0,0292
Ziegler e Nichols	IMC $\tau_c=\theta$	Servo	11,5	7,69	91,56	36,93	0,0019
Ziegler e Nichols	IMC $\tau_c=\theta$	Regulatório	3,89	0,72	37,05	4,46	0,0063
Método de Smith	IMC $\tau_c=\tau/10$	Servo	8,8	7,97	36,69	22,99	0,0037
Método de Smith	IMC $\tau_c=\tau/10$	Regulatório	0,86	0,05	6,65	0,27	0,0088
Sundaresan e Krishnaswamy	IMC $\tau_c=\tau/10$	Servo	12,12	7,29	111	42,78	0,002
Sundaresan e Krishnaswamy	IMC $\tau_c=\tau/10$	Regulatório	6,157	1,662	63,3	11,61	0,0056

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Pode-se observar que, como a resposta a perturbação para o controle de temperatura apresenta tempo morto, dada a característica do sensor e da capacitância do trocador, então, podemos usar um tempo de aquisição médio, no caso, foi usado 6 segundos, para garantir que não se tenha aliasing na aquisição da curva.

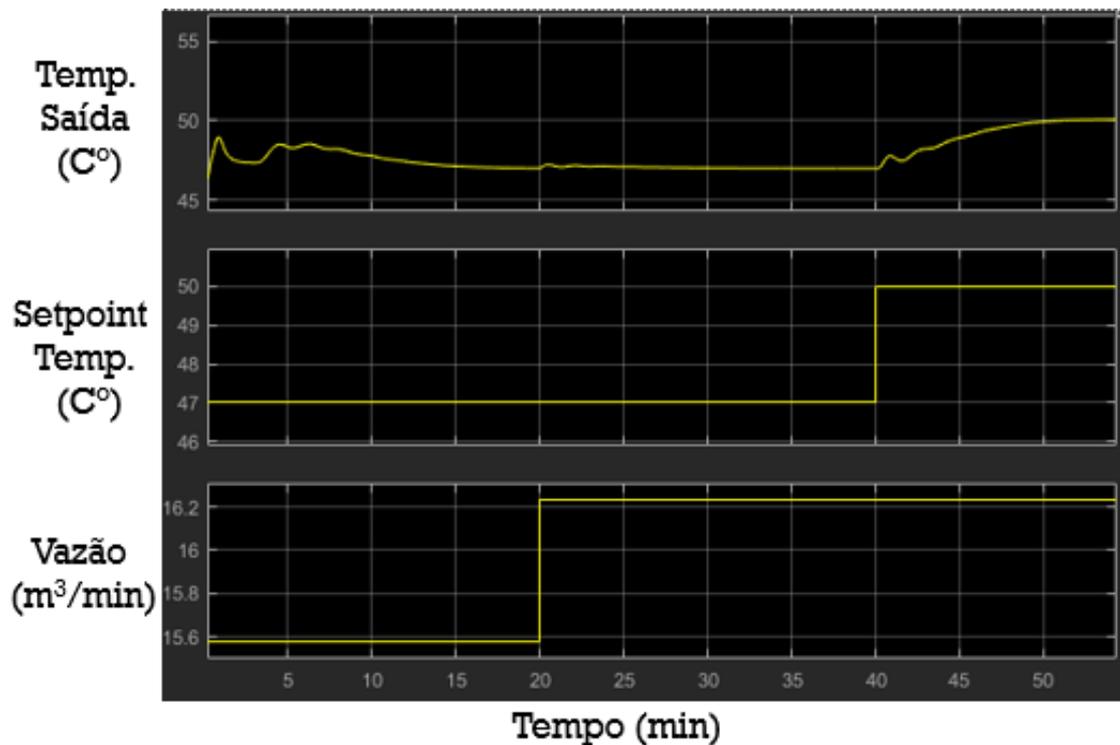
Para cada condição ótima encontrada acima foi feito um ensaio para verificar a eficácia do controle a uma perturbação na vazão de alimentação e para a mudança de setpoint, conforme mostram os gráficos abaixo:

Figura 80 – Gráfico de avaliação do controle de temperatura no P-1223002.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 81 – Gráfico de avaliação do controle de temperatura no P-1223005.



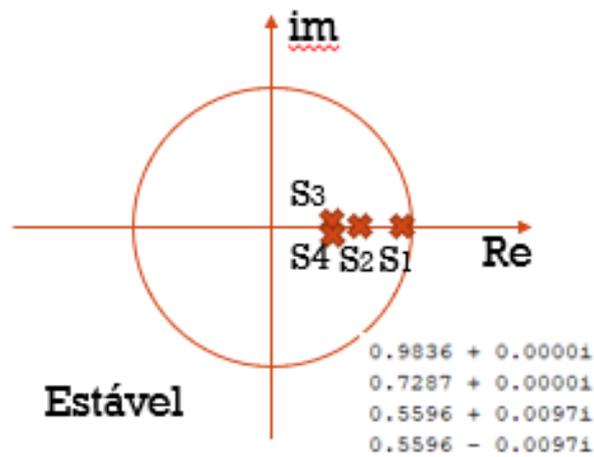
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Percebe-se que os controles acima mostrados apresentam pequenas variações no modo regulatório e rápida resposta no modo servo para uma perturbação na corrente de alimentação de 4% e uma mudança no setpoint, conforme mostrado em cada caso.

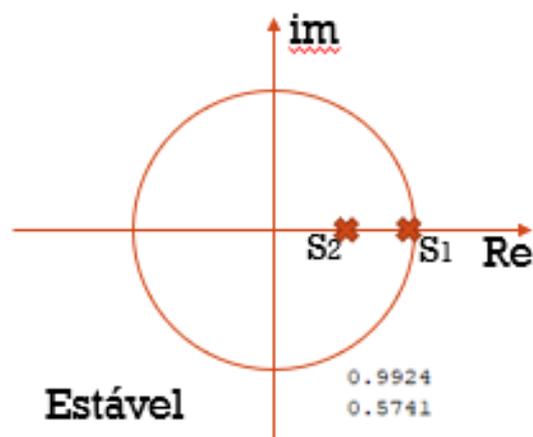
Vale salientar que a estabilidade de cada caso também foi estudada, onde foi feita a transformada Z da função, aplicada na função da malha de controle no domínio Z com a taxa de aquisição definida para o data hold de ordem 0, após ser encontrado o lugar das raízes, foi utilizado o critério de Routh-Hurwitz, conforme demonstrado abaixo, na figura 82, com estabilidade garantida para as duas malhas:

Figura 82 – Gráfico de avaliação do controle de temperatura no P-1223002.

Modo Servo – Malha fechada.

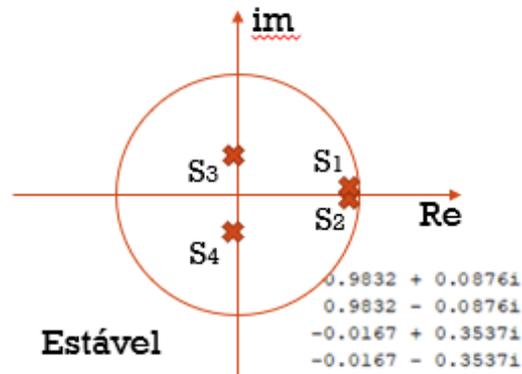
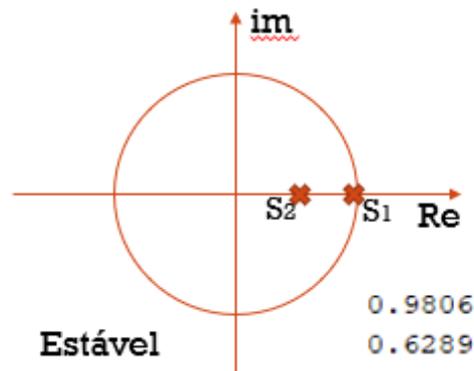


Modo Servo – Malha Aberta.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 83 – Gráfico de avaliação do controle de temperatura no P-1223005.

Modo Servo – Malha fechada.**Modo Servo – Malha Aberta.**

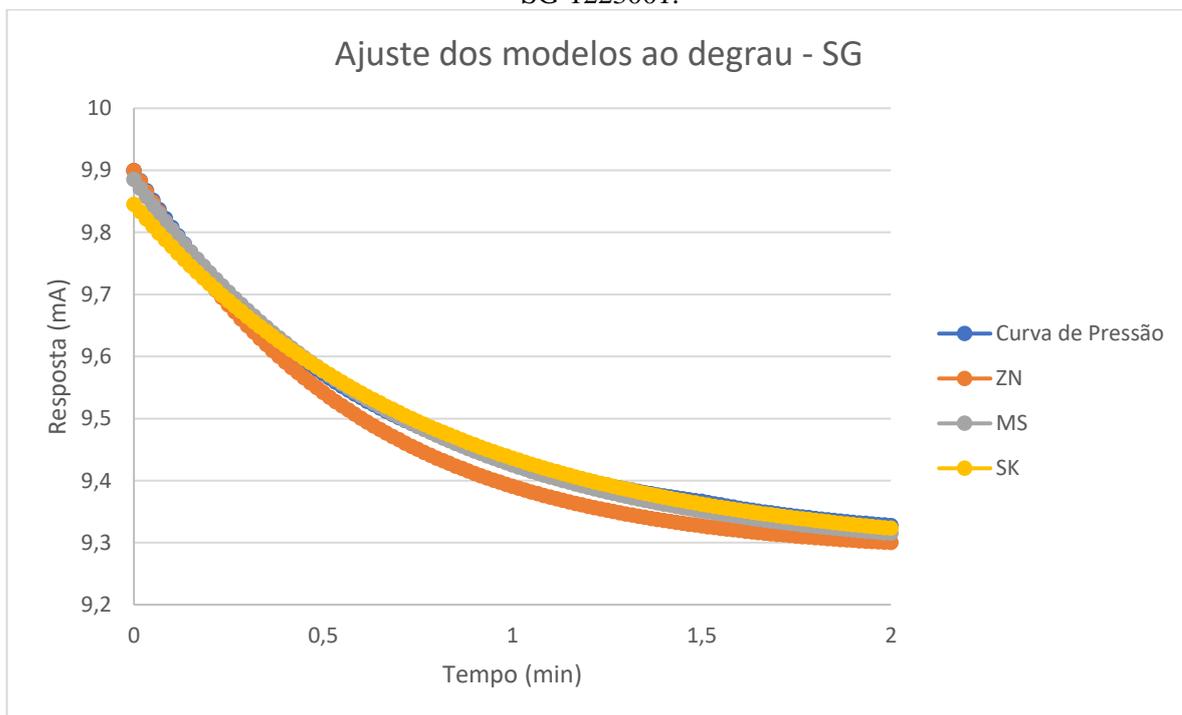
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

4.2.2 Do controle de pressão

Para implantação do controle de pressão no SG-1223001, V-TO-1223001 e V-TO-1223002 se fez necessário realizar um ensaio em malha aberta com perturbação do tipo degrau igual ao incremento de 0,48 mA na saída do controlador a fim de avaliar no medidor de pressão a sua deformação ao degrau e, com isso, ser possível fazer a análise do comportamento do processo pelas curvas de Ziegler Nichols (ZN), Método de Smith (MS) e Sundaresan e Krishnaswamy (SK) ao definir K_p , θ e τ para cada caso.

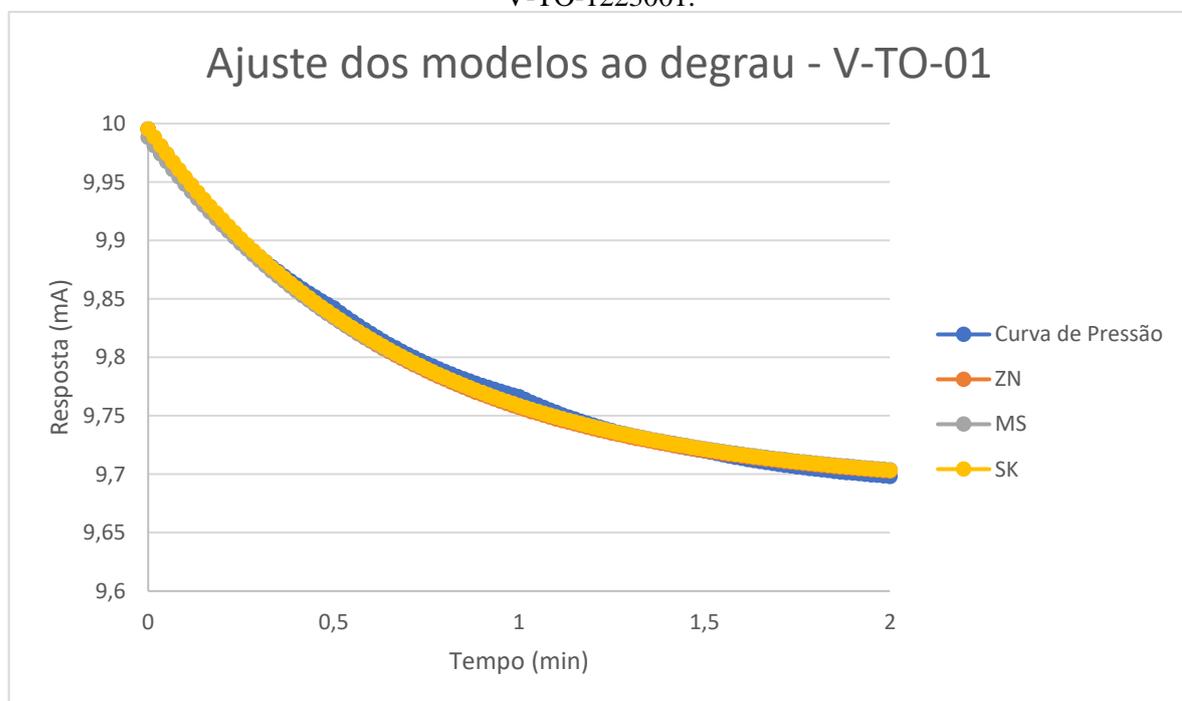
Abaixo seguem os gráficos que mostram a correta utilização dos métodos na aferição da curva de resposta dada a aderência aos resultados para cada equipamento:

Figura 84 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o SG-1223001.



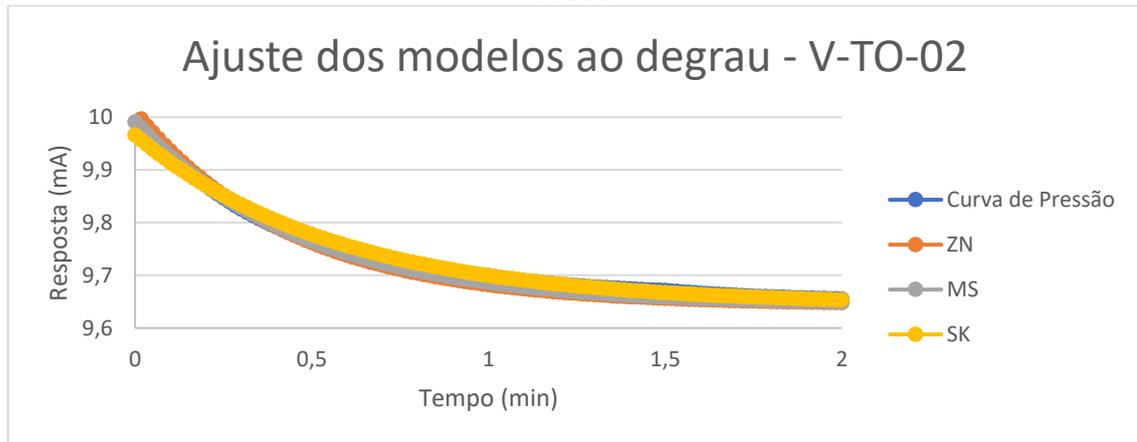
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 85 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o V-TO-1223001.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 86 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA no controlador para o V-TO-1223002.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A partir daí, foi feito o cálculo das sintonias possíveis para controle dessas variáveis e escolhidos para testes aqueles que tinham valor coerente com as premissas de controle do método. Ao final, foi aplicada a sintonia na simulação e avaliados os indicadores de desempenho para uma perturbação de 4% na vazão de alimentação e 2,6% no setpoint em uma simulação de 50 minutos. Para cada combinação de método de análise de curva de resposta junto a sintonia mais adequada foi feito um ensaio, onde nas tabelas abaixo são mostrados os resultados encontrados e qual sintonia foi a escolhida (taxada em amarelo).

Tabela 20: Tabela de sintonias possíveis de pressão e indicadores de desempenho para o SG-1223001.

AJUSTE DE RESPOSTA EM MALHA ABERTA	SINTONIZADO POR	Modo	IAE	ISE	ITAE	ITSE	CE
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,198	0,066	0,089	0,0088	0,0077
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,078	0,006	0,054	0,0022	0,008
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau_c)$	Servo	0,218	0,075	0,128	0,0099	0,0077
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau_c)$	Regulatório	0,125	0,011	0,108	0,0058	0,0078
Método de Smith	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,194	0,065	0,081	0,0092	0,0088
Método de Smith	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,064	0,005	0,039	0,0015	0,0082
Método de Smith	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau_c)$	Servo	0,208	0,071	0,112	0,0092	0,0077
Método de Smith	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau_c)$	Regulatório	0,101	0,0085	0,079	0,0038	0,0078
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,496	0,1854	0,4418	0,0577	0,0073
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,3173	0,0482	0,3831	0,0387	0,0077
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau_c)$	Servo	1,526	0,2903	6,821	0,5123	0,0072
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau_c)$	Regulatório	2,326	0,5029	12,13	1,474	0,077

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 21: Tabela de sintonias possíveis de pressão e indicadores de desempenho para o V-TO-1223001.

AJUSTE DE RESPOSTA EM MALHA ABERTA	SINTONIZADO POR	Modo	IAE	ISE	ITAE	ITSE	CE
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,555	0,101	0,944	0,069	0,042
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,693	0,1017	1,66	0,161	0,49
Método de Smith	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,2912	0,07	0,179	0,023	0,043
Método de Smith	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,3479	0,051	0,420	0,0516	0,049
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,289	0,069	0,178	0,023	0,043
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,3422	0,05	0,409	0,05	0,049

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 22: Tabela de sintonias possíveis de pressão e indicadores de desempenho para o V-TO-1223002.

