



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUÍSA BARROS LEAL PESSOA DE MELLO

**ANÁLISE PARA MODERNIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL
DE UMA CALDEIRA A VAPOR INSERIDA EM AMBIENTE AGROINDUSTRIAL**

Recife

2022

LUÍSA BARROS LEAL PESSOA DE MELLO

**ANÁLISE PARA MODERNIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL
DE UMA CALDEIRA A VAPOR INSERIDA EM AMBIENTE AGROINDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Adrien Joan Sylvain Durand-Petiteville

Coorientador: Eng. Antônio Francisco Dourado Pessoa de Mello

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

M527a Mello, Luísa Barros Leal Pessoa de.
Análise para modernização de um sistema de controle de nível de uma caldeira a vapor inserida em ambiente agroindustrial / Luísa Barros Leal Pessoa de Mello. 2022.
81 f: figs., tabs., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Adrien Joan Sylvain Durand-Petiteville
Coorientador: Eng. Antônio Francisco Dourado Pessoa de Mello
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Mecânica, Recife, 2022.
Inclui referências e apêndice.

1. Engenharia Mecânica. 2. Caldeira. 3. Controle de nível. 4. PID. 5. MATLAB.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022 - 344



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



**ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2**

Ao 19.º dia do mês de maio do ano de dois mil e vinte e dois, às 08:30 horas, de forma virtual através da plataforma google meet, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **Análise para modernização de um sistema de controle de nível de uma caldeira a vapor inserida em ambiente agroindustrial**, elaborado pela aluna **Luísa Barros Leal Pessoa de Mello**, matrícula 008.647.134/10, composta pelos professores **Adrien Durand-Petiteville** (orientador), **Pedro Manuel Gonzalez del Foyo** (membro titular) e **Guaraci Guimaraes Bastos Junior** (membro titular). Após a exposição oral do trabalho, a candidata foi arguida pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela aprovação da candidata, atribuindo-lhe a média 8, julgando-a apta à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Prof. Orientador: Prof. **Adrien Durand-Petiteville** Nota: 8

Assinatura _____

Prof. Membro interno: Prof. **Pedro Manuel Gonzalez del Foyo** Nota: 8

Assinatura _____

Prof. Membro interno: Prof. **Guaraci Guimaraes Bastos Junior** Nota: 8

Assinatura _____

Recife, 19 de maio de 2022.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

Dedico este trabalho às minhas avós Lêda e Sônia que, do céu, olham por mim.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por sempre ter me dado forças para seguir em frente sem abaixar a cabeça para os obstáculos enfrentados.

Agradeço à minha família por todo o apoio durante o curso, em especial: à minha mãe, pelas acolhidas e por sempre me incentivar a focar nos meus estudos em momentos difíceis, meu exemplo de foco e disciplina; ao meu pai, meu professor particular nas horas vagas, engenheiro mecânico formado com láurea pela UFPE, meu grande espelho e inspiração, tanto no âmbito pessoal como no profissional.

Gostaria também de agradecer ao professor Adrien Joan Sylvain Durand-Petiteville, por aceitar me orientar e pelos ensinamentos passados. Ao engenheiro Antônio Francisco Dourado Pessoa de Mello, por me ensinar detalhadamente sobre o processo de funcionamento de uma caldeira e seu controle de nível.

Não poderia deixar de agradecer, especialmente, ao professor Francisco Espedito de Lima, que nem imagina o quanto suas constantes palavras de apoio e incentivo me impactaram ao longo do curso. Um ser humano incrivelmente ímpar, como poucos que conheci.

Os agradecimentos ainda estendem-se ao meu pai e sua família, pelo acesso concedido à Usina D'Pádua, situada no município de Rio Tinto, no estado da Paraíba, e seus equipamentos e funcionários, tornando possível a realização deste estudo.

Agradeço aos colegas que passaram por minha vida e que pude deixar um pedaço de mim ou ter um pedaço destes em mim. Aos que ficaram, aos que estiveram de passagem, agradeço por tornar um deleite, a caminhada à graduação.

Por fim, tomo este tempo para agradecer aos pagadores de impostos – me incluo nestes – por proverem o ensino superior público.