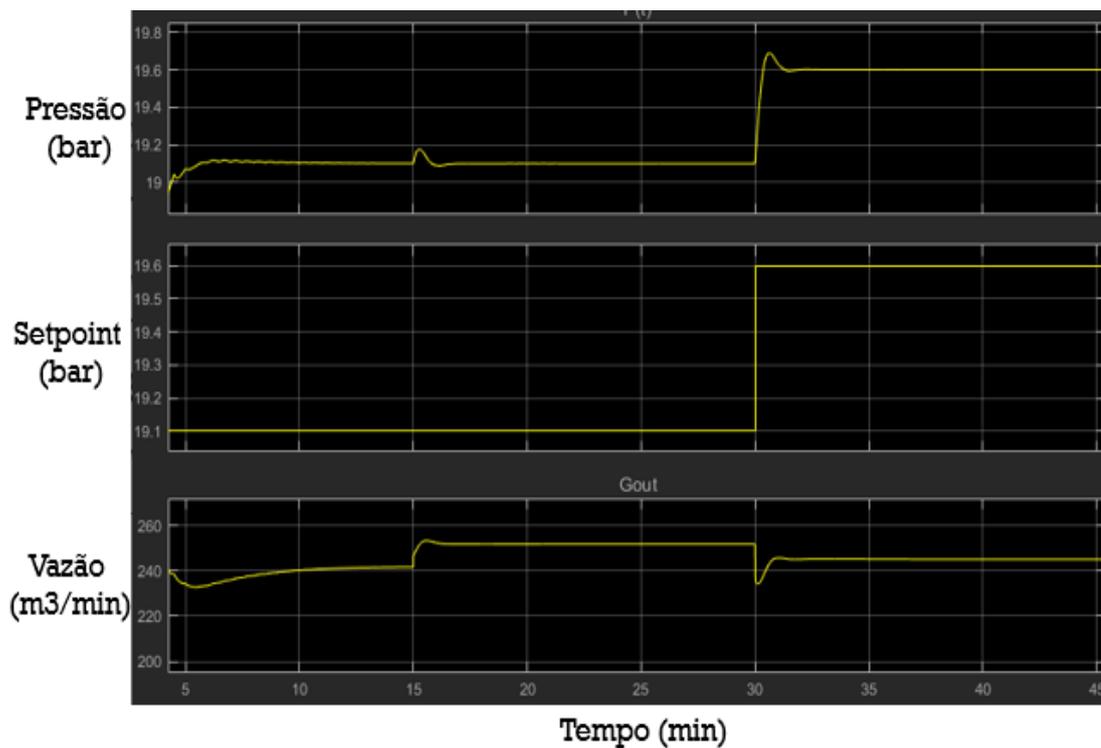
AJUSTE DE RESPOSTA EM MALHA ABERTA	SINTONIZADO POR	Modo	IAE	ISE	ITAE	ITSE	CE
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,149	0,031	0,1051	0,00475	0,086
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,166	0,0222	0,122	0,01	0,05
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau_c)$	Servo	0,2177	0,041	0,167	0,011	0,083
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau_c)$	Regulatório	0,311	0,044	0,348	0,0337	0,0496
Método de Smith	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,1542	0,031	0,11	0,0051	0,086
Método de Smith	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,178	0,024	0,136	0,012	0,05
Método de Smith	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau_c)$	Servo	0,2338	0,043	0,194	0,012	0,083
Método de Smith	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau_c)$	Regulatório	0,3349	0,048	0,399	0,049	0,038
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,2096	0,0286	0,18	0,016	0,05
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,166	0,0337	0,119	0,006	0,084
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau_c)$	Servo	0,278	0,047	0,28	0,0165	0,084
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau_c)$	Regulatório	0,3998	0,057	0,56	0,052	0,049

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Pode-se notar que, como a resposta a perturbação para o controle de pressão é rápida, então, precisamos de um tempo de aquisição pequeno, no caso ficou em 1 segundo, e, mesmo assim, a resposta praticamente não apresenta tempo morto, porém, garante que não se tenha aleasing na aquisição da curva.

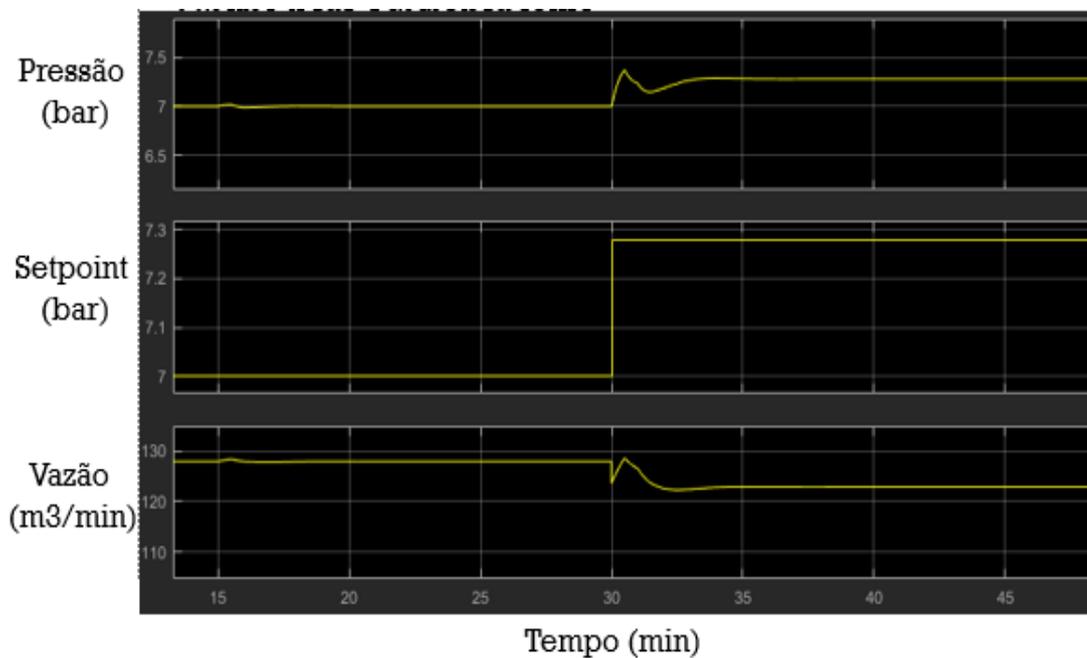
Para cada condição ótima encontrada acima foi feito um ensaio para verificar a eficácia do controle a uma perturbação na vazão de alimentação e para a mudança de setpoint, conforme mostrado nos gráficos abaixo:

Figura 87 – Gráfico de avaliação do controle de pressão no SG-1223001.



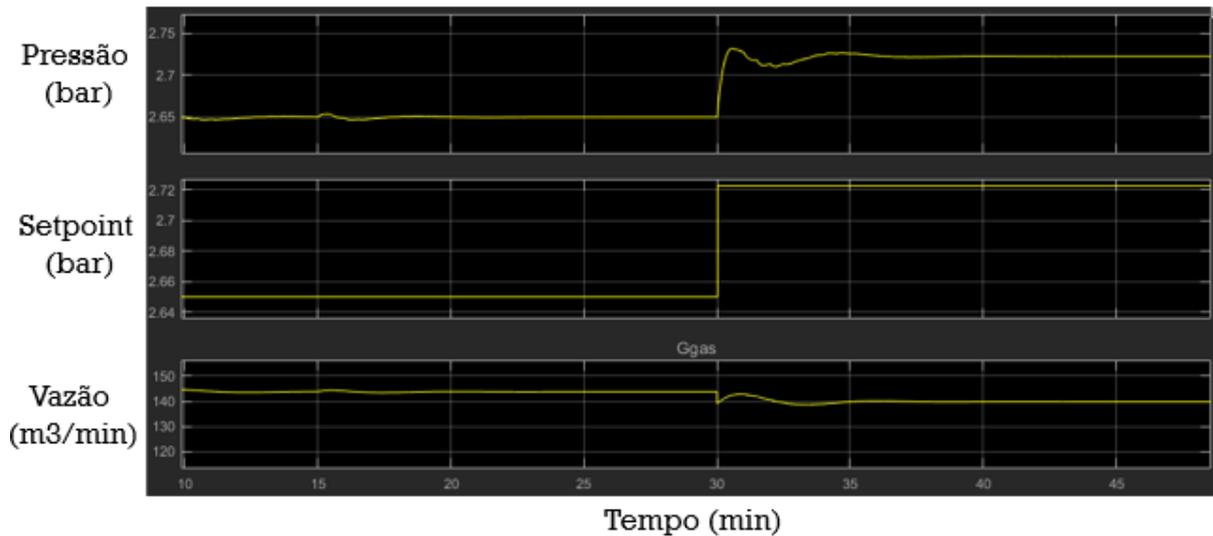
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 88 – Gráfico de avaliação do controle de pressão no V-TO-1223001.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 89 – Gráfico de avaliação do controle de pressão no V-TO-1223002.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Percebe-se que os controles acima mostrados apresentam pequenas variações no modo regulatório e rápida resposta no modo servo para uma perturbação na corrente de alimentação de 4% e uma mudança no setpoint, conforme mostrado em cada caso. Esses resultados estão de acordo com os resultados encontrados por Soares (2019) em seu trabalho em relação ao comportamento das curvas e modos de controle, já em relação a estabilidade do processo e desempenho, os resultados apresentados estão de acordo com o apresentado por Muñoz (2018).

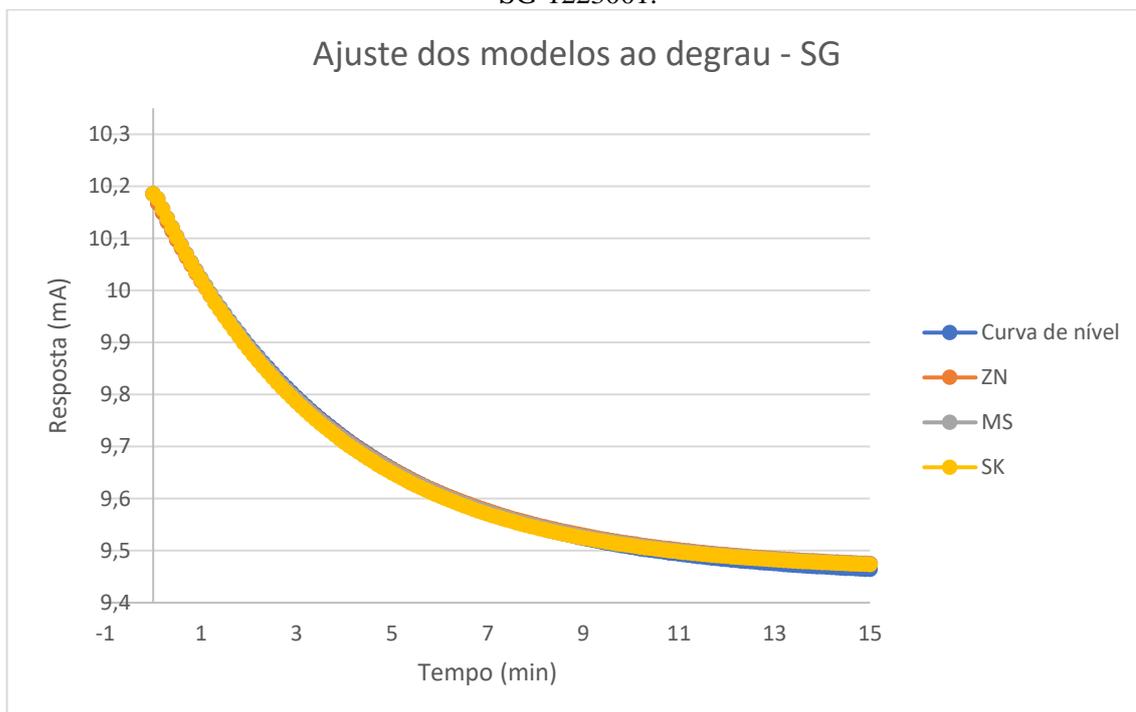
Vale salientar que a estabilidade de cada caso também foi estudada. Como praticamente não existe tempo morto para o caso de pressão, então, usou-se a análise de estabilidade por meio do Ultimate Gain, onde todos os K_c projetados estão dentro da faixa de $0,45K_{CU}$.

4.2.3 Do controle de nível/interface

Para implantação do controle de interface no SG-1223001, V-TO-1223001 e V-TO-1223002 se fez necessário realizar um ensaio em malha aberta com perturbação do tipo degrau igual ao incremento de 0,48 mA na saída do controlador a fim de avaliar no sensor de nível a sua deformação ao degrau e, com isso, ser possível fazer a análise do comportamento do processo pelas curvas de Ziegler Nichols (ZN), Método de Smith (MS) e Sundaresan e Krishnaswamy (SK) ao definir K_p , θ e τ para cada caso.

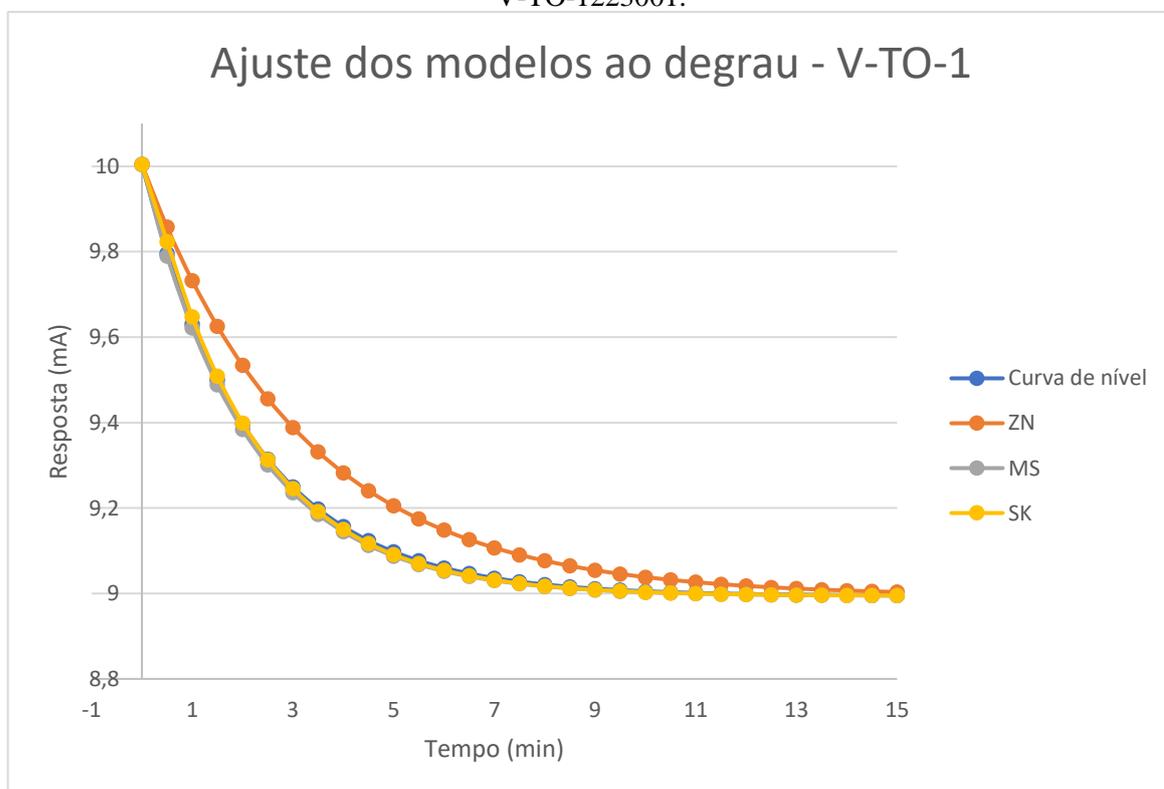
Abaixo seguem os gráficos que mostram a correta utilização dos métodos na aferição da curva de resposta dada a aderência aos resultados para cada equipamento:

Figura 90 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o SG-1223001.



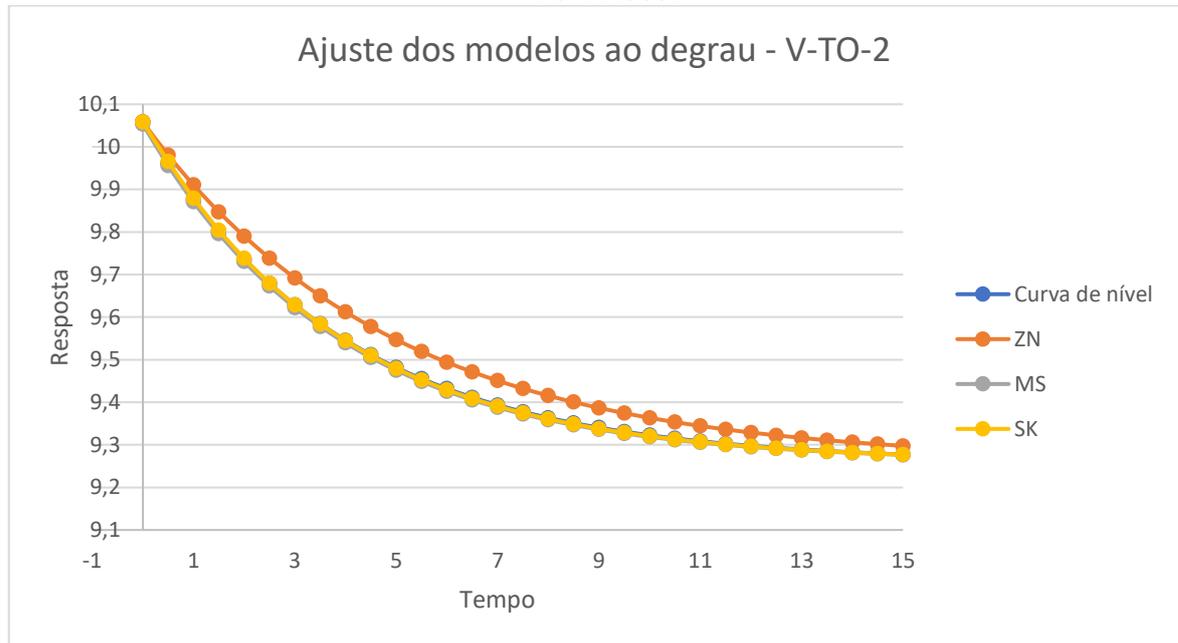
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 91 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o V-TO-1223001.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 92 – Ajuste dos modelos ao incremento em degrau de 0,48 mA na saída do controlador para o V-TO-1223002.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A partir desse momento, foi feito o cálculo das sintonias possíveis para controle dessas variáveis e escolhidos para testes aqueles que tinham valor coerente com as premissas de controle do método, por exemplo, para o SIMC são avaliados os τ_i e τ_c pertinentes a técnica. Ao final, foi aplicada a sintonia na simulação e avaliados os indicadores de desempenho para uma perturbação de 4% na vazão de alimentação e 5% no setpoint em uma simulação de 50 minutos. Para cada combinação de método de análise de curva de resposta junto a sintonia mais adequada foi feito um ensaio, onde nas tabelas abaixo são mostrados os resultados encontrados e qual sintonia foi a escolhida (taxada em amarelo).

Tabela 23: Tabela de sintonias possíveis de nível e indicadores de desempenho para o SG-1223001.

AJUSTE DE RESPOSTA EM MALHA ABERTA	SINTONIZADO POR	Modo	IAE	ISE	ITAE	ITSE	CE
Ziegler e Nichols	IMC	Servo	0,754	0,2	1,35	0,148	0,0063
Ziegler e Nichols	IMC	Regulatório	0,072	0,0014	0,14	0,0022	0,0037
Método de Smith	IMC	Servo	0,755	0,2	1,36	0,149	0,0063
Método de Smith	IMC	Regulatório	0,071	0,0014	0,14	0,0022	0,0037
Undaresan e Krishnaswam	IMC	Servo	0,756	0,2	1,36	0,151	0,0063
Undaresan e Krishnaswam	IMC	Regulatório	0,069	0,0014	0,14	0,0021	0,0038

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 24: Tabela de sintonias possíveis de nível e indicadores de desempenho para o V-TO-1223001.

AJUSTE DE RESPOSTA EM MALHA ABERTA	SINTONIZADO POR	Modo	IAE	ISE	ITAE	ITSE	CE
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,641	0,276	0,514	0,158	0,0043
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,042	0,0019	0,045	0,0015	0,0031
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau c)$	Servo	0,503	0,202	0,3897	0,0667	0,0043
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau c)$	Regulatório	0,054	0,0021	0,078	0,0034	0,0019
Método de Smith	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	2,35	0,725	11,91	1,812	0,045
Método de Smith	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,759	0,0797	4,024	0,2205	0,088
Método de Smith	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau c)$	Servo	0,536	0,226	0,346	0,095	0,0044
Método de Smith	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau c)$	Regulatório	0,035	0,002	0,031	0,0014	0,0031
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	1,334	0,455	3,296	0,579	0,0045
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,1052	0,0031	0,277	0,0045	0,0033
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau c)$	Servo	0,508	0,2038	0,377	0,073	0,0045
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=4(\theta+\tau c)$	Regulatório	0,05	0,002	0,059	0,0017	0,003

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

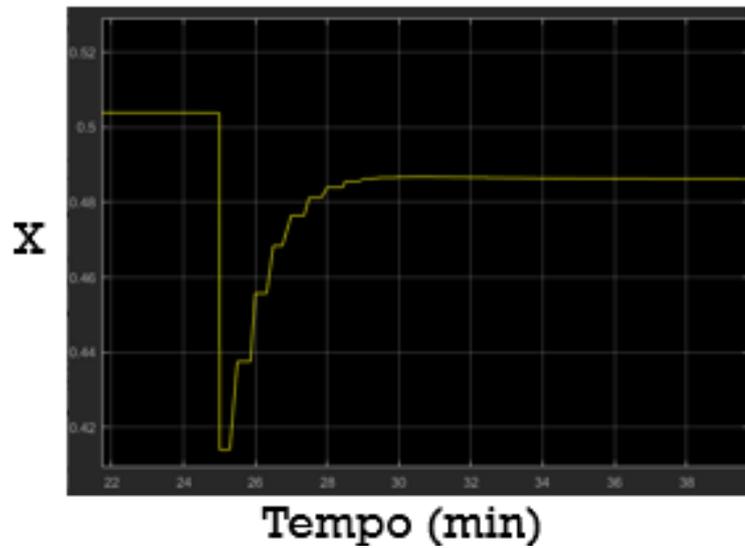
Tabela 25: Tabela de sintonias possíveis de nível e indicadores de desempenho para o V-TO-1223002.

AJUSTE DE RESPOSTA EM MALHA ABERTA	SINTONIZADO POR	Modo	IAE	ISE	ITAE	ITSE	CE
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,7377	0,2437	1,071	0,1498	0,0047
Ziegler e Nichols	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,1463	0,0076	0,275	0,0114	0,0035
Método de Smith	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,8199	0,2661	1,332	0,2	0,0047
Método de Smith	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,1379	0,0068	0,272	0,0097	0,0036
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=\tau$	Servo	0,8162	0,2654	1,319	0,1985	0,0047
Sundaresan e Krishnaswamy	SIMC $\tau_i=\tau$	Regulatório	0,1378	0,0068	0,27	0,0097	0,0036

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Nota-se que, como a resposta a perturbação para o controle de nível é lenta, então, podemos ter um tempo de aquisição maior, no caso, ficou em 30 segundos, como pode ser visto nos gráficos abaixo, e, mesmo assim, a resposta praticamente não apresenta tempo morto, porém, garante que não se tenha aleasing na aquisição da curva.

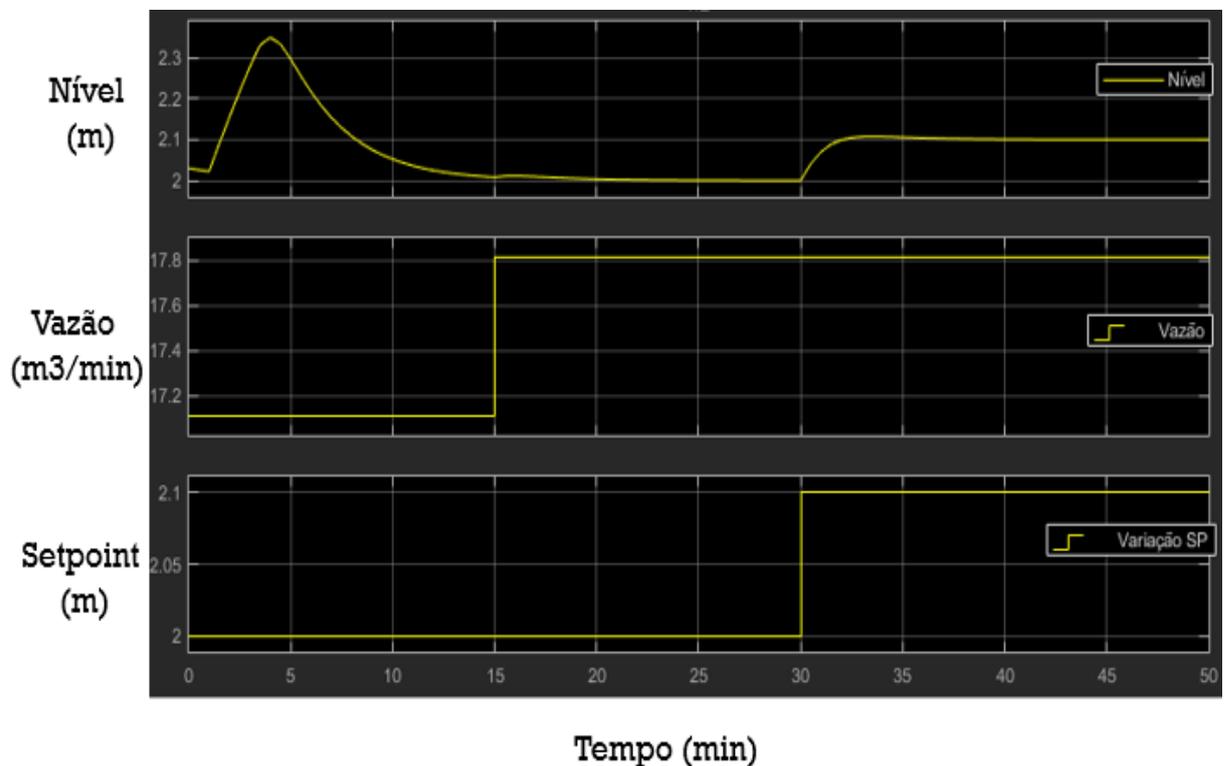
Figura 93 – Gráfico da posição da válvula em função do tempo para uma perturbação no SG-1223001.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

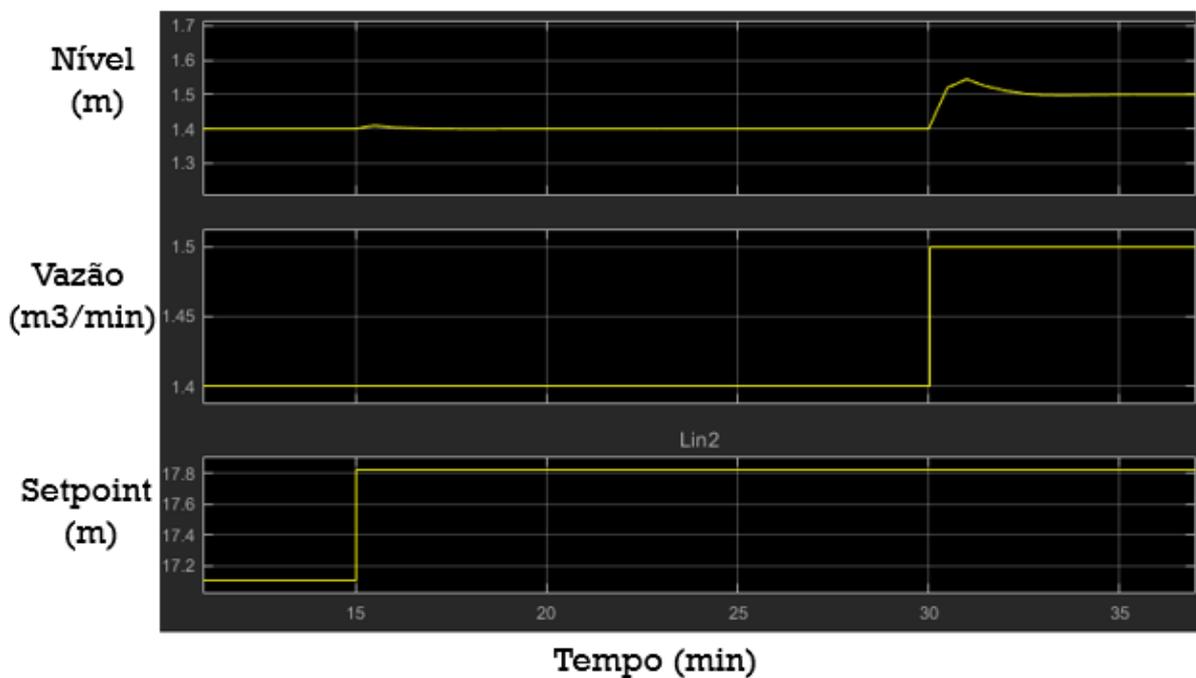
Para cada condição ótima encontrada acima foi feito um ensaio para verificar a eficácia do controle a uma perturbação na vazão de alimentação e para a mudança de setpoint, conforme mostrado nos gráficos abaixo:

Figura 94 – Gráfico de avaliação do controle de nível no SG-1223001.



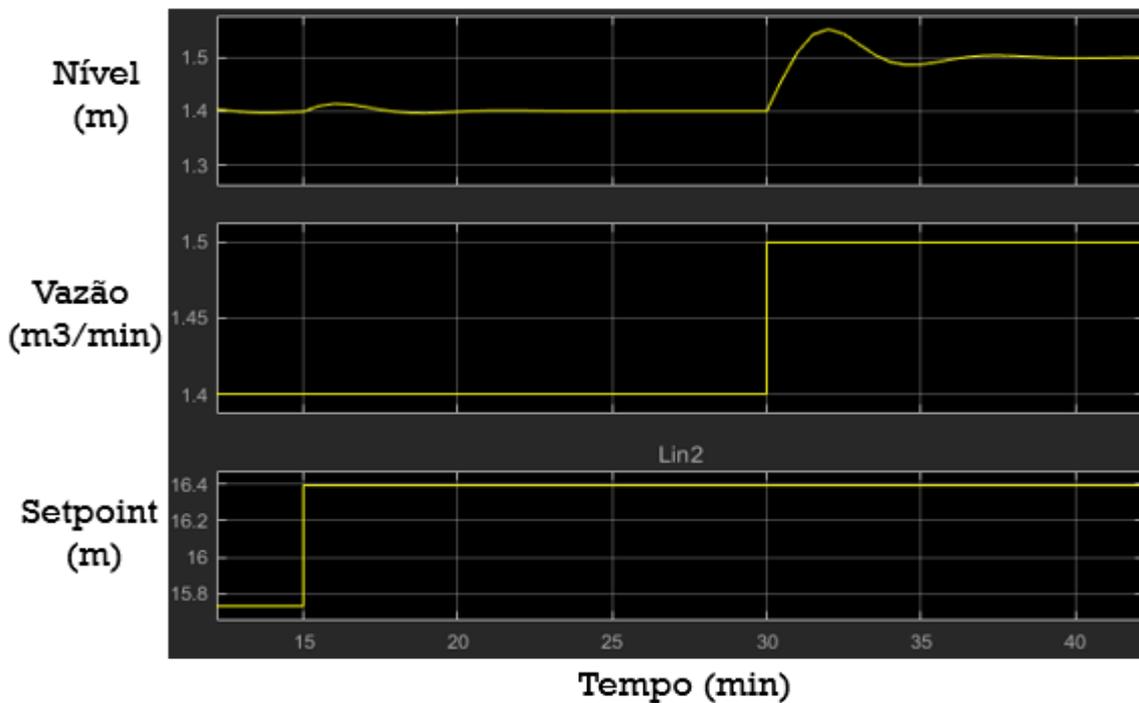
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 95 – Gráfico de avaliação do controle de nível no V-TO-1223001.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 96 – Gráfico de avaliação do controle de nível no V-TO-1223002.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

É possível verificar que os controles acima mostrados apresentam pequenas variações no modo regulatório e rápida resposta no modo servo para uma perturbação na corrente de

alimentação de 4% e uma mudança no setpoint, conforme mostrado em cada caso. Os resultados apresentados acima estão de acordo com o apresentado por Silva (2013) em relação a comportamento, estabilidade do processo e desempenho. Também foram realizados ensaios com perturbações que simulam a condição de altas ondas, de acordo com os estudos realizados por Matsumoto (2014) e Martins (2017), com perturbações que chegaram até 2,9 m de nível e o controle se mostrou eficaz.

Como praticamente não existe tempo morto para o caso do nível nessa condição de tempo de aquisição de 30 segundos, então, usou-se a análise de estabilidade por meio do Ultimate Gain, onde todos os Kc projetados estão dentro da faixa de $0,45K_{CU}$.

4.3 ESTUDO DE REDES NEURAIS PARA DETERMINA AS VAZÕES DE PRODUÇÃO DOS POÇOS A PARTIR DAS CONDIÇÕES IMPOSTAS NOS CHOKES DE PRODUÇÃO

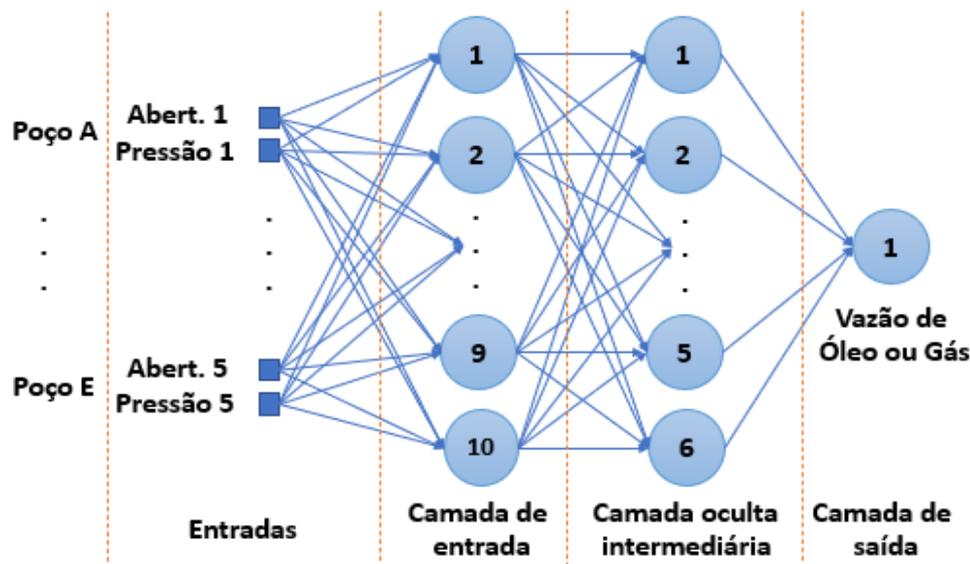
Como já descrito anteriormente, os poços produzem em função da sua pressão de cabeça e da abertura da válvula choke de controle de superfície. Como o controle da abertura do choke ocorre em malha aberta e ainda não se tem medição individual da produção por poço de forma contínua, logo, necessita-se de um mecanismo de aferição do potencial desses poços para implantação do controle em malha fechada de vazão dos poços. Nesse contexto, foram criadas 2 redes neurais para aferição da vazão, uma para o gás e outra para o óleo, provenientes dos poços, que foram treinadas a partir de um conjunto de 1200 dados de produção coletadas no sistema de informação da produção da plataforma. Nota-se que essa proposta é bem diferente do que foi proposto por Campos (2003) que só veio a utilizar redes neurais para controle de qualidade e não para inferência de informações que foram utilizadas para controle de processo.

Já Taifu *et al.* (2013) traz o uso de redes neurais com algoritmos genéticos para otimização energética de bombeamento de petróleo, mas não alinha isso ao processamento primário e a funções de controle de poços para obtenção da estabilidade do processo, assim também diferindo dessa proposta.

São 5 poços, intitulados de poços A, B, C, D e E, que hoje se alternam para produzir o potencial da plataforma, sendo assim, são 10 entradas que formam as entradas da rede neural, no caso, 5 informações de pressão e 5 informações de abertura dos chokes, um par de informações para cada poço. Com isso, já temos a premissa de ter uma camada de entrada de 10 neurônios, sendo esses neurônios do tipo de função de ativação linear, que é o recomendado

quando queremos fazer regressão de dados em RNA. Ao final temos 2 saídas, uma para cada rede, fazendo com que se chegue ao cálculo inicial da camada oculta intermediária de 6 neurônios ao considerar a recomendação de que o número de camadas na camada intermediária é a média entre as entradas e saídas de uma rede (SILVA, 2010). Com isso, vamos ter uma RNA para cálculo da vazão de óleo e outra para o cálculo da vazão de gás, de acordo com a topologia mostrada na figura abaixo. Vale salientar que preferiu-se gerar duas RNAs de uma saída ao invés de uma RNA com 2 saídas para reduzir o número de camadas escondidas e, com isso, tirar o problema da área de deep learning para o universo do machine learning, situação essa mais simples de se trabalhar, já que, quanto maior o número de saídas propostas para uma RNA maior a complexidade da rede para prever o seu comportamento, utilizando do mesmo conjunto de pesos sinápticos.

Figura 97 – Topologia de rede neural implantada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A camada oculta intermediária utiliza de neurônios sigmóides, aqueles que sua função de ativação usa a função sigmoide, pois consegue dar maior não linearidade ao processo de regressão com os pesos sinápticos a fim de diminuir o erro de forma mais rápida. Não foram utilizadas funções da família ReLU, pois os dados de entrada e saída da rede foram normalizados de 0 a 1, sendo o 1 o maior valor encontrado para aquela classe de dados, sendo assim, não tem sentido em falar na calda negativa que as funções ReLU e suas variações trazem de ganho na regressão. No neurônio de saída foi utilizado a função linear, pois é o que é

recomendado para problemas de regressão, e para melhorar a precisão do cálculo dos pesos foi utilizado algoritmo do tipo backpropagation.

Fazendo variações na learning rate, taxa de momento e número de épocas previstas se chegou ao resultado das figuras abaixo para as redes, tendo como critério de parada o atingimento do erro menor que 10^{-4} .

Figura 98 – Erro da rede neural na aprendizagem e número de épocas da RNA do cálculo da vazão de óleo.

```
Épocas: 700
Erro: 0.00012036629025785943
Épocas: 710
Erro: 0.00014188794037501074
Épocas: 720
Erro: 0.00016373210627343237
Épocas: 730
Erro: 0.00016674348519989763
Épocas: 740
Erro: 0.00012952697650976398
Épocas: 750
Erro: 0.00011508603617726728
Épocas: 760
Erro: 9.632655135260853e-05
```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 99 – Erro da rede neural na aprendizagem e número de épocas da RNA do cálculo da vazão de gás.

```
Épocas: 380
Erro: 0.00011805594798235763
Épocas: 390
Erro: 0.00011426004974716454
Épocas: 400
Erro: 0.0001125668830565727
Épocas: 410
Erro: 0.00011141514071322469
Épocas: 420
Erro: 0.00010152120437684626
Épocas: 430
Erro: 9.78202755618847e-05
```

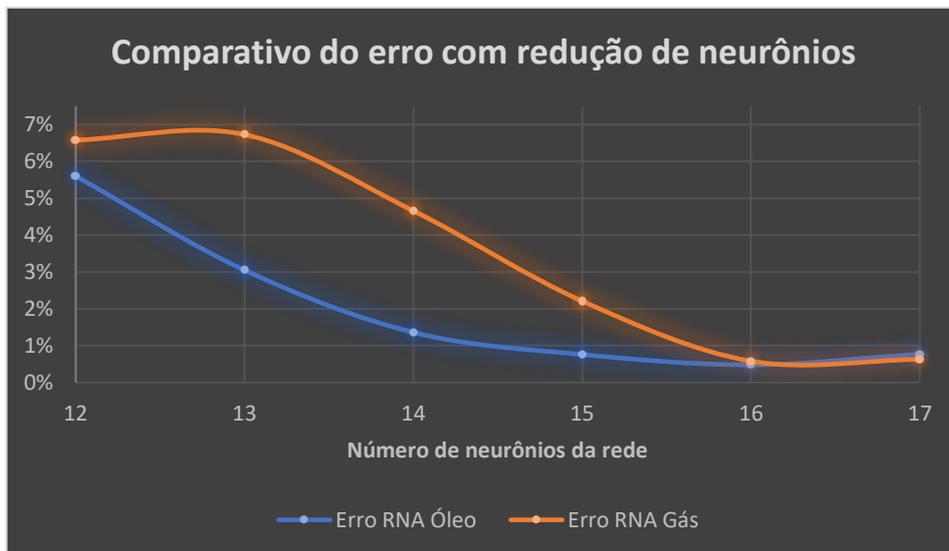
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Pode-se verificar que a convergência da rede de cálculo de vazão de gás ocorre de forma mais rápida que a rede para cálculo da vazão de óleo, isso se deve a maior variabilidade das informações do gás em relação a abertura dos poços que a de líquido, já que os poços produzem vazões relativas de gás mais diferentes do que as de óleo, que são valores mais próximos um do outro, o que dificulta a separação. Vale também salientar que foi feito o cálculo do erro com um banco de teste que representa 25% do número de amostras treinadas que levou ao erro de 0,0077 para a rede de óleo e 0,0063 para a rede de gás, valores excelentes quando comparados

ao que se consegue na prática com outros métodos. Vale salientar que esses resultados estão alinhados com os encontrados por Hassan (2019) em relação ao método e valor do erro.

Para garantir que a rede criada não tenha overfittin foi gerado o gráfico abaixo, o qual relaciona o erro na predição do conjunto de teste com o número de neurônios totais da rede a partir da utilização de dropout. Nota-se que a topologia indicada pode ter a redução de um neurônio em sua camada escondida já que apresenta erro do conjunto de amostra de teste menor com 16 neurônios do que com 17. Já o underfitting não ocorre devido ao baixo erro conseguido com a rede, mesmo com mais de 40 simulações realizadas para avaliação, chegando a uma média de erro de 0.00489 para a rede de óleo e 0.00538 para a rede de gás, já considerando o uso de 16 neurônios.