“Dulcius ex asperis.”
(Clan Fergusson)

RESUMO

Focado no contexto de uma caldeira aquatubular inserida em uma agroindústria, este estudo apresenta a análise de um sistema de controle de nível pneumático e sua respectiva proposta de modernização, utilizando-se de um controle de nível elétrico. Em conformidade com o controle de nível utilizado, o modelo elétrico trata de um controle a três elementos: o nível, a vazão de vapor e a vazão de água; e conta com a presença de dois controladores em cascata, do tipo proporcional integral derivativo (PID). A abordagem apresentada é tomada com o auxílio do software *MATLAB*, onde a sintonização dos controladores elétricos associados ao processo modernizado é realizada. Para realizar essas sintonizações, algumas seções da malha de controle são estudadas separadamente. Ao fim de todas as análises, é possível observar o comportamento e as melhorias do sistema elétrico controlado, quando comparado ao não controlado. Após a obtenção dos ganhos dos PIDs associados ao processo, observa-se a influência da presença do distúrbio causado pelo vapor no processo controlado. Com a inserção do distúrbio, é possível observar o quão valioso é o controle de nível a três elementos para uma caldeira. Além de propor uma modernização ao sistema pneumático já existente, visto que um sistema elétrico torna o processo mais rápido, mais preciso e de fácil ajuste, este estudo resultou em uma análise sobre os diferentes arranjos de controle de nível elétrico em uma caldeira a vapor, incluindo a listagem de equipamentos para uma possível aplicação prática.

Palavras-chave: caldeira; controle de nível; PID; *MATLAB*.

ABSTRACT

Focused on the context of a water tube boiler inserted in a agroindustry, this paper presents the analysis of a pneumatic level control system and its modernisation proposal, relying on a electrical level control. In conformity with the current level control, the electrical model comes down to a three element control: the level, the vapor flow and the water flow; and counts with the presence of two proportional integral derivative (PID) cascade controllers. The present approach relies on the use of MATLAB, where the tuning of the electrical controllers associated with the process is fulfilled. To fulfill these tunings, some sections of the control loop are studied separately. At the end of these analysis, it's possible to observe the behavior and the improvements of the controlled electrical system, when compared to the non controlled one. Once the gains of the PIDs associated to the process are obtained, the influency of the vapor disturbance is observed. With the insertion of this disturbance, it's possible to realize how valuable the three element control is to a boiler. In addition to proposing a modernization to the existing pneumatic system, as a electrical system makes the process faster, more accurate and easier to adjust, this study resulted in an analysis of the different electrical level control arrangements in a steam boiler, including a list of equipments for a possible practical application.

Keywords: boiler; level control; PID; MATLAB.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Usina D’Pádua, Rio Tinto - PB.	16
Figura 2 – Processo do projeto de um sistema de controle.	18
Figura 3 – Esquema simplificado de uma caldeira aquatubular.	19
Figura 4 – Controle de nível a 1 elemento: nível da caldeira.	21
Figura 5 – Diagrama de blocos do controle de nível a 1 elemento.	21
Figura 6 – Controle de nível a 2 elementos: nível da caldeira e vazão de vapor.	22
Figura 7 – Diagrama de blocos do controle de nível a 2 elementos.	23
Figura 8 – Controle de nível a 3 elementos: nível da caldeira, vazão de vapor e vazão de água.	23
Figura 9 – Diagrama de blocos do controle de nível a 3 elementos.	24
Figura 10 – Controlador de nível LCR2652 para aplicação prática em caldeiras a vapor.	25
Figura 11 – Interface homem-máquina BHD50 operada em conjunto com o controlador.	25
Figura 12 – Ilustração de um sensor de condutividade elétrica.	27
Figura 13 – Sensor de condutividade elétrica e controlador associado.	27
Figura 14 – Funcionamento do sensor de capacitância.	28
Figura 15 – Sensor de capacitância.	28
Figura 16 – Sensor flutuador (tipo boia).	29
Figura 17 – Célula de pressão diferencial.	30
Figura 18 – Placa de orifício.	31
Figura 19 – Sensor de vazão com placa de orifício.	32
Figura 20 – Atuador da fabricante Hiter, que deve ser utilizado em conjunto com uma válvula.	32
Figura 21 – Válvula Série 85 - Duas Vias (conjunto válvula + atuador).	33
Figura 22 – Esquema de um Controlador PID.	35
Figura 23 – Esquema de controle pneumático a três elementos da década de 80.	37
Figura 24 – Caldeiras a vapor e esteiras de alimentação que transportam o bagaço.	41
Figura 25 – Caldeiras a vapor, bagaço de cana utilizado como fonte de energia.	42
Figura 26 – Diagrama de blocos do sistema de controle de nível a 3 elementos.	42
Figura 27 – Diagrama de blocos de controle de nível a 3 elementos de uma caldeira a vapor.	44
Figura 28 – Diagrama do controle de nível com destaque para o sistema da válvula.	46
Figura 29 – Resposta do sistema em malha fechada $G_{valvMF}(s)$ para entrada degrau 0,1.	48
Figura 30 – Configuração do sistema da válvula isolado.	49
Figura 31 – Lugar das raízes para sistema em malha fechada $G_{valvMF}(s)$	50
Figura 32 – Resposta do sistema em malha fechada $G_{Kpvalv(MF)}(s)$ para entrada degrau 0,1.	51
Figura 33 – Resposta do sistema em malha fechada $G_{cvMF}(s)$ a uma entrada degrau 0,1.	54