Figura 100 – Redução do número de neurônios da rede em função do erro da amostra de teste.



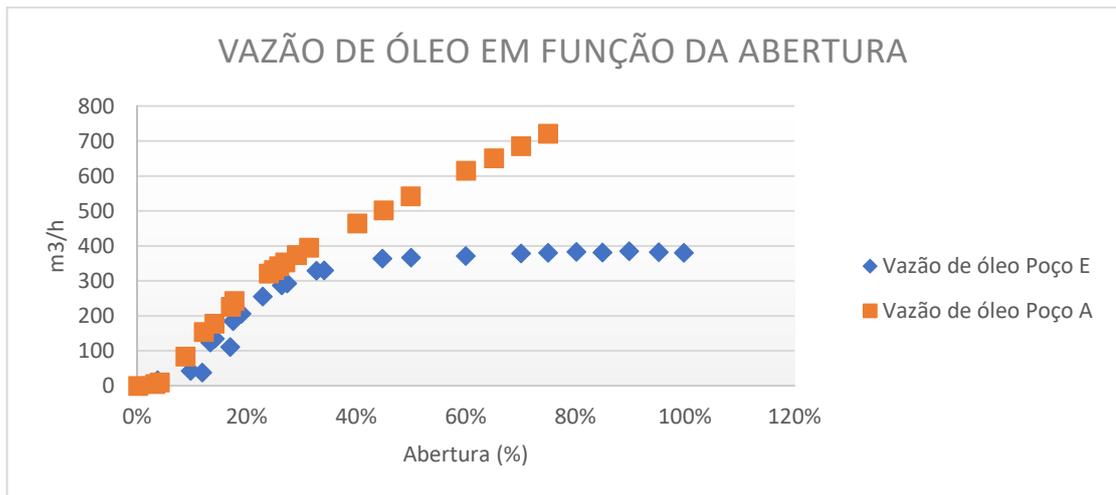
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Com a rede otimizada, agora pode-se analisar os resultados de predição de vazão de óleo e gás por poço. As redes foram utilizadas para predição da vazão individual por poço com base na fixação das condições de pressão e abertura de choke dos poços não alvos de análise com a variação da abertura do choke para o poço em análise dentro do range de aberturas que já ocorreram para o poço na prática e consideradas no conjunto de dados de treinamento da rede, sendo esse procedimento alternado de forma a ter cada poço analisado sua vazão em função de sua abertura de choke com os outros pontos fixos. Com isso, obtiveram-se bons resultados para esse objetivo em 2 poços, poços A e E, como pode ser visto nos gráficos abaixo, já que esses poços estão com seus dados de abertura de choke em um bom range de análise, de 0 a 100% para o poço E e 0 a 80% para o poço A, dando, assim, um bom resultado para correlação e

quando comparado com os valores práticos, pois os perfis mostrados são próximos aos que se encontram nos testes de produção para os poços em alguns pontos de abertura. Verifica-se ainda que essa análise e resultado está de acordo com o que foi realizado por Barbosa (2017) em seu trabalho.

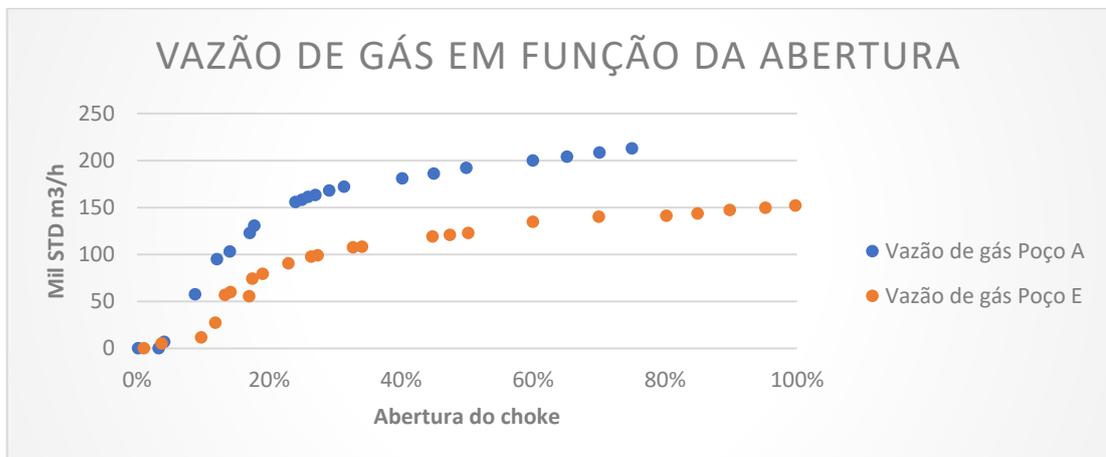
Os outros 3 poços, poços B, C e D, tem poucos dados de abertura em função do tempo, onde um deles, o poço D, por exemplo, só foi aberto até 13% do seu potencial, logo, apesar dos dados de resposta da rede serem coerentes até os 13%, não se tem como usar essas informações para controle dentro da faixa desejada para esse projeto, assim, não focando na análise desses poços e deixando-os com abertura fixa. Abaixo, pode-se ver o gráfico gerado para o poço D e a desconformidade nos dados:

Figura 101 – Vazão de óleo de dois poços em função da abertura do choke gerado pela RNA de óleo.



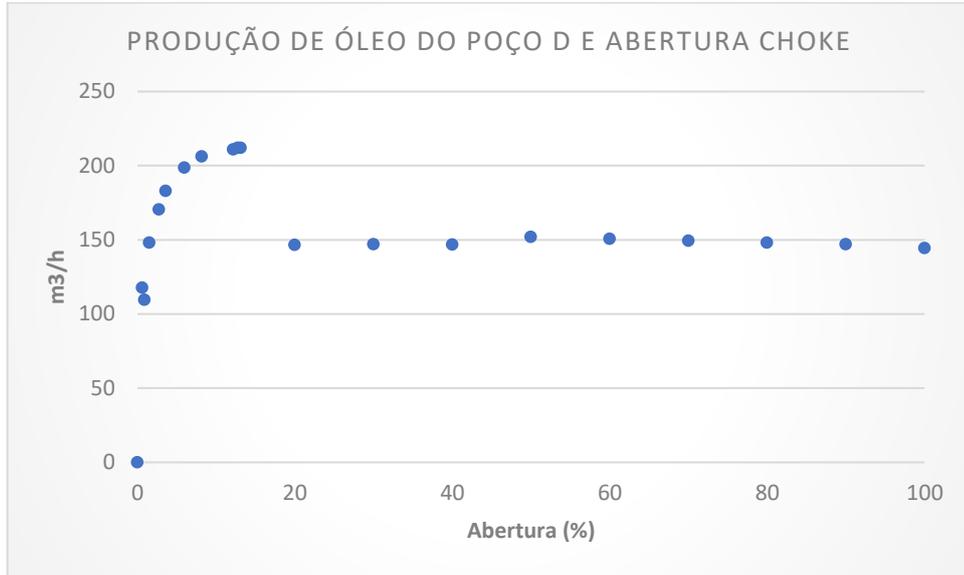
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 102 – Vazão de gás de dois poços em função da abertura do choke gerado pela RNA de gás.



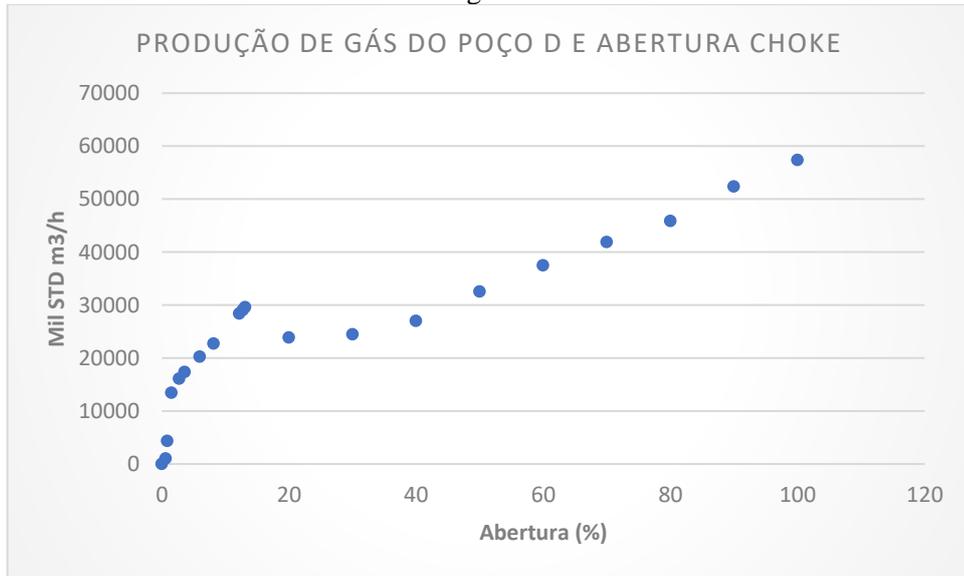
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 103 – Vazão de óleo previsto do poço D em função da abertura do choke gerado pela RNA de óleo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 104 – Vazão de gás previsto do poço D em função da abertura do choke gerado pela RNA de gás.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Com os dados apresentados foi possível gerar as correlações entre as aberturas das válvulas e a produção dos poços A e E a fim de utilizá-las para controle da vazão da unidade.

Ainda foi avaliado se as redes utilizadas possuíam pontos de mínimos e máximos locais que gerassem interpretações diferentes das que foram expostas acima, para isso, foram realizados 20 ensaios com a inicialização randômica dos pesos sinápticos e bias para diferentes taxas de momentos e learning rate a fim de avaliar se eram encontradas respostas diferentes,

sendo verificado que a variação entre os dados finais não passava de 7% dos apresentados aqui, validando assim que as informações não foram avaliadas sobre pontos de máximos e mínimos locais e sim no ponto ótimo global. Vale salientar que esses resultados estão alinhados com os encontrados por Hassan (2019) com respeito ao patamar de erro em relação aos dados reais quando aplicada a rede a um conjunto de dados de teste, corroborando com os resultados dessa pesquisa.

Outro ponto é que, caso os poços venham a produzir água no futuro, as redes podem ser retreinadas para considerar os percentuais produzidos.

4.4 CONTROLADOR FUZZY PID DE AJUSTE DE ABERTURA DOS CHOKES DOS POÇOS POR REDES NEURAIIS

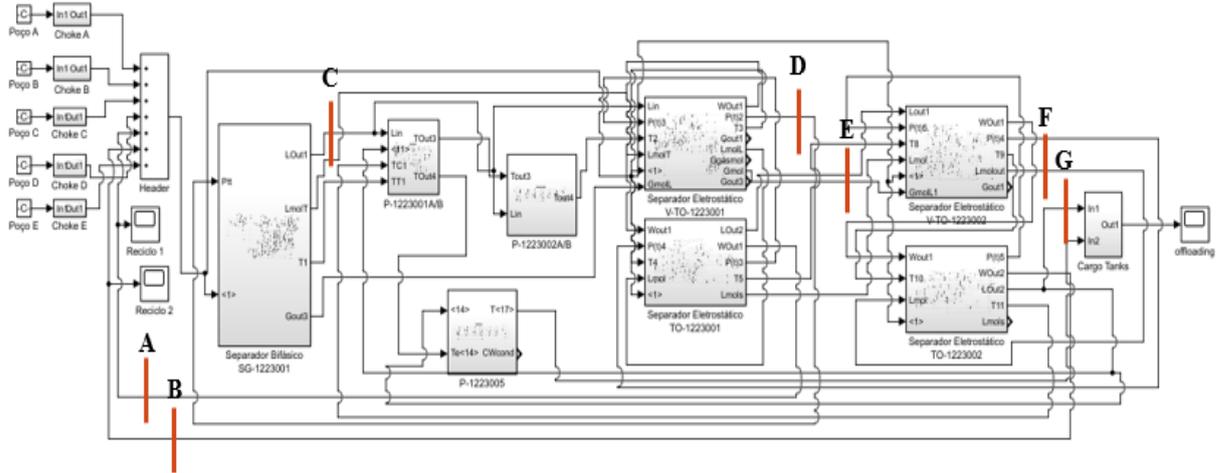
Como já afirmado, os poços marítimos têm suas aberturas controladas de forma manual a partir do acionamento de uma botoeira que abre pneumáticamente a válvula choke do poço e, com isso, aumenta a sua vazão. Como a resposta a variação da vazão depende do operador, então, temos momentos em que a vazão de operação da planta é menor que a nominal e, com isso, há perda de produção. Para essa situação é que foi criada a lógica neuro-fuzzy de controle proposta por esse trabalho para que, em minutos, seja recobrada a vazão nominal da planta, independente da perturbação ou mudança na estratégica de produção, ou até mesmo outra vazão desejada, de forma segura e a minimizar perdas.

Essa proposta é diferente do que foi proposto no trabalho de Campos (2016), pois ele propõe apenas a estabilização do controle de um poço em sua partida e nível de operação, enquanto a proposta aqui firmada é para o controle de toda a plataforma a partir do controle dos poços na fase de produção, dessa forma, podendo obter controle da produção da plataforma via setpoint definido pelo algoritmo genético. Vale salientar que o estudo feito por Campos (2016) também não levou em conta o dimensionamento/equacionamento da operação do poço via redes neurais e não teve o setpoint automatizado via estudo em algoritmos genéticos. Já Soares (2019) cita a utilização de controladores fuzzy para poços a fim de controlar a injeção de gás-lift, mostrando similaridade em relação a esse tópico por intervir no choke para controlar a vazão, porém, com distinção, por ser vazão de gás de injeção e não de produção, e sem utilizar as outras ferramentas de controle e inteligência artificial aqui presentes.

Quando ocorre uma perturbação na vazão de entrada da planta, cada ponto percebe e reage de forma e amplitude diferente. Logo, para avaliar o ponto onde vai ser implantado a

lógica neuro-fuzzy foi feita uma análise de sensibilidade em relação a vazão de líquido, pois quanto maior a amplitude, maior a incontroleabilidade. Para isso, foram escolhidos 7 pontos para análise de sensibilidade a fim de definir onde vai ser feita a leitura da variável controlada para viabilizar o controle. Abaixo, pode-se verificar os pontos analisados:

Figura 105 – Pontos de análise de sensibilidade para instalação do Controlador Fuzzy-PID com redes neurais.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Com o sistema em malha aberta foi feita uma perturbação na corrente de alimentação da planta em forma de degrau positivo de 4%, coletados os resultados e elaborada a seguinte tabela de sensibilidade.

Tabela 26: Sensibilidade dos pontos possíveis de controle de vazão com controle Fuzzy-PID.

Local	Ponto	Sensibilidade
Reciclo 1	A	0,156
Reciclo 2	B	0,964
Saída do SG-1223001	C	0,965
Saída do V-TO-1223001	D	0,929
Saída do TO-1223001	E	0,918
Saída do V-TO-1223002	F	0,846
Saída do TO-1223002	G	0,866

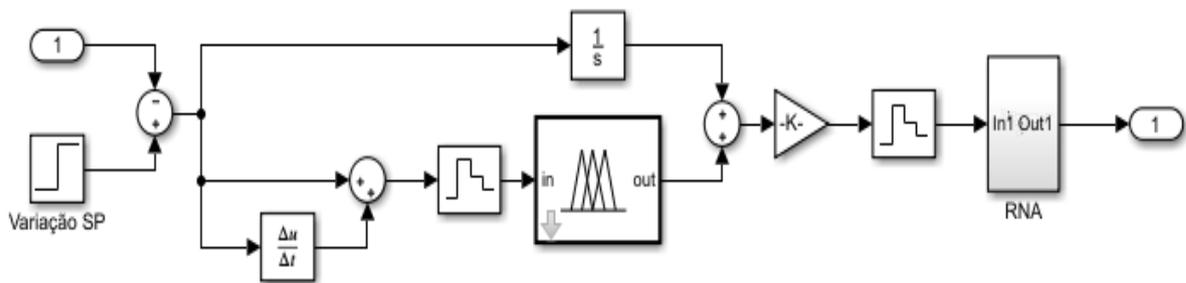
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Pode-se notar que na tabela acima o ponto que é mais sensível a variação de vazão é a saída do SG, logo, se ele for controlado pelo sistema fuzzy, então, temos também o controle

dos outros pontos, já que os outros pontos têm sensibilidade menor que ele e, por isso, será o ponto a ser usado no controle fuzzy-PID com redes neurais.

No item 4.3 já foi mostrado como a rede neural atuou e seus resultados, cabendo agora utilizar essas informações para viabilizar o controle da planta junto a lógica fuzzy de controle. É necessário utilizar um controlador fuzzy, pois o controle proposto de vazão passa por malhas de pressão, nível e temperatura, e interage com toda a planta. Dado que esse controle tem dinâmica complexa, então um PID convencional apresenta dificuldade de convergência e estabilização da vazão, algumas vezes até divergindo. A fim de resolver esse problema foi elaborado o esquema abaixo em Simulink para controle do processo.

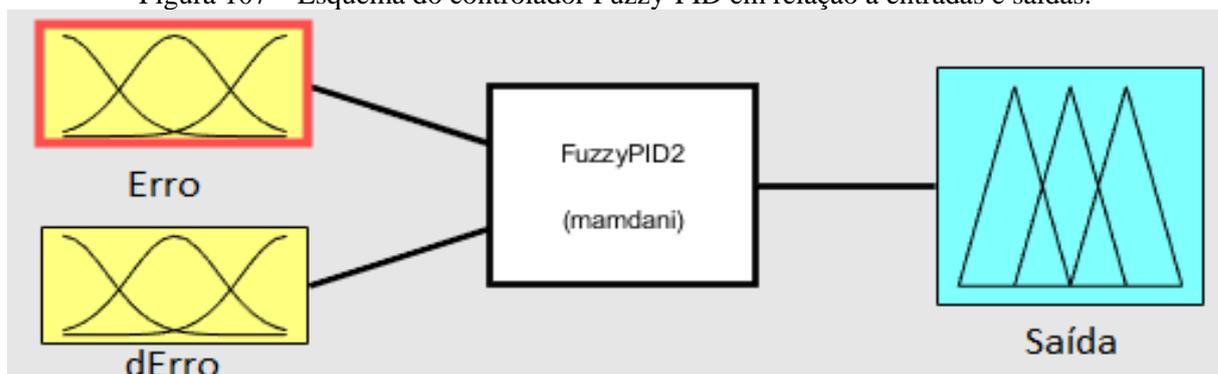
Figura 106 – Controlador Fuzzy-PID com redes neurais para controle de vazão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

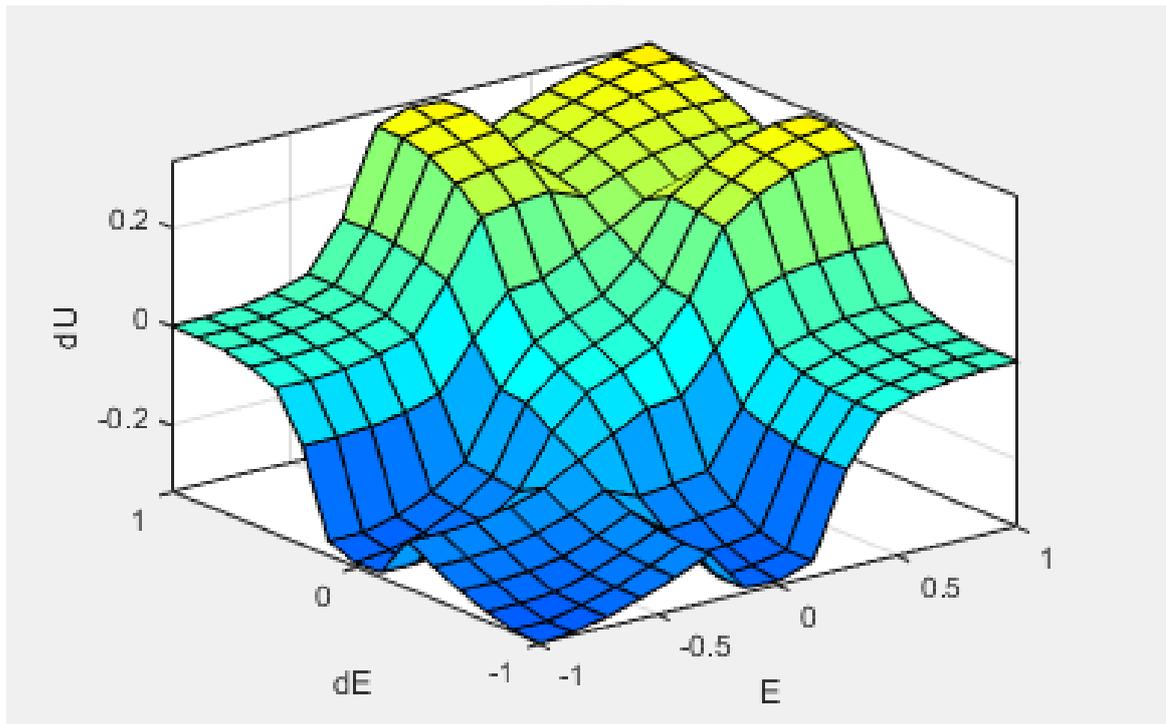
Vê-se que o controlador tem como núcleo um controlador fuzzy que representa a sintonia possível de variação dos parâmetros PID e alimenta as funções elaboradas em redes neurais para fornecer a vazão de operação da planta. Várias foram as configurações pensadas para o controlador, sendo a com melhor desempenho a configuração de um controlador mamdani com duas entradas e uma saída e com o processo de fuzzificação e desfuzzificação por funções sigmóides, conforme figura mostrada adiante.

Figura 107 – Esquema do controlador Fuzzy-PID em relação a entradas e saídas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 108 – Superfície de controle das regras impostas para o Controlador Fuzzy-PID com redes neurais.

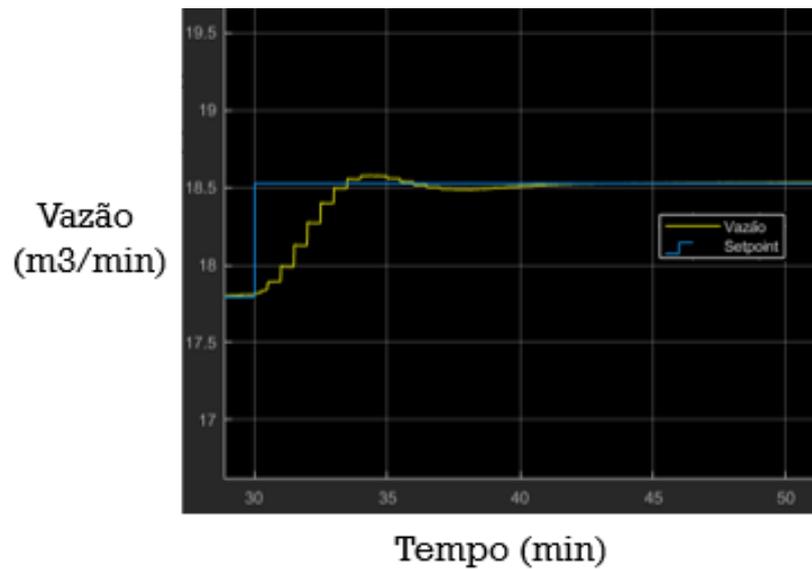


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O esquema apresentado acima é o de melhor desempenho entre os vários esquemas simulados, onde se variou o número de entradas, regras, tipos de funções (gaussiana, sigmoide, triangular e trapezoidal) e valores dos limites das funções no processo de aprendizado do controlador fuzzy.

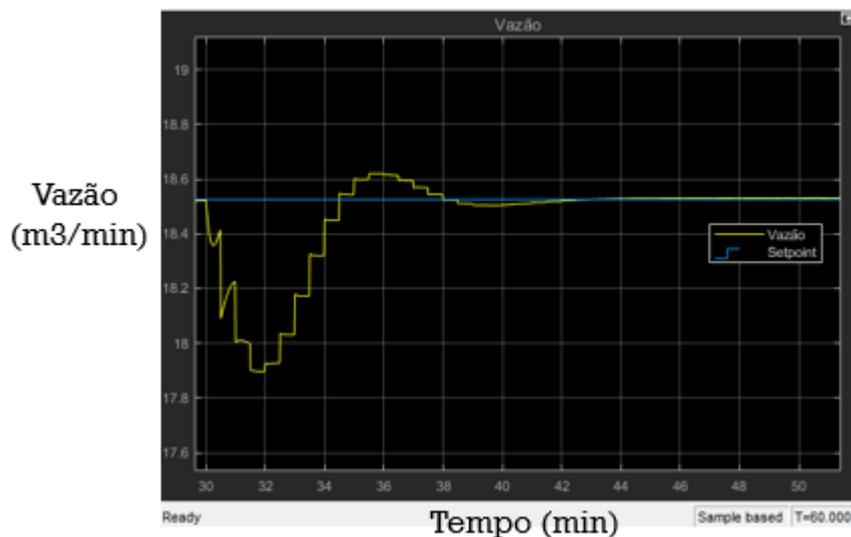
Com o esquema pronto foram feitas simulações para avaliação de desempenho, realizando-se variações no setpoint de controle e perturbações na variável manipulada, sendo, nesse caso, realizado a partir da inclusão de um termo de redução da eficiência do poço, simulando um furo na coluna do poço ou redução do potencial de pressão e elevação dos fluidos do poço. Nas figuras abaixo pode-se ver a resposta do controlador a um aumento de 4% no setpoint de vazão no minuto 30 da simulação e, em seguida, na outra figura, tem-se a redução da produção seguida da atuação do controlador para fazer com quem o processo retorne ao setpoint de vazão, mesmo com a queda na produtividade do poço.

Figura 109 – Resposta do Controlador Fuzzy-PID com redes neurais a variação no setpoint em 4%.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 110 – Resposta do Controlador Fuzzy-PID com redes neurais a queda da produtividade em 4%.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Nota-se que o resultado acima traz um bom resultado, pois o que ocorre na prática é que existe um delay entre o tempo de atuação de um operador a redução de eficiência de um poço e o ajuste da válvula feita por ele de modo manual. Com a lógica proposta, em menos de 3 minutos, o poço já está numa vazão maior ou igual ao setpoint, já na prática, para pequenas variações na produção como a simulada, demora-se horas ou até dias para o ajuste, já que se tem uma cultura que a redução de eficiência do poço já ocorre até por declínio natural e, por isso, já se é esperado. Resultado semelhante a esse pode ser observado no trabalho de Carvalho (2010) *et al.*, o que corrobora com esse achado.

A fim de avaliar se o controle poderia ser feito de forma simplificada por um controlador PID convencional, foi feita uma nova simulação, sendo constatado que o controlador foi suficiente para o modo servo, mas não foi capaz de fazer o controle no modo regulatório de forma satisfatória, pois, no caso em análise, a variável que sofre a perturbação é a própria função de produção do poço e, com isso, para o PID operar, seria necessária uma nova sintonia, pois a dinâmica do processo fica alterada. Abaixo, segue o comparativo entre o controle Fuzzy-PID implantado e o PID convencional por indicadores de desempenho, utilizando o poço A para controle de vazão da planta e medindo a vazão de saída na saída do separador gravitacional.

Tabela 27: Comparativo de desempenho controle PID versus controle Fuzzy-PID.

AJUSTE DE RESPOSTA EM MALHA ABERTA	SINTONIZADO POR	Modo	IAE	ISE	ITAE	ITSE	CE
PID por Sundaesan e Krishnaswamy	IMC $\tau_c = \tau / 10$	Servo	3,74	1,12	22,38	8,92	0,038
Fuzzy-PID poço A	Função sigmoide	Servo	1,68	0,717	12,88	4,26	0,018

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

É possível verificar que o Fuzzy-PID tem desempenho melhor que o PID convencional para uma mudança de setpoint de 4% na vazão requerida de produção pelo processo, da mesma forma que Carvalho (2020, p. 2) afirmou em seu trabalho. Além disso, o Fuzzy-PID também fez o controle para o modo regulatório sem necessidade de nova sintonia, enquanto o PID convencional não convergiu com a sintonia para o modo servo no modo regulatório. Pode-se ver esse comparativo na tabela abaixo.

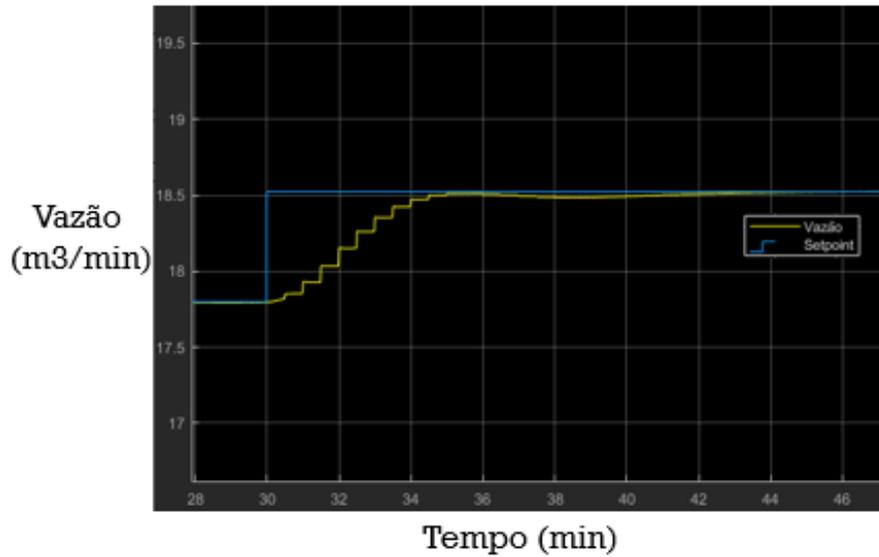
Tabela 28: Comparativo de desempenho controle PID versus controle Fuzzy-PID.

AJUSTE DE RESPOSTA EM MALHA ABERTA	SINTONIZADO POR	Modo	IAE	ISE	ITAE	ITSE	CE
Fuzzy-PID poço A	Função sigmoide	Regulatório	5,55	3,29	26,2	12,08	0,029

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

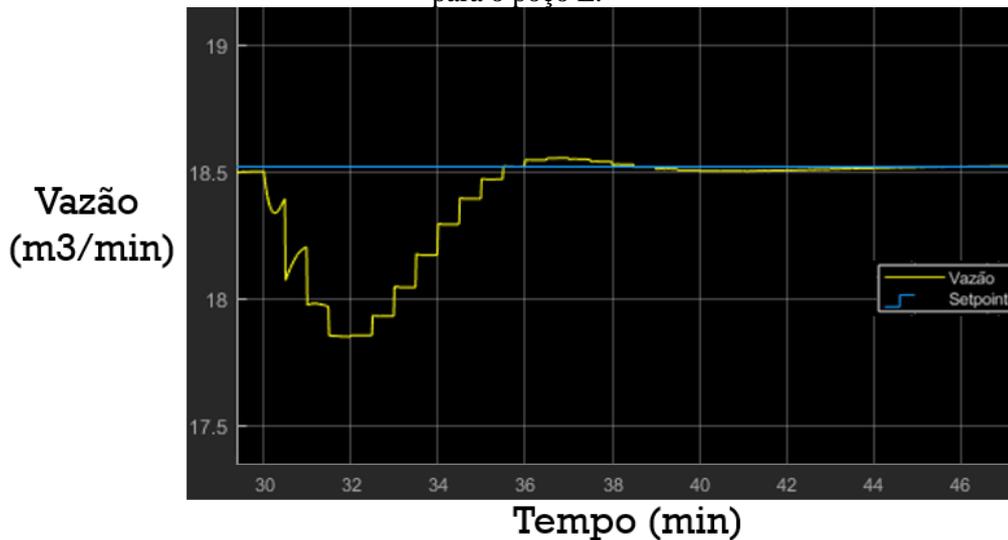
Outra vantagem do controle Fuzzy-PID em relação ao PID é que se pode alterar o poço sob controle, no caso, do poço A para o poço E, e, mesmo assim, continuar fazendo o controle automático do processo sem necessidade de nova sintonia, enquanto o PID não funciona sem nova sintonia. Abaixo, pode-se ver o gráfico de correção da vazão no modo servo para o poço E, mantendo-se todas as condições iguais impostas para a simulação de controle do poço A acima apresentado e a convergência para o seu setpoint.

Figura 111 – Resposta do Controlador Fuzzy-PID com redes neurais a variação no setpoint em 4% para o poço E.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 112 – Resposta do Controlador Fuzzy-PID com redes neurais a queda da produtividade em 4% para o poço E.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Abaixo é possível ver o comparativo do desempenho de controle para as mesmas condições, só mudando o poço. Nas simulações para o poço E o atuador trabalha mais, não por ineficiência do controlador, pois no modo regulatório o IAE e ISE são menores e o restante dos indicadores muito próximos no modo servo, mas sim pelo fato do poço E ter menor produtividade, requerendo uma abertura maior para fazer com que se obtenha a mesma vazão de setpoint.

Tabela 29: Comparativo de desempenho controle Fuzzy-PID Poço A versus Poço E.

AJUSTE DE RESPOSTA EM MALHA ABERTA	SINTONIZADO POR	Modo	IAE	ISE	ITAE	ITSE	CE
Fuzzy-PID poço A	Função sigmoide	Servo	1,68	0,717	12,88	4,26	0,018
Fuzzy-PID poço A	Função sigmoide	Regulatório	5,55	3,29	26,2	12,08	0,029
Fuzzy-PID poço E	Função sigmoide	Servo	2,02	0,9138	15,94	5,62	0,039
Fuzzy-PID poço E	Função sigmoide	Regulatório	2,47	1,07	19,5	7,71	0,041

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Pelo caráter inovador da solução adotada foi feito depósito de patente, número BR 10 2022 011697 0, intitulada “Sistema para controle de vazão de uma plataforma” pela Petrobras S.A.

4.5 MUDANÇA DE SETPOINT POR SISTEMA ESPECIALISTA COM ALGORITMOS GENÉTICOS

Ao elaborar a função objetivo do PWC AIML nota-se que o processo é mais rentável quanto mais a relação entre o que é produzido de óleo e gás se aproxima do seu máximo ao se multiplicar os seus volumes produzidos pela receita de venda, dado o cenário que os custos não mudam quando se alteram as formas de produção via mudança de setpoint para a estrutura instalada. Assim, foi elaborado um estudo em algoritmos genéticos para avaliar quais são os pontos de máximo dessa função objetivo e os respectivos setpoint de operação. Essa proposta, no entanto, é diferente da mostrada por Taifu *et al.* (2013), pois ele defende o uso do algoritmo para otimização energética da planta e com passos e funções diferentes do proposto nessa dissertação, já que o foco aqui é controle de setpoint ótimo e não otimização energética. Também difere de forma substancial do que Longwen (2016) defende, já que ele trata apenas da função de otimização no reservatório e não em funções que são utilizadas para otimização e controle de processo.

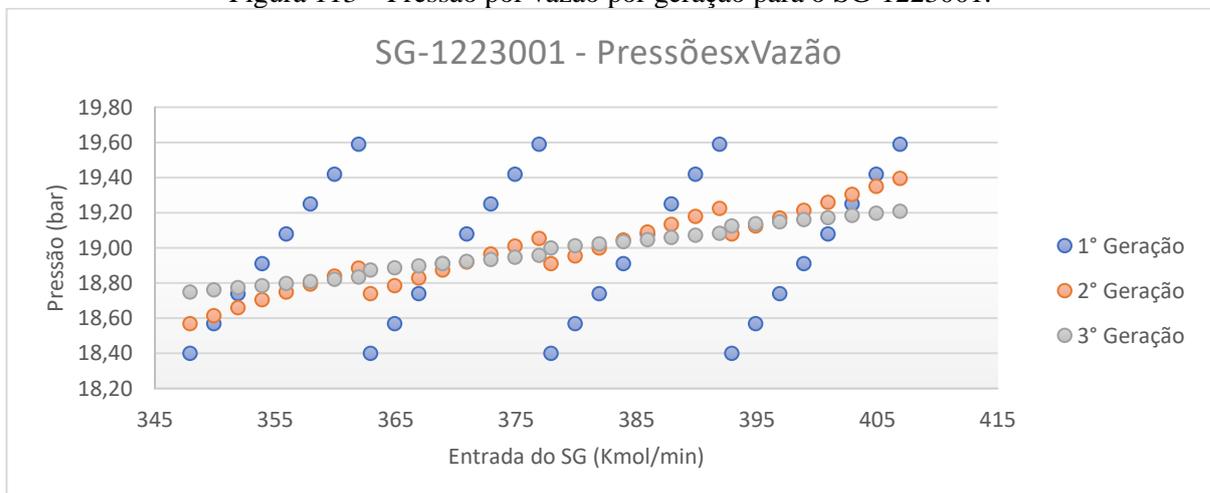
Com os controles já implantados nesse trabalho é possível controlar a produção dos poços, as temperaturas de operação, as pressões dos separadores e os níveis dos vasos. Ao analisar esses fatores, tem-se que o nível pouco interfere na produção, pois não afeta a taxa de separação de forma significativa. Já a temperatura influencia bastante, mas, no caso em análise, não pode ser alterada, visto que, acima da temperatura hoje realizada no P-1223002 existe o risco de *boilover* no V-TO-1223001 se for ultrapassada ou ocorrer descontrole do processo, e abaixo dela não é recomendado, pois pode reduzir a eficiência de separação e até inviabilizar a

troca do P-1223001. Assim, ainda é necessário o estudo sobre a pressão e vazão de alimentação a fim de otimizar a função objetivo.

Tendo em vista que o range de vazão ideal a ser estudado é aquele que fica próximo ao valor nominal da planta, e o de pressão é aquele referente a cada estágio de separação em cada vaso separador no range possível de controle de pressão e limites operacionais, então, foi escolhido realizar o estudo variando a vazão da planta de alimentação em função da pressão em cada estágio de separação.

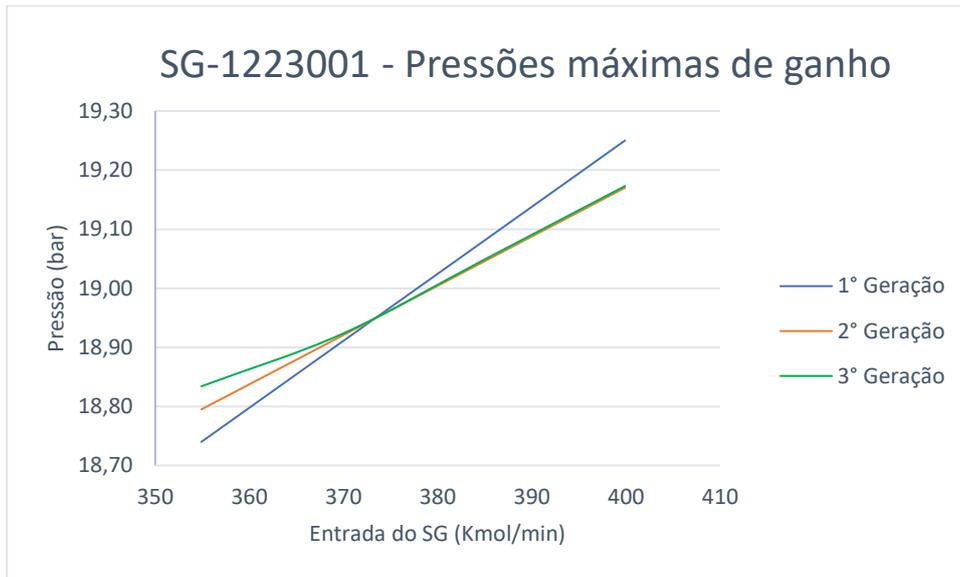
Foi criado um algoritmo genético que recebeu como código genético as informações de vazão e pressão de cada estágio e discretizou, dentro dos limites normalmente utilizados para controle do processo, em 8 cromossomos para a pressão, igualmente distribuídos entre os limites de variação do processo, e divididos para 4 clusters/populações de vazão, espaçados igualmente dentro dos limites estudados, com 8 cromossomos dentro de cada clusters, onde se calculou o resultado da função objetivo para que com isso pudesse ser feita a otimização do controle de setpoint. Abaixo, pode-se verificar os resultados encontrados para cada equipamento para um estudo feito em 3 gerações, gerações essas suficientes para se encontrar com boa precisão as pressões ótimas de operação e receitas por vazão de entrada, sendo a primeira geração resultante das informações de entrada do código genético, e a segunda e terceira geração especificadas a partir da escolha da pressão que trouxe maior resultado para a função objetivo para um algoritmo de seleção do tipo torneio que reescreve os cromossomos em 8 partes, igualmente distribuídas ao redor dos pontos de máximo encontrados com um passo de dispersão 4 vezes menor que o da geração anterior, gerando, assim, uma reprodução do tipo crossing-over que garante a convergência para o valor de máximo para a vazão em estudo.