Figura 34 – Resposta do sistema em malha fechada $G_{cvMF}(s)$ a uma entrada degrau 0,1.	56
Figura 35 – Malha de controle de nível a 2 elementos com os blocos da válvula unificados.	56
Figura 36 – Malha de controle de nível a 2 elementos sem distúrbio, blocos da válvula unificados.	57
Figura 37 – Malha de controle a 2 elementos simplificada, sem distúrbio.	57
Figura 38 – Lugar das raízes de $G_{red}(s)$	59
Figura 39 – Resposta de $G_{red}(s)$ em malha fechada a uma entrada em degrau 0,1.	60
Figura 40 – Lugar das raízes de $G_{red}(s)$	62
Figura 41 – Lugar das raízes de $G_{red}(s)$ com imagem ampliada.	63
Figura 42 – Resposta do sistema em malha fechada $G_{cvMF}(s)$ a uma entrada degrau 0,1.	64
Figura 43 – Nova resposta de $G_{redMF}(s)$ a uma entrada em degrau 0,1.	65
Figura 44 – Resposta de $G_{rcMF}(s)$ a uma entrada em degrau 0,1.	67
Figura 45 – Malha de controle de nível a 2 elementos com a presença do distúrbio.	68
Figura 46 – Curva de resposta do nível ao degrau, sistema a 2 elementos com distúrbio.	69
Figura 47 – Curva de resposta do distúrbio a uma entrada em degrau 0,5.	69
Figura 48 – Curva de resposta do nível a um degrau para a configuração 1.	70
Figura 49 – Curva de resposta do nível a um degrau para a configuração 2.	71
Figura 50 – Curva de resposta do nível a um degrau para a configuração 3.	71
Figura 51 – Diagrama de blocos de controle de nível a 3 elementos de uma caldeira a vapor.	72
Figura 52 – Curva de resposta do nível em sistema de controle a 3 elementos com distúrbio.	73
Figura 53 – Comparativo dos sistemas controlados obtidos.	74
Figura 54 – Malha de controle de nível a 3 elementos, com controladores PIs.	75
Figura 55 – Comparativo das respostas do nível para controles PID x PI.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Funcionamento do sistema de controle.	39
Tabela 2 – Características da Caldeira.	41
Tabela 3 – Valores dos polos da função de transferência $G_{valv}(s)$ em malha aberta e fechada.	46
Tabela 4 – Parâmetros de desempenho da resposta do sistema em malha fechada $G_{valvMF}(s)$	48
Tabela 5 – Parâmetros obtidos para o controlador da válvula.	53
Tabela 6 – Parâmetros de desempenho da resposta do sistema em malha fechada $G_{cvMF}(s)$	53
Tabela 7 – Parâmetros obtidos para o controlador da válvula.	55
Tabela 8 – Parâmetros de desempenho da resposta do sistema em malha fechada $G_{cvMF}(s)$	55
Tabela 9 – Valores dos zeros e polos da função de transferência $G_{redMF}(s)$	58
Tabela 10 – Parâmetros de desempenho da resposta do sistema em malha fechada $G_{redMF}(s)$	60
Tabela 11 – Parâmetros obtidos para o controlador da válvula.	61
Tabela 12 – Parâmetros de desempenho da resposta do sistema em malha fechada $G_{cvMF}(s)$	63
Tabela 13 – Novos parâmetros de desempenho da resposta de $G_{redMF}(s)$	64
Tabela 14 – Parâmetros obtidos para o controlador do nível.	66
Tabela 15 – Parâmetros de desempenho da resposta de $G_{rcMF}(s)$	66
Tabela 16 – Alguns dos ganhos testados nos controladores.	70
Tabela 17 – Valores dos ganhos na configuração final dos controladores.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNA	Confederação de Agricultura e Pecuária do Brasil
PIB	Produto Interno Bruto
PID	Proporcional Integral Derivativo
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
MISO	<i>Multiple Input Single Output</i>
PI	Proporcional Integral