Figura 113 – Pressão por vazão por geração para o SG-1223001.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 114 – Pressão por vazão por geração para o maior resultado da função objetivo SG-1223001.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 115 – Resultado da função objetivo por vazão para as pressões ótimas para o SG-1223001.

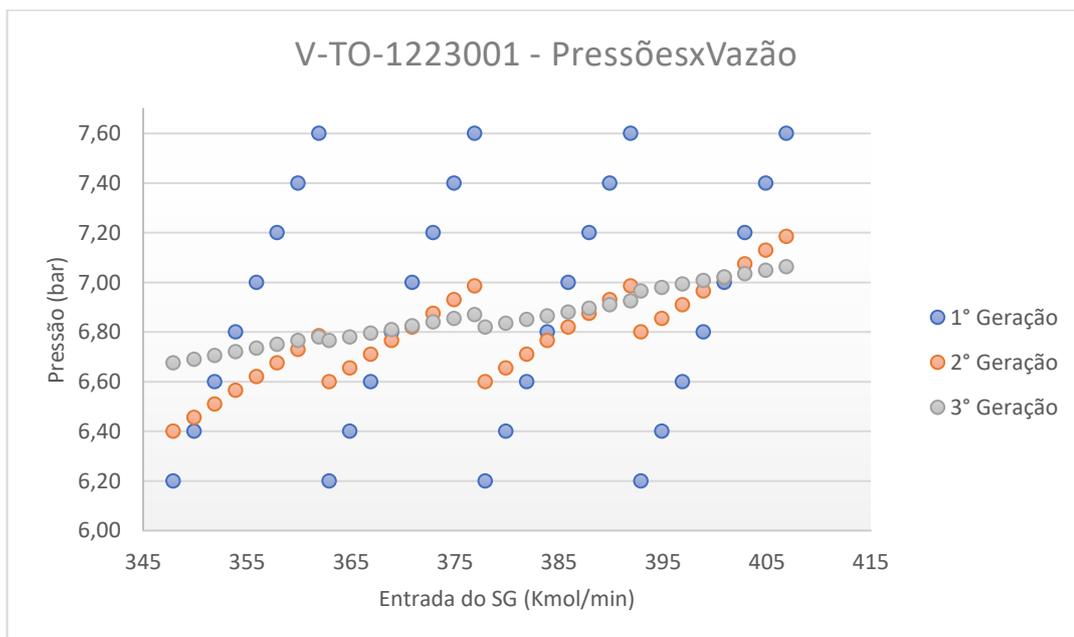


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Percebe-se que o resultado financeiro sobe com o aumento da vazão de entrada, como se espera, pois quanto maior a produção de entrada, maior o resultado. No caso da pressão, para cada nível de vazão foi encontrada qual a pressão que maximiza a função objetivo a partir da técnica de busca que o algoritmo genético proporciona. Pode-se ver pela figura 113 que a busca se inicia, na primeira geração, em valores pré-determinados que são os limites operacionais de variação da pressão. Já na segunda geração, temos a escolha do pai como sendo o valor de pressão do cromossomo da primeira geração que sucede ao valor da pressão de máximo

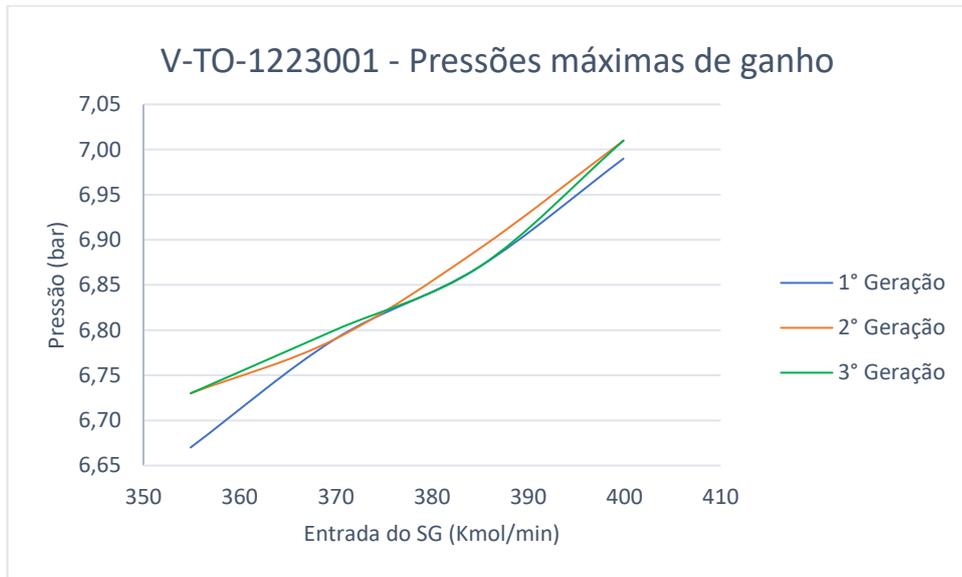
encontrada, e a escolha da mãe que é a pressão anterior a pressão de máximo encontrada do cromossomo de entrada, gerando, assim, descendentes que garantem que em seu material genético estão contidas as informações necessárias ao refinamento dos dados, obtendo, dessa forma, uma maior proximidade do valor de máximo da função, mas ainda com visão linear em torno do ponto de máximo central encontrado, já que os cromossomos foram gerados a partir da divisão do intervalo onde foi encontrado o máximo em 8 partes iguais, por isso, linear. Ao final na terceira geração, temos o valor da pressão onde encontrou-se o máximo, representando para cada vazão como quase uma curva única com pouca inclinação, pontos em cinza, mostrando que foi encontrada a função da pressão que maximiza a função objetivo em função da pressão e vazão de forma satisfatória. Já na figura 114 vê-se de forma mais detalhada a elaboração das curvas de máximo de receita em função da pressão e vazão e como ela se torna não linear na última geração. Com essa função já se pode fazer a otimização do setpoint automático a fim de aumentar a receita, a partir do que pode ser visto na figura 115. Vale salientar que foi considerada a condição de setpoint atual para os outros equipamentos a fim de avaliar a contrapressão e o volume produzido de gás para o cálculo da receita da função objetivo para toda a plataforma, tudo isso em condições standard. Após isso, foi realizado o mesmo estudo para o V-TO-1223001, obtendo os resultados seguintes:

Figura 116 – Pressão por vazão por geração para o V-TO-1223001.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 117 – Pressão por vazão por geração para o maior resultado da função objetivo V-TO-1223001.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 118 – Resultado da função objetivo por vazão para as pressões ótimas para o SG e V-TO-1223001.

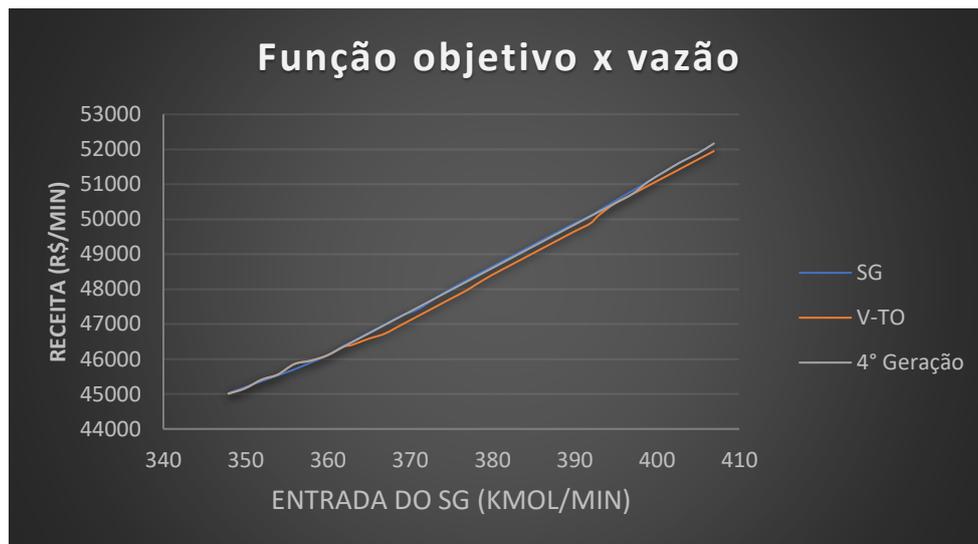


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Pode-se observar que o comportamento é semelhante ao que foi encontrando para o SG, sendo que o resultado da função objetivo foi um pouco inferior, sendo isso justificado pelo maior grau de despressurização em que o fluido se encontrava nessa etapa. Vale salientar que nos dois casos o comportamento não linear do equilíbrio líquido-vapor foi observado ser de pouca influência, pois a pressão está longe da pressão crítica, que é em torno de 50 bar, levando em conta que o range de pressão para análise foi de apenas 1,4 bar.

Com as duas curvas da figura 118 e seus dados de setpoint, foi elaborada uma quarta geração para análise, sendo agora utilizadas as pressões de operação que maximizam a função objetivo para os dois equipamentos ao mesmo tempo para gerar a curva final de receita ótima. Assim, foi possível ver a otimização da função objetivo com a interação entre os vasos, como pode ser visto abaixo.

Figura 119 – Resultado da função objetivo por vazão para as pressões ótimas na quarta geração.



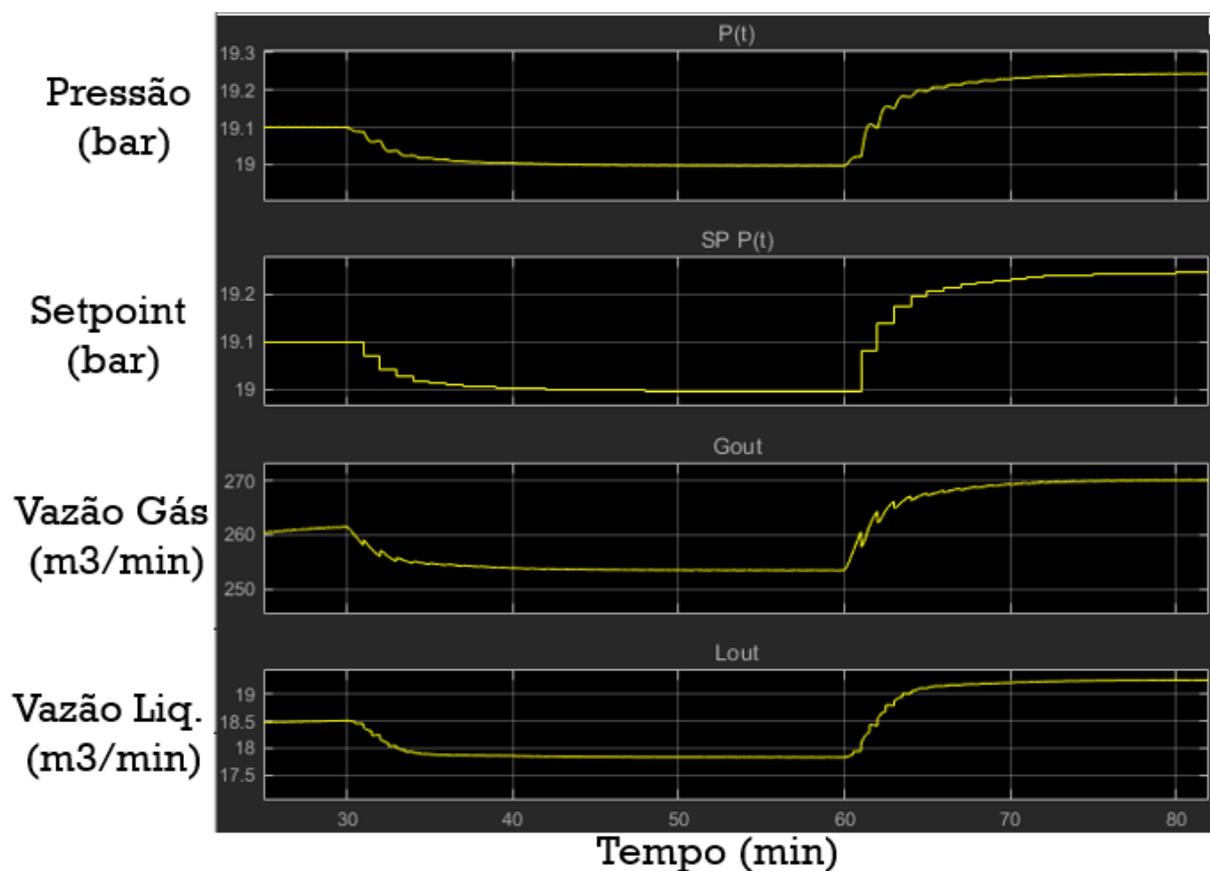
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Com isso pode ser feito o controle de setpoint de pressão de forma ótima. Ainda vale salientar que durante todo o processo de busca do ponto ótimo de operação foi executado em paralelo uma mutação de busca com cromossomos criados de forma randômica a fim de calcular pontos de ganho a partir da variação das pressões e vazões, dentro do espaço populacional, e com comparação com o ótimo encontrado para a 4ª geração em análise, sendo que não foram encontrados pontos de mutação em máximos maiores que os encontrados nas análises de gerações, mostrando assim que não estamos operando em um máximo local, e sim no máximo global.

Com o estudo pronto, foi possível implantar um sistema especialista de controle de setpoint e override para o processo. Abaixo, pode-se ver um ensaio que mostra a alteração automática de setpoint para 3 níveis de vazões diferentes para o processo no SG. Tem-se uma perturbação do tipo degrau com redução de 4% da produção no instante 30 minutos e depois um aumento de 8% na produção de entrada do SG no instante 60 minutos. Percebe-se que o setpoint se alterna entre 19,1 bar, 19 bar e 19,25 bar de forma automática, de acordo com as mudanças que ocorrem na vazão. Vale salientar que o processo tem como setpoint 19,3 bar

fixo, independente da vazão, em seu projeto, e com a aplicação dessa tecnologia, algoritmos genéticos com sistema especialista, tem-se a possibilidade de produção com a receita otimizada e, com isso, ganhos expressivos. Vê-se também que a vazão de saída de líquidos (Lout) e a de gás (Gout) segue a lógica de controle e o patamar imposto pela variação na entrada do processo, porém, tendo leve alteração baseado no controle de setpoint, com isso, otimizando a receita. É possível observar que os resultados encontrados para isso são similares com os expostos por Araújo Júnior (2007).

Figura 120 – Controle automático de setpoint a duas perturbações na vazão.

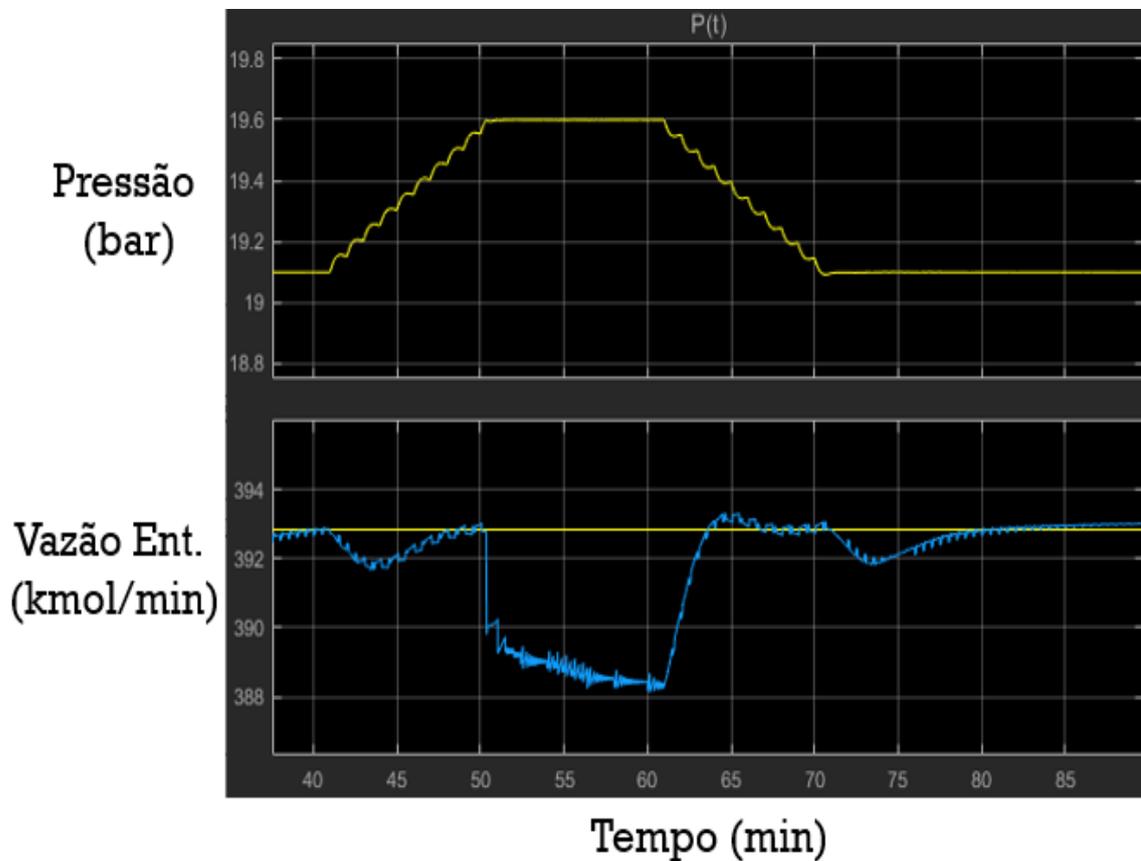


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Além disso, o sistema especialista propicia o controle override, ajudando, dessa forma, o SIS (Safety Instrumented System) no processo. Abaixo pode-se ver dois ensaios, um deles causa uma perturbação na pressão de operação que faz com que se chegue ao limite de pressão estabelecido para o SIS, 19,6 bar, acionando o controle override de vazão de alimentação da planta via lógica neuro-fuzzy que reduz a vazão, fazendo com que a pressão não se eleve mais, apesar de ter sido programada uma perturbação que leva a pressão até 20 bar, e até que ocorra a redução da pressão e, com isso, o retorno a estabilidade do processo. Percebe-se que o controle

de vazão já atua logo no início do processo para gerar a volta da vazão ao setpoint, mesmo com a elevação da pressão em rampa, pois a vazão de alimentação se reduz com o aumento de pressão naturalmente, porém, quando essa pressão chega ao limite estabelecido pelo SIS, a vazão sofre redução mais significativa, visando retirar o processo da região limite. Nota-se ainda que, quando a pressão é reduzida abaixo do limite, novamente a vazão volta ao setpoint normal do processo, tendo em vista que a instabilidade já foi superada. Vale lembrar que esses gráficos de resposta apresentados estão de acordo com o que é apresentado por Duarte (2020) em seu trabalho, assim corroborando com os resultados.

Figura 121 – Atuação do controle override ao atingimento a pressão limite.

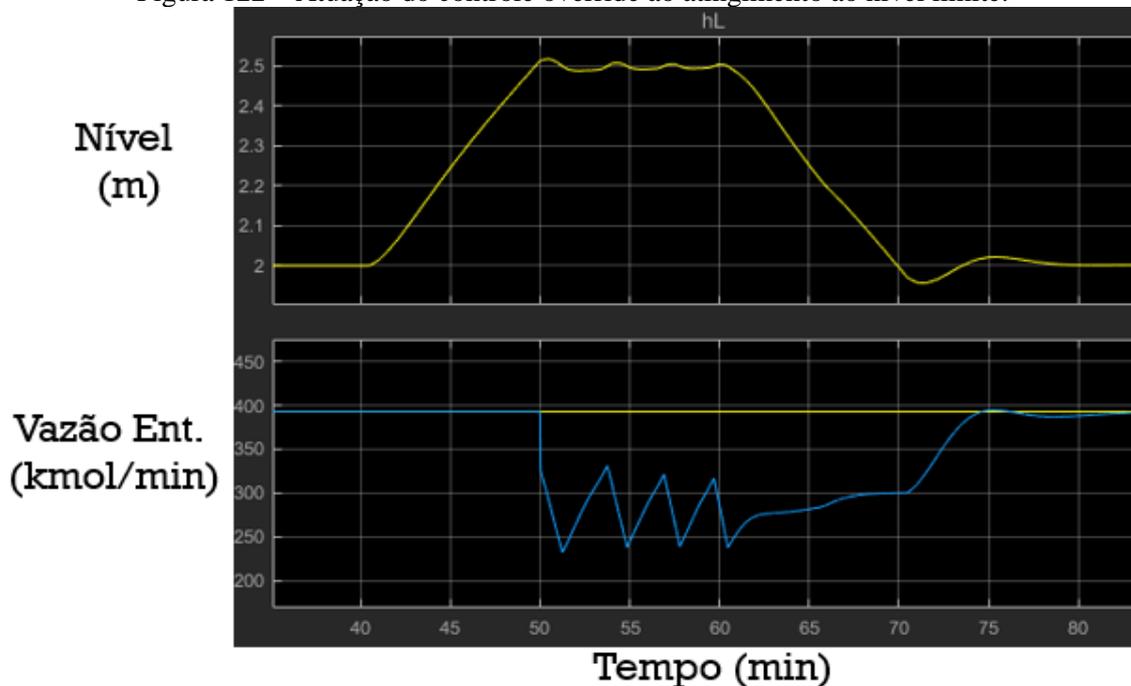


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Abaixo, é possível ver a atuação do controle override de vazão a elevação do nível no vaso, onde a vazão é reduzida ao se atingir o limite estabelecido de 2,5 m de nível, apesar de ter sido programado que atingisse 2,8 m, e pode ser visto que o nível reduz com a redução da vazão, mas, em seguida, a vazão volta ao controle normal e tende a se normalizar, porém, o nível aumenta novamente e, em seguida, atinge o limite outra vez. Ao final, podemos ver que

o acionamento do controle override ocorre 4 vezes até que se alcance a vazão nominal com o nível normal.

Figura 122 – Atuação do controle override ao atingimento ao nível limite.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O sistema especialista proposto é composto por regras como as exemplificadas abaixo, no mesmo molde proposto por Campos (2016, p. 4), mostrado na figura 25 do referencial teórico, obtendo-se o que é necessário para o controle de setpoint e override da planta:

Figura 123 – Sistema especialista proposto de controle de setpoint e override.

Se $\{P1(t)\}$ é menor que o $\{\text{limite superior}\}$ e maior que o $\{\text{limite inferior}\}$, então HABILITAR $\{\text{controle de setpoint por Alg. Genético } f(x)\}$;

Se $\{P1(t)\}$ é maior que o limite, então HABILITAR $\{\text{controle override de vazão}\}$ e DESABILITAR $\{\text{controle de setpoint por Alg. Genético } f(x)\}$;

Se $\{P1(t)\}$ é menor que o $\{\text{limite inferior}\}$, então HABILITAR $\{\text{controle override de vazão}\}$ e DESABILITAR $\{\text{controle de setpoint por Alg. Genético } f(x)\}$;

Se $\{Nível1(t)\}$ é menor que o $\{\text{limite superior}\}$ e maior que o $\{\text{limite inferior}\}$, então HABILITAR $\{\text{controle de setpoint por Alg. Genético } f(x)\}$;

Se $\{Nível1(t)\}$ é maior que o limite, então HABILITAR $\{\text{controle override de vazão}\}$ e DESABILITAR $\{\text{controle de setpoint por Alg. Genético } f(x)\}$;

Se $\{Nível1(t)\}$ é menor que o $\{\text{limite inferior}\}$, então HABILITAR $\{\text{controle override de vazão}\}$ e DESABILITAR $\{\text{controle de setpoint por Alg. Genético } f(x)\}$;

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Ao final, o sistema proposto vai ter no mínimo 36 regras para o processo aqui estudado, mas não requer um esforço computacional elevado, pois é composto por regras simples. Campos (2016) propôs um sistema especialista para controle da temperatura de fornos da LUBNOR que se assemelha a esse em relação a estrutura sintática, porém, com funções e formas diferentes de atuação, visto que, nesse caso, se tem o estudo em algoritmos genéticos com o controle override e as estruturas de controle aqui explicitadas, mantendo o sistema em estabilidade, mesmo com as perturbações correntes, e não apenas mantendo um setpoint. Campos (2003) também cita o uso de sistemas especialistas para controle, mas com foco em partida de poço e não para controle do processo de tratamento em condições limites e setpoint.

Pelo caráter inovador da solução adotada foi feito depósito de patente, número BR 10 2022 015577 1, intitulada “SISTEMA ESPECIALISTA E MÉTODO DE CONTROLE DE SETPOINT POR ALGORITMOS GENÉTICOS E CONTROLE OVERRIDE” pela Petrobras S.A.

4.6 REALIZAÇÃO DO CONTROLE PLANTWIDE AIML

Para o fechamento das malhas mostradas nos itens 4.1 a 4.5 foi utilizado a metodologia proposta pelo autor e exposta na tabela 8 desse trabalho. A primeira etapa desse novo tipo de controle plantwide é a definição de objetivos e ganhos, sendo isso exposto na seção de objetivos e na metodologia, tendo como função objetivo o somatório das vazões de gás e óleo multiplicado pelas respectivas receitas a preço de mercado na conjuntura atual da economia. Em termos de unidades, o trabalho foi desenvolvido de forma a computar as vazões em STD m^3/min e a receita em $\text{R}\$/\text{min}$. Pode-se observar que Godoy (2017) mostra em seu trabalho várias formas de se montar a função objetivo, mas em nenhuma delas utiliza ferramentas de inteligência artificial e aprendizado de máquina para balizar as informações necessárias a elaboração da função objetivo, e sem usar como fonte para a busca da solução um algoritmo genético com base no lucro da unidade.

Já a segunda etapa consiste em definir as condições de contorno, identificar os modelos do processo e realizar estudos em redes neurais para as situações que não temos modelos. No quadro abaixo, são mostradas as condições de contorno, restrições e condições esperadas, conforme projeto da planta. Já os modelos utilizados foram expostos na seção de metodologia desse trabalho com validação exposta no item 4.1, e o estudo em redes neurais mostrado no item 4.3 dos resultados, cumprindo, assim, toda a etapa 2 do PWC AIML.

Tabela 30: Restrições, limites e condições esperadas.

Equipamento	Variável	Mínimo	Máximo	Setpoint	Unidade
SG-1223001	Pressão de operação	18	22,16	19,3	bar
SG-1223001	Nível de operação	1,3	2,8	2,1	metros
V-TO-1223001	Pressão de operação	6,6	8,04	7	bar
V-TO-1223001	Interface de operação	1,25	1,97	1,6	metros
TO-1223001	Interface de operação	0,3	1,5	0,85	metros
V-TO-1223002	Pressão de operação	1,02	2,66	2,4	bar
V-TO-1223002	Interface de operação	1,25	1,97	1,6	metros
TO-1223002	Interface de operação	0,3	1,5	0,85	metros
P-1223002A/B	Temperatura de operação	86	101	91	°C
P-1223005A/B	Temperatura de operação	45	65	55	°C
Medidor fiscal	Vazão de gás	-	-	300.000	STD m ³ /h
Medidor fiscal	Vazão de líquido	-	-	1000	m ³ /h

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Já a etapa 3 de avaliação em estado estacionário se inicia com a definição das variáveis a serem manipuladas para se conseguir atender a tabela 30, gerando, assim, a tabela 31 abaixo, que segue com a indicação das malhas que foram fechadas e os seus tipos com base na análise de sensibilidade feita no item 4.4 dos resultados.

Tabela 31: Variáveis a serem manipuladas e tipos de controle implantado.

Equipamento	Variável	Variável manipulada	Tipo de malha fechada
SG-1223001	Pressão de operação	Vazão de gás de saída do SG	SISO - Feedback
SG-1223001	Interface de operação	Vazão de óleo de saída do SG	SISO - Feedback
V-TO-1223001	Pressão de operação	Vazão de gás de saída do V-TO	SISO - Feedback
V-TO-1223001	Interface de operação	Vazão de óleo de saída do V-TO	SISO - Feedback
TO-1223001	Interface de operação	Vazão de água de saída do TO	SISO - Feedback
V-TO-1223002	Pressão de operação	Vazão de gás de saída do V-TO	SISO - Feedback
V-TO-1223002	Interface de operação	Vazão de óleo de saída do V-TO	SISO - Feedback
TO-1223002	Interface de operação	Vazão de água de saída do TO	SISO - Feedback
P-1223002A/B	Temperatura de operação	Vazão de água de aquecimento	SISO - Feedback
P-1223005A/B	Temperatura de operação	Vazão de água de resfriamento	SISO - Feedback
Medidor fiscal	Vazão de gás	Abertura do choke dos poços	MIMO – Fuzzy-PID
Medidor fiscal	Vazão de líquido	Abertura do choke dos poços	MIMO – Fuzzy-PID
Todos	Limitação das variáveis acima	Abertura do choke dos poços	MIMO – Override

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A etapa 4 foi realizada no decorrer do projeto dos controladores, onde a estabilidade e desempenho das malhas foi mostrado a cada projeto e implantação da malha, e o controle dos

setpoints e implantação dos algoritmos genéticos com sistema especialista foi feito no item 4.5 dos resultados, com todos os passos e métodos utilizados lá mostrados.

Ao final, é concluído todo o processo do PWC AIML ao realizar a etapa 5, na qual pede para ser realizada a simulação dinâmica não-linear para validação do projeto com avaliação dos setpoints candidatos a máximo da função objetivo e do não atingimento dos limites do processo que foram desenvolvidos durante todos os passos mostrados do item 4.1 ao 4.5 dos resultados. As alternativas propostas e apresentadas nesse trabalho foram dentro de uma gama de alternativas testadas via metodologia PWC, passando pelas fases de análise e experimentação das possíveis condições de ciclos e disposição de equipamentos, mas todos esses superados pelo fato de se está fazendo um estudo de caso e se ter um sistema já implantado.

Veja que a nova metodologia proposta trouxe bons resultados financeiros, conforme pode ser visto no item 4.7, que se segue abaixo, com isso validando a proposta do PWC AIML, pois os resultados obtidos foram alcançados com ganho em comparação ao método convencional de PWC que foi realizado para elaboração das malhas em uso na plataforma.

Pelo caráter inovador da solução adotada foi feito depósito de patente, número BR 10 2022 013652 1, intitulada “MÉTODO PARA CONTROLE DE PLANTA DE PROCESSOS INDUSTRIAIS DE SEPARAÇÃO E TRATAMENTO SEM REAÇÃO QUÍMICA” pela Petrobras S.A.

4.7 RETORNO FINANCEIRO DAS PROPOSTAS

As propostas apresentadas nesse trabalho são melhorias realizadas em relação ao formato convencional de controle das plataformas de petróleo da Petrobras, haja vista que não se vê esse tipo de abordagem nos esquemas/malhas hoje utilizadas. Para mostrar a eficiência deles é que essa seção traz uma visão de retorno financeiro ao aplicar o que foi proposto acima nos itens de resultados.

Como primeiro ponto de ganho temos a implantação da lógica neuro-fuzzy de controle de vazão que propicia que a planta trabalhe na vazão nominal em malha fechada, com isso, gerando um ganho de produção relacionado a diferença da produção realizada normalmente, abaixo da nominal para a produção nominal, por determinados períodos de tempo, que é o que se produz durante o tempo em que a planta não opera na sua condição plena e aguarda o tempo de reação do operador para elevar a vazão dos poços, que hoje operam sem automação e

precisam da atuação manual do operador, e a produção realizada com o controle proposto, em malha fechada, que retorna a planta a vazão nominal em poucos minutos.

Nota-se que a diferença de produção entre os dois métodos depende do operador da planta e do momento em que ocorre a redução da eficiência, sendo que foi calculado um ganho médio mensal de 25,6 m³ de óleo entre o tempo de atuação do controle neuro-fuzzy e o tempo de reação do operador ao avaliar as curvas de produção recentes da plataforma.

Além disso, teve-se o ganho financeiro relacionado a otimização da produção, ao definir os setpoints ótimos de pressão, frente a função objetivo com o algoritmo genético, pois, trabalhando nos pontos ótimos em relação aos setpoints hoje operados na planta, temos uma diferença de 140,5 R\$/h durante a operação.

Ao final, ainda se tem o ganho de utilizar a metodologia PWC AIML, pois com ela se chega a uma estratégia de controle que possibilita o acionamento do controle override sobre a vazão, evitando paradas por shutdown da planta, agindo de forma preventiva ao se chegar em algum limite do processo sem que ela seja ultrapassada. Como é difícil mensurar quais paradas da planta seriam evitadas ou não com essa metodologia, já que esses dados não estão disponíveis, então considera-se que será evitada 1 (uma) parada por ano com essa metodologia, ficando isso orçado em cerca de 12 milhões de reais, o que equivale a evitar uma parada da planta de óleo de cerca de 4 horas de duração por ano, situação essa considerada muito conservadora, pois em alguns casos reais a parada chega a 3 dias.

Outro ganho que se obtém com o PWC AIML é a possibilidade de reduzir a quantidade de operadores utilizados para controle do processo, pois com a adição da automação do setpoint, vazão de alimentação e override pode-se reduzir dos atuais 16 operadores de controle e acompanhamento de processo por embarque para 14, ou até mesmo 12 com a evolução dos sistemas a contento. Levando em conta que para cada posto de trabalho *offshore* temos 2,5 pessoas escaladas para trabalho devido ao regime de trabalho atualmente empregado nas plataformas, então, temos uma redução de pessoal que pode girar em torno de 5 a 10 operadores no total. Levando em conta que cada operador, junto a logística de helicópteros e suprimentos para embarcá-lo e mantê-lo trabalhando, e seu salário com todos os encargos podem chegar a 300 mil reais anuais, então, temos uma otimização de até 3 milhões de reais por ano por plataforma. Vale salientar que essa alternativa, redução de pessoal, é também citado por Sircar (2021) em seu trabalho como uma oportunidade de redução de custos, quando implantadas técnicas de inteligências artificial e aprendizado de máquina em processos industriais.

Com os dados acima, com a cotação do petróleo atual em 87,51 U\$/bbl e do dólar a 5,46 R\$/ U\$, usando uma taxa de retorno interna ou de atratividade de 10% a.a, considerando

que o plano de negócios vigente da Petrobras é o de 5 anos, que vão do ano 2022 a 2026, foi possível elaborar a planilha abaixo, sendo essas informações também embasadas pelo trabalho de Souza (2021):

Tabela 32: Retorno financeiro das propostas.

ESTRATÉGIA	RETORNO FINANCEIRO PARA PLATAFORMA POR ANO (R\$)	VPL PARA PLATAFORMA CONSIDERANDO PLANO DE NEGÓCIO 2022-2026 (R\$)
Neuro-fuzzy	923.256,09	3.849.853,67
Setpoint ótimo	1.230.780,00	5.132.186,99
PWC AIML Override	12.021.563,74	50.128.303,23
PWC AIML Pessoal	3.000.000,00	12.509.596,34
Total (R\$)	17.175.599,83	71.619.940,23

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os resultados podem chegar à cifra de bilhões no horizonte do plano de investimentos 2022-2026 da companhia, caso se considere as 72 plataformas que hoje operam de forma similar, e mostra a efetividade das ações propostas que, mesmo não chegando a total implantação por alguma dificuldade encontrada, merece atenção, tendo em vista a sua relevância, a fim de que seja feito o planejamento para implantação.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta seção está dividida em três partes: a primeira é dedicada à conclusão dos objetivos específicos apresentados no início desta pesquisa, logo após, encontram-se as recomendações para futuras pesquisas da mesma natureza ou segmento e, ao final, temos as considerações finais que finalizam a presente pesquisa.

5.1 RESPONDENDO AS QUESTÕES DE PESQUISA

As respostas as questões de pesquisa respondem ao objetivo da pesquisa e são apresentadas abaixo como forma de compilar os resultados em conclusões que transmitam o que se obteve com a pesquisa.

5.1.1 Quais modelos são adequados para a simulação da planta de processamento de óleo de um FPSO e se esses modelos podem ser validados?

Conclui-se que os modelos apresentados no referencial teórico e metodologia foram validados com os dados reais e de projeto da plataforma, tornando a simulação realizada válida para a representação da dinâmica do processo e, com isso, sendo possível fazer o fechamento das malhas de controle, estudos de otimização, e aplicação de novas técnicas de controle propostas.

5.1.2 Como implantar controles convencionais de acordo com o caso real estudado de forma a ter uma boa representação do processo real e obter a estabilidade necessária as simulações?

Em relação aos controles que já estavam implantados na plataforma viu-se que eram representativos e importantes para a estabilidade do processo, que sua dinâmica pôde ser representada na simulação dinâmica com grande aproximação do caso real e que o resultado do

controle em malha fechada propiciou uma operação com estabilidade e desempenho satisfatório. Os controles ainda foram usados para os outros objetivos do PWC AIML, como o controle override, de forma satisfatória e com desempenho adequado.

5.1.3 Qual tipo, arquitetura, taxa de aprendizagem e outras informações são mais adequadas para a realização da estimativa da vazão dos poços utilizando redes neurais?

Como foi apresentado nos resultados, a rede neural criada foi do tipo feedforward, com algoritmo de cálculo dos pesos do tipo backpropagation, e utilizou-se uma arquitetura otimizada após o estudo de dropout de uma camada de entrada com 10 neurônios (com função de ativação linear), uma intermediária de 5 neurônios (com função de ativação sigmoide) e uma de saída de 1 neurônio (com função de ativação linear), totalizando 16 neurônios. O termo de momento e taxa de aprendizagem ótimos para convergência da rede ficaram em 0,6 e 0,4, respectivamente, e não foram encontrados máximos e mínimos locais que alterassem de forma significativa o erro final da rede para essa arquitetura. Vale salientar que, com a RNA criada, foi possível prever o comportamento dos poços em condições reais de operação com uma boa precisão, porém, não foi possível observar a vazão para parâmetros de abertura de choke fora do espaço amostral de treinamento da rede com uma boa precisão.

5.1.4 Como deve ser feito o ajuste de setpoint de um equipamento utilizando algoritmos genéticos e quais equipamentos precisam ter PID adaptativo?

O estudo mostrou que o ajuste de setpoint deve ser realizado por um sistema especialista que comande a mudança de setpoint de acordo com a mudança de alguma variável de interesse, e baseado em um estudo feito em algoritmo genéticos, pois o setpoint deve ser sempre o que maximize o resultado da concessão se o processo estiver dentro dos limites operacionais. O estudo em algoritmo genético é o que garante a maximização da função objetivo do PWL AIML e com ele se geram as funções que parametriza o controle de setpoint. O estudo como um todo mostrou ganhos ao se mudar o setpoint de forma otimizada e, com isso, maior resultado na produção. Para os ranges de mudança de setpoint estudados não foram encontradas dificuldades

para o sistema de controle se adaptar a mudança, ficando o Gain Scheduling ou PID adaptativo para as situações de mar severo que pedem por uma melhor resposta do sistema de controle de interface, tendo em vista as grandes oscilações realizadas pela alimentação do sistema e interface pelo posicionamento da plataforma.

5.1.5 Como deve ser feito a implantação da lógica fuzzy de controle baseado nos estudos de redes neurais e algoritmos genéticos?