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	COMPORTAMENTO DE SISTEMAS	18
2.2	CALDEIRAS A VAPOR	18
2.2.1	PROCESSO DE FUNCIONAMENTO DA CALDEIRA	19
2.3	IMPORTÂNCIA DE UM SISTEMA EFETIVO DE CONTROLE DE NÍVEL	20
2.3.1	Controle de Nível a 1 Elemento	21
2.3.2	Controle de Nível a 2 Elementos	22
2.3.3	Controle de Nível a 3 Elementos	23
2.3.3.1	Escolha do Controle a 3 Elementos	24
2.3.3.2	Implementação Prática	24
2.4	SENSORES DE NÍVEL	26
2.4.1	Sensor de Condutividade Elétrica	27
2.4.2	Sensor de Capacitância	28
2.4.3	Sensor Tipo Boia (ou Flutuador)	29
2.4.4	Células de Pressão Diferencial	29
2.4.5	Implementação Prática	30
2.5	SENSORES DE VAZÃO	31
2.6	ATUADOR DE CONTROLE	32
2.7	CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO	33
2.8	MATLAB	35
3	METODOLOGIA	36
3.1	FUNCIONAMENTO DO SISTEMA PNEUMÁTICO PRESENTE	36
3.2	FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE	38
3.3	PROPOSTA DE MODERNIZAÇÃO: SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO	39
3.4	PARÂMETROS DA CALDEIRA	40
3.5	SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO	40
3.5.1	Esboço do Diagrama de Blocos	41
3.5.2	Distúrbio de Vapor	42
3.5.3	Funções de Transferência do Sistema e Diagrama de Blocos	43
3.5.4	Análise do Sistema	44

4	RESULTADOS	45
4.1	CONTROLADOR DE VAZÃO	46
4.1.1	Projeto de um Compensador	49
4.1.2	Projeto de um controlador PID	52
4.2	CONTROLADOR DE NÍVEL	55
4.2.1	Análise do Sistema a 2 Elementos Simplificado	58
4.2.2	Projeto de um controlador PID	60
4.2.2.1	Ressintonização do Controlador da Válvula	61
4.2.2.2	Sintonização do Controlador de Nível	62
4.3	ANÁLISE DO DISTÚRBIO	68
5	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE UTILIZADO NO MATLAB	80

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio é um dos pilares da economia brasileira, presente no mercado local e no mercado de exportações. Apesar de todos os desafios enfrentados nos últimos 2 anos, em face à pandemia de COVID-19, continua crescendo e contribuindo de forma decisiva para a economia nacional.

No ano de 2020, o Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio brasileiro avançou 24,31% em relação ao ano de 2019, tendo uma participação de 26,6% no PIB brasileiro. Em valores monetários, o PIB do País totalizou R\$ 7,45 trilhões em 2020, e o PIB do agronegócio chegou a quase R\$ 2 trilhões (CNA, 2021).

Apesar de no ano de 2021 o agronegócio ter crescido menos do que no ano anterior, ainda manteve um lugar de destaque no PIB brasileiro. De acordo com a Confederação de Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), o crescimento esperado era de 3,5%, mas foi superado para 9,4%, podendo a participação nacional chegar a 28% (AGRO, 2022).

Já para o ano de 2022, as expectativas são mais baixas, mas o mercado confia no crescimento constante do agronegócio, crescendo de 3% a 5% em 2022 (AGRO, 2022).