Com os estudos realizados foi possível implantar um controlador fuzzy PID para atuação na correlação gerada por redes neurais e, com isso, se obter um controlador de vazão para a planta em malha fechada. Vale salientar que o Fuzzy-PID com a superfície de resposta criada tem uma boa sintonia para grandes ranges de vazão e até para condições de mudança na dinâmica dos poços. Ele propiciou o controle override, junto ao sistema especialista de setpoint, e é a malha de controle que garante uma estabilidade maior para toda a planta e o atingimento dos objetivos definidos pelo PWC AIML.

5.1.6 Como deve ser feito o projeto dos controladores da planta de forma otimizada de acordo com as técnicas de controle PWC AIML proposto?

O projeto segue a sequência proposta nos resultados e que foi realizado de acordo com a metodologia desenvolvida nesse trabalho. A otimização do processo ocorreu de forma satisfatória e isso pode ser visto pelo resultado financeiro da proposta ao final dos resultados. O projeto dos controladores levou em conta técnicas de controle multivariado e lógicas de inteligência artificial e machine learning, como proposto na metodologia do PWC proposto. Ao final, se obtém o projeto de controle de toda a planta de tratamento de óleo da plataforma de forma otimizada e inovadora.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para os pesquisadores da área deixa-se a sugestão de realizar mais estudos acerca da utilização das tecnologias aqui apresentadas para que se possa validar o uso das ferramentas

para outras áreas/exemplos/situações, ampliando, assim, o leque de possibilidades de aplicação. Vale salientar que foram realizados vários testes para validação das técnicas, mas ainda cabe realizar mais estudos para delimitação e equacionamento delas a fim de serem utilizadas de forma mais geral, onde aqui fica mais um modelo e metodologia de trabalho.

Outra sugestão é que os trabalhos aqui realizados também sejam realizados em CFD (Computational Fluid Dynamics) a fim de melhorar a precisão dos modelos e controles e, assim, obter uma otimização o mais próximo possível da realidade em termos de representatividade e resultados financeiros.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizar uma pesquisa científica com a qualidade mostrada e utilizando ferramentas de modelagem, simulação, controle convencional, controle avançado, inteligência artificial, machine learning e data science para otimização e controle de uma plataforma de petróleo do pré-sal brasileiro é um desafio e acredito que foi gerado insumo suficiente para fomentar mudanças nos setores de automação e otimização nas empresas de petróleo a fim de implantar as técnicas aqui propostas.

Apesar de todas as dificuldades encontradas para levantamento de informações na prática, tratamento dessas informações e aplicação dos conhecimentos modernos aqui apresentados, a motivação para se obter bons resultados e melhorar a performance do setor estudado ultrapassou as barreiras impostas e com isso obteve-se sucesso no resultado final financeiro de forma sólida.

Considera-se que o objetivo da pesquisa foi atingido e que o desenvolvimento de mais trabalhos nessa área e com as ferramentas aqui propostas podem trazer mais avanços para a indústria e para os estudiosos da área.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA JUNIOR, C. de. *et al.* **Sistema especialista para diagnóstico de problemas no sistema de geração de energia elétrica de uma refinaria de petróleo.** 2003. 81 f. Dissertação (Mestrado Engenharia da Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2003.

ANJOS, R. C. N. S. **Dimensionamento de vaso separador bifásico horizontal.** 2015. 12 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de petróleo). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2015.

ARAÚJO JÚNIOR, J. M. de. **Técnicas de Inteligência Artificial para a geração Dinâmica de Set Points para uma Coluna de Destilação.** 2007. 65 f. Dissertação (Mestrado Automação e Sistemas; Engenharia de Computação; Telecomunicações). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2007.

BARBOSA, C. **O projeto de pesquisa.** 1990.

BARBOSA, E. *et al.* APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA O RECONHECIMENTO DE ASSINATURAS HARMÔNICAS DE EQUIPAMENTOS ELETROMÉDICOS. **Revista de Sistemas e Computação-RSC**, v. 7, n. 1, 2017.

BEGA, E. A.; KOCH, R.; FINKEL, V. S. Industrial instrumentation (**Instrumentação industrial**). Rio de Janeiro: Editora Interciencia, 2011.

BELLO, O. *et al.* Application of artificial intelligence techniques in drilling system design and operations: a state of the art review and future research pathways. *In: SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition.* OnePetro, 2016.

BRASWELL, G. Artificial Intelligence Comes of Age in Oil and Gas. **Journal of Petroleum Technology**, v. 65, n. 01, p. 50-57, 2013.

BOJORGE, N. **Malhas de controle: Tipos de controladores e funcionamento.** Notas de aula. UFF. 2021.

BORGES, P. R. **Propriedades Termodinâmicas do Gás Natural.** Publicação autorizada pela Petrobras-Gerência Executiva de Abastecimento-Logística-Documento AB-LO, v. 29, n. 08, 2009.

CAMPOS, M. C. M. M. **Aplicações de Controladores “Fuzzy” na Petrobras.** Centro de Pesquisa e Desenvolvimento – CENPES. 2016.

CAMPOS, M. C. M. M. *et al.* **Controle avançado e otimização na indústria do petróleo.** Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2013.

CAMPOS, M. C. M.; RAMOS, M. P. **Aplicações de Sistemas Especialistas e Redes Neurais na Petrobras.** Divisão de Inteligência Artificial do TECPAR. 2003.

CAMPOS, M. C. M. M. *et al.* Intelligent system for start-up and anti-slug control of a petroleum *offshore* platform. *In: OTC Brasil*. OnePetro, 2017.

CARVALHO, A. S.; ALMEIDA, G. C. S.; SALLES, R. S. Implementação de Controladores Híbridos PID-Fuzzy: Análise de Desempenho em uma Planta de Nível. *In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. 2020.

CARVALHO, M. *et al.* Controlador Neuro-fuzzy Aplicado a Industria do Petróleo. *In: Congresso de Instrumentação, Controle e Automação da Petrobras*, Rio de Janeiro. 2010.

CASTELANI, M. R. *et al.* **Sistema especialista para o gerenciamento operacional de redes de distribuição de gás natural**. 2012. 158 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2012.

CEPEMAR. Atividade de Produção e Escoamento de Petróleo e Gás Natural do Campo de Golfinho, Bacia do Espírito Santo. **RIMA - Relatório de impacto ambiental**, ver. 1. Petrobras, 2005.

CHAVES, J. A. F. **Ferramentas de gestão estratégica para aplicação de Normas Regulamentadoras do trabalho na indústria do petróleo e gás Onshore**. 2018. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Administração) Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, Brasil, 2018.

CHEN, H. *et al.* Opportunities and challenges of robotics and automation in *offshore* oil & gas industry. **Intelligent Control and Automation**, v. 2014, 2014.

CHIAVENATO, I. **Introdução à teoria geral da administração**. Elsevier Brasil, 2003.

COSTA, S. M. **A exploração do pré-sal e o futuro brasileiro**. 2014. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Contábeis) Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2014.

COUGHANOWR, D. R. *et al.* **Process systems analysis and control**. New York: McGraw-Hill, 1965.

CRIVELLARI, G. P. **Modelagem matemática e simulação de um permeador de gases para separação de CO₂ de gás natural**. 2016. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2016.

DA SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas-curso prático**. São Paulo: Artliber, 2010.

DE CAMPOS, M. C.; SATUF, E.; DE MESQUITA, M. Start-up automation of a petroleum *offshore* platform. *In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. OnePetro, 2000.

DELI, J. I. A. *et al.* Data-driven optimization for fine water injection in a mature oil field. **Petroleum Exploration and Development**, v. 47, n. 3, p. 674-682, 2020.

DE MEDEIROS, M. L. B. *et al.* Gain scheduling control applied to oil and gas separator level loop. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. e55010414397-e55010414397, 2021.

DIÁRIO DO PRÉ-SAL. **O que é Pré-Sal?** Disponível em:
<http://diariodopresal.wordpress.com/o-que-e-o-pre-sal/>. Acesso em: 10 nov. 2021.

DO, V. D.; DANG, X. K.; LE, A. T. Fuzzy adaptive interactive algorithm for rig balancing optimization. *In: 2017 International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom)*. IEEE, 2017. p. 143-148.

DUARTE, R. A. *et al.* Ganhos de Produtividade em um Circuito de Britagem devido à Aplicação de Controle Override. *In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. 2020.

EXAME. **Petrobras volta a ser maior empresa da América Latina**. Disponível em:
<https://goo.gl/pzE1Nj>. Acesso em: 03 de fev. 2018.

FACELI, K. *et al.* **Inteligência artificial: Uma abordagem de aprendizado de máquina**. Rio de Janeiro. LTC. 2021.

FATOS E DADOS. **Somos destaque em exportações**. Disponível em
<https://goo.gl/uNQorQ>. Acesso em: 06 de mar. 2018.

FERREIRA, C. A. L. Pesquisa quantitativa e qualitativa: perspectivas para o campo da educação. **Revista Mosaico**, v. 8, n. 2, p. 173-182, 2015.

FREITAS, C. H. de. **Sistema especialista fuzzy para dimensionamento de bombeio mecânico**. 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Computação). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2010.

FREITAS, D. S. de. *et al.* **Controle de força e rotação de uma unidade de reparo por atrito usando controlador PID e inteligência artificial**. 2014. 173 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2014.

FONSECA, R. R.. **Sintonia e estabilidade**. Notas de aula. UFS. 2021.

FORSMAN, K. Implementation of advanced control in the process industry without the use of MPC. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 7, p. 514-519, 2016.

GARCIA, C. **Controle de processos industriais: estratégias convencionais**. Editora Blucher, 2017.

GARCIA, C. **Controle de processos industriais: estratégias modernas**. Editora Blucher, 2019.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos Vol. 1**. Edusp, 2005.

GENÉTICOS. **Algoritmos Genéticos**. Disponível em:
<https://www.algoritmosgeneticos.com.br>. Acesso em: 18 de novembro de 2021.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

GODOY, R. J. C. de. **Plantwide control: a review and proposal of an augmented hierarchical plantwide control design technique.** 2017. 198 f. Tese (Doutorado Engenharia de Sistemas). Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2017.

GUALBERTO, A. **Manual Prático do Deep Learning - Redes Neurais Profundas.** Machine Learning Analyst at Wildlife Studios. 2020.

GUNNERUD, V.; URSIN-HOLM, S.; TEIXEIRA, A. F. Advanced Optimization Techniques Applied to a Petrobras FPSO. *In: SPE Middle East Intelligent Energy Conference and Exhibition.* OnePetro, 2013.

HANGA, K. M.; KOVALCHUK, Y. Machine learning and multi-agent systems in oil and gas industry applications: A survey. **Computer Science Review**, v. 34, p. 100191, 2019.

HASSAN, A.; ELKATATNY, S.; ABDULRAHEEM, A. Application of artificial intelligence techniques to predict the well productivity of fishbone wells. **Sustainability**, v. 11, n. 21, p. 6083, 2019.

HERVE, P.; PRADO, G.; ROSNER, M. How Machine Learning is Improving Production on Offshore Platforms. *In: Offshore Technology Conference.* OnePetro, 2020.

HOLANDA, A. Questões sobre pesquisa qualitativa e pesquisa fenomenológica. **Análise psicológica**, v. 24, n. 3, p. 363-372, 2012.

HORI, E. S. **Contribuição ao estudo de controle plantwide: controle indireto e coordenação de controladores descentralizados.** 2005. 165 f. Tese (Doutorado Engenharia Química) Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, Brasil, 2005.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. de. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

JUNIOR, J. D. S. *et al.* Controle de nível em tanques separadores através de técnica não-lineares: controle fuzzy sintonizado via algoritmo genético. *In: XVII Congresso Brasileiro de Automática-CBA 2010.* 2010.

JÚNIOR, J. I. S. S. *et al.* LOGICA FUZZY PARA CONTROLE DE VASO SEPARADOR TRIFASICO EM PLANTAS DE PROCESSAMENTO PRIMARIO DE PETRÓLEO. *In: XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Fortaleza, 2013.

KIM, Y. S. *et al.* Design a Stable PID Controller for Dynamic Positioning in FPSO Vessels. *In: The Thirteenth ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium.* OnePetro, 2018.

KOBAYASHI, T.; TANI, T.; MLIYAMOTO, S. Automation of reformer process in petroleum plant using fuzzy supervisory model predictive multivariable control system. *In: Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems.* FUZZ-IEEE 2000 (Cat. No. 00CH37063). IEEE, 2000. p. 1021-1024.

KUANG, L. *et al.* Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development. **Petroleum Exploration and Development**, v. 48, n. 1, p. 1-14, 2021.

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos (3a edição)**. Brasport, 2012.

LONGWEN, X; LIANG; J. J. **Oil reservoir production process set point optimizing method based on hybrid genetic algorithm**. Beijing University of Civil Engineering and Architecture Guizhou University of Finance and Economics, China, 2016.

LUYBEN, W. **Plantwide dynamic simulators in chemical processing and control**. CRC Press, 2002.

MARTINS, C. F. *et al.* **Estudo do desempenho de um separador trifásico devido aos efeitos dos movimentos de uma FPSO sob ação de ondas do mar**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 2017.

MATSUMOTO, F. T. **Modelagem de efeitos de segunda-ordem nos movimentos de roll de plataformas tipo FPSO**. 2014. 176 f. Tese (Doutorado Engenharia Naval e Oceânica) Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2014.

MECABÔ, L. *et al.* **Desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista para apoio à manutenção de turbocompressores centrífugos de gás natural**. 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2007.

MONTEIRO, D. M. *et al.* **PROCESSOS DE SEPARAÇÃO NA CADEIA PRODUTIVA DE HIDROCARBONETOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. II CONEPETRO**. 12/07/2016.

MORENO, U. F.; BRUCIAPAGLIA, A. H. **ATUAÇÃO DE ENGENHEIROS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO NO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS: NOVAS ESTRATÉGIAS PEDAGÓGICAS PARA A FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS**. 2o Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Rio de Janeiro, 15 a 18 de junho de 2003.

MUÑOZ, D. S. M. **Plantwide control: aplicação numa unidade de compressão de gás de uma plataforma offshore**. 2018. 104 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Automação e Sistemas) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2018.

NEGOCIOS. **Petrobras já cortou mais de 180 mil empregos terceirizados**. Disponível em: <https://goo.gl/4WsF3D>. Acesso em: 06 de mar. 2018.

NETO, A. M B. *et al.* **ANÁLISE DO FATOR DE COMPRESSIBILIDADE NO EQUILÍBRIO LÍQUIDO-VAPOR DE FLUIDOS DE PETRÓLEO UTILIZANDO O SIMULADOR PVTpetro**. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, v. 1, n. 3, p. 641-646, 2015.

BOSCH NETO, J. C. *et al.* **Modelagem e simulação de processos dinâmicos aplicados às engenharias química, de bioprocessos, elétrica, mecânica, de controle, aeroespacial e fluidodinâmica computacional**. Appris editora. 2019.

NIU, L. *et al.* Design and application of composite PID control in laminator heating system. *In: 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*. IEEE, 2011. p. 3848-3851.

NOVAES, K.; SUSLICK, S. B. **SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE RESERVAS DE PETRÓLEO, UTILIZANDO GEOTECNOLOGIAS**. BPG e UFRJ. Rio de Janeiro - RJ. 15 a 18 junho de 2003.

NUNES, G. C.; DE MEDEIROS, J. L.; ARAÚJO, O. Q. F. **Modelagem e controle da produção de petróleo: aplicações em Matlab**. Editora Blucher, 2010.

OGATA, K.; SEVERO, B. **Engenharia de controle moderno**. Prentice Hall do Brasil, 1998.

OGUNNAIKE, B. A. **Process dynamics, modeling, and control**. 1994.

PETROBRAS. **Estratégia**. Disponível em: <https://goo.gl/YsWxQV>. Acesso em: 06 de mar. 2018.

PETROBRÁS. **Petrobrás**. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br>. Acesso em: 10 de novembro de 2021.

PINA, A. A. **Metodologias de Análise, Síntese e Otimização de Sistemas para Produção de Petróleo Offshore Através de Metamodelos e Enxame de Partículas**. 2010. 176 f. Tese (Doutorado Engenharia Civil) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

PINOSOFA, A. *et al.* Unmanned *offshore* platforms: Automation kit. *In: Trinidad and Tobago Energy Resources Conference*. OnePetro, 2010.

RESENDE, M. O. *et al.* DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ESPECIALISTA PARA SELEÇÃO DE REATORES DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 25, n. 1, p. 83-91, 2017.

RIBEIRO, C. H. P. **Controle Preditivo Multivariável com requisitos de qualidade em plataformas de produção de petróleo**. 2012, 83 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

RICHARD C. D; BISHOP, R. H. **Modern control systems**. Pearson Prentice Hall, 2008.

SABER, N. **Phase behaviour prediction for ill-defined hydrocarbon mixtures**. 175p. Thesis (Doctorate) – Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta, Edmonton. 2011.

SANTOS, D. F. **EQUILÍBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO ENVOLVENDO SISTEMA MODELO DE PETRÓLEO, ÁGUA E LÍQUIDOS IÔNICOS**. 2020. 82 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Processos) Universidade Tiradentes, Aracaju, Brasil, 2020.

- SAUER, C. **Sintonia de controlador pid por meio de algoritmo genético**. 2019. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Eletricista) Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2019.
- SEBORG, D. E. *et al.* **Process Dynamics and Control**. WILEY, (4th ed.). 2016
- SHUKLA, A.; KARKI, H. Application of robotics in *offshore* oil and gas industry—A review Part II. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 75, p. 508-524, 2016.
- SILVA, F. R. da. **Estudo de um novo sistema de separação primária de gás-óleo-água para plataformas de petróleo**. 2013. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2013.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. Editora Blucher, 2007.
- SIRCAR, A. *et al.* **Application of machine learning and artificial intelligence in oil and gas industry**. Petroleum Research, 2021.
- SKOGESTAD, S. Control structure design for complete chemical plants, computers and chemical engineering. **Computers & Chemical Engineering**, n. 1-2, v. 28, p. 219-234, 2004.
- SOARES, H. C. A. G. **Gerenciamento da abertura do Choke de injeção de gás no método Gas-Lift contínuo usando controladores Fuzzy**. 209. 71 f. Dissertação (Mestrado Ciência e Engenharia de Petróleo) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2019.
- SOUSA, E. B. A. **Importância econômica do pré-sal para o Brasil**. 2015. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Econômicas) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2015.
- SOUZA, L. S. O mercado internacional do petróleo e o pré-sal brasileiro. **Revista da Escola de Guerra Naval**, v. 27, n. 1, p. 239-270, 2021.
- TAIFU, L. *et al.* **Optimization method of achieving oil field pumping unit oil-extraction energy conservation and production increasing with back propagation (BP) neural network and non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA) 2**. Application filed by Chongqing University of Science and Technology. China, 2013.
- TEIXEIRA, H. C. G. *et al.* **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. Editora Blucher, 2015.
- TELLES, M. S. *et al.* **Sistema especialista fuzzy para diagnóstico de transformadores de potência**. 2005. 140 f. Dissertação (Mestrado Ciência da Computação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2005.
- TRICA, D. J. Dynamic modeling of a topside process plant with modified black-oil approach. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 212, p. 110316, 2022.
- TODA MATERIA. **História da Petrobras**. Disponível em: <https://goo.gl/HBHXFZ>. Acesso em: 06 de mar. 2018.

CAMPOS, O. T. La internet industrial de las cosas & la inteligencia artificial, el impacto en la economía y las oportunidades de nuevos negocios. **Revista CIES Escolme**, v. 11, n. 2, p. 127-139, 2020.

UMANOL, M. *et al.* Fuzzy decision trees by fuzzy ID3 algorithm and its application to diagnosis systems. *In: Proceedings of 1994 IEEE 3rd International Fuzzy Systems Conference*. IEEE, 1994. p. 2113-2118.

VIDAL, L. C. **Aplicação fuzzy x pid: técnicas de controle em ambientes simulados**. Appris Editora e Livraria Eireli-ME, 2015.

VINADE, C. A. C. *et al.* **Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a sistemas hidráulicos e implementação de um sistema especialista**. 2003. 217 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2003.

WANG, Y. *et al.* A model for deepwater floating platforms selection based on BP artificial neural networks. *In: The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro, 2011.

YIN, R. K. **Estudo de Caso, planejamento e métodos**. 2ª ed. São Paulo: Bookman, 2001.