Assim, nota-se que o agronegócio ocupa uma parcela considerável na economia brasileira, sempre com perspectivas de crescimento, até em anos de pandemia. Além disso, é de interesse de qualquer indústria, otimizar suas operações, focando em eficiência e qualidade. Assim, surgiu a ideia deste estudo, onde serão observadas melhorias aplicáveis ao sistema de uma caldeira aquatubular inserida em ambiente agroindustrial.

As melhorias citadas implementadas tratam da modernização do sistema de controle de nível, através da sugestão de um sistema elétrico, em possível substituição a um sistema pneumático. A escolha do tema foi fundamentada no princípio de que o funcionamento inadequado de uma caldeira a vapor impacta diretamente o processo de uma usina sucroalcooleira como um todo. Pode-se realizar uma analogia de que a caldeira é o coração de uma usina, responsável por alimentar a produtividade de todo o sistema.

O controle do nível de uma caldeira a vapor é de suma importância para o funcionamento do sistema de forma segura, mantendo o nível de água dentro de um limite prescrito (ZHOU; SUN, 2011). É sabido que o desenvolvimento de um sistema de controle para essa situação, trata-se de um processo não linear, complexo e de difícil precisão (HALIHAL, 2019).

A aplicação de caldeiras em plantas de usinas de cana-de-açúcar é imprescindível para o funcionamento do processo (BARBOSA; SILVA; GÓMEZ, 2008). Sendo assim, os parâmetros da caldeira – neste estudo, o nível de seu tanque, especificamente – necessitam obedecer aos níveis mínimos de segurança para sua operação (MENG et al., 2020).

Sabendo disso, *a priori*, é necessário realizar uma revisão teórica e prática acerca de sistemas de controle para, só então, realizar um dos estudos necessários para a concretização deste projeto: a disposição de um modelo do sistema de controle de nível e sua análise para a operação de uma caldeira a vapor.

O estudo, pautado no setor sucroalcooleiro, tem como grande objetivo a análise de um sistema de controle elétrico para a manutenção do nível de uma caldeira aquatubular, sendo esse sistema similar ao da caldeira localizada na Usina D'Pádua, no município de Rio Tinto, no estado da Paraíba. Ou seja, as conclusões e estudos aqui obtidas, poderiam ser replicados para o modelo real.

Figura 1 – Usina D'Pádua, Rio Tinto - PB.



Fonte – Autor (2022).

O conteúdo restante deste estudo está organizado da forma seguinte. Uma vez realizada a explicação da necessidade deste projeto e a revisão da literatura quanto aos tópicos abordados, é possível partir para o detalhamento do sistema presente e as modernizações propostas. Assim, será possível realizar a análise do sistema. Em seguida, simulações acerca da implementação desse sistema de controle de nível de fluido numa caldeira serão realizadas, visualizando estratégias e melhorias a serem futuramente implementadas de forma prática.

1.1 OBJETIVOS

O presente estudo tem por finalidade promover a análise acerca de um modelo moderno de controle, que permita a operação segura de uma caldeira a vapor na Usina D'Pádua. Segurança essa pautada no controle do seu nível de fluido.

1.1.1 Objetivo geral

Expandir conhecimentos e aplicá-los acerca da modelagem de um controlador Proporcional Integral Derivativo - PID - para aplicação em simulações de diferentes implementações em um sistema de controle de nível de fluido de uma caldeira a vapor.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudo sobre dispositivos e arranjos disponíveis para a concretização do projeto.
- Montagem do sistema de controle da caldeira.
- Projeto de controladores PIDs a serem utilizados na caldeira.
- Análise, simulação computacional, avaliação do sistema dinâmico.
- Comparativo dos resultados obtidos com as estratégias empregadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

É de suma importância a revisão teórica de todos os conceitos a serem abordados, de modo a expandir o conhecimento do realizador e facilitar a compreensão do leitor.

2.1 COMPORTAMENTO DE SISTEMAS

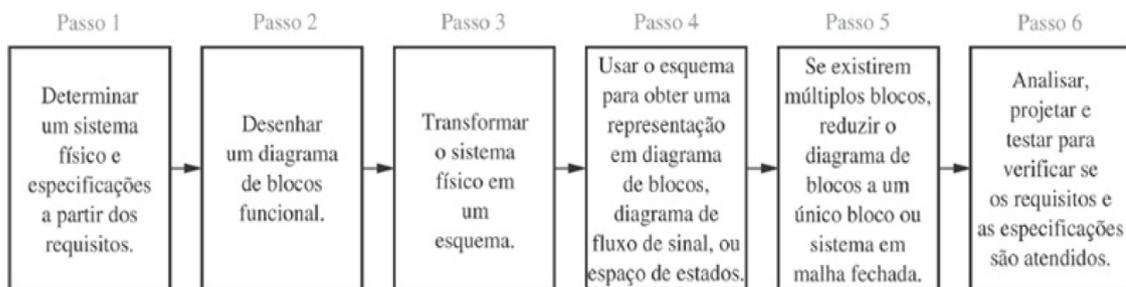
De acordo com Nise (2013), alguns passos são necessários para realizar o projeto do controle efetivo de um sistema. Esses passos podem ser vistos, de forma sucinta na Figura 2.

Antes de mais nada, é necessário ter requisitos e especificações do projeto, além do conhecimento da operação. Com isso, é possível criar um modelo do sistema, no formato de diagrama de blocos.

Os diagramas de blocos representam os componentes de um sistema e como estes interagem entre si no funcionamento deste. O diagrama deve ser simplificado ao máximo, com o intuito de trabalhar-se com apenas um bloco, tratando o sistema como um único componente.

Após a obtenção de um diagrama de apenas um único componente que represente o sistema como um todo, é possível realizar as análises, possíveis projetos ou melhorias que se deseje aplicar e, por fim, observar a resposta do sistema.

Figura 2 – Processo do projeto de um sistema de controle.



Fonte – Nise (2013).

2.2 CALDEIRAS A VAPOR

De acordo com a norma regulamentadora NR-13, uma caldeira pode ser definida como:

Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refeedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo. (BRASIL, 2019).

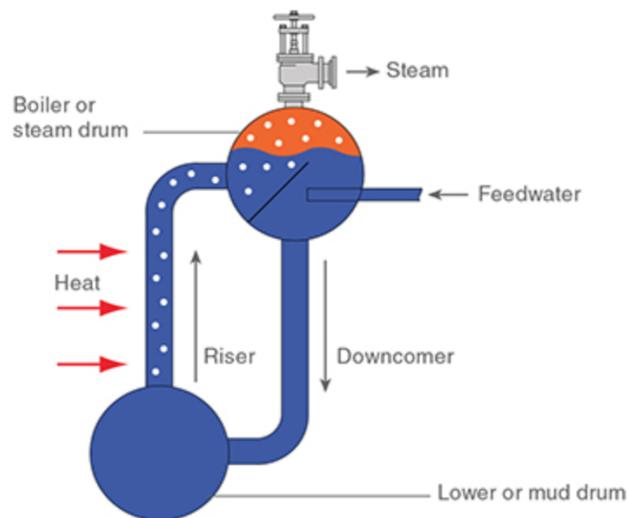
Ou seja, pode-se dizer similarmente que o vapor é produzido pela caldeira através da queima de combustível, a partir de onde será aplicado em algum processo. De acordo com Torreia (2001), o uso de vapor d'água como fluido de trabalho é dado ao seu alto calor específico, além da fácil disponibilidade de água na maior parte dos locais, com baixo custo.

2.2.1 PROCESSO DE FUNCIONAMENTO DA CALDEIRA

De forma sucinta, porém ao mesmo tempo abrangente, o funcionamento de uma caldeira aquatubular pode ser detalhado, assim como a explicação da finalidade da aplicação de tal equipamento no processo.

Uma caldeira trata-se de um gerador de vapor com dois tubulões, um inferior - que é sempre cheio e não será levado em consideração no estudo - e um superior - que é onde controla-se o nível. Estes tubulões são interligados por tubos, o que pode ser visto na Figura 3. A alimentação é realizada através de água, transportada por uma bomba centrífuga multiestágio de rotação constante.

Figura 3 – Esquema simplificado de uma caldeira aquatubular.



Fonte – Spirax Sarco (2021).

Em usinas de açúcar e etanol, em sua maioria, o combustível utilizado é o bagaço de cana. No processo ocorre a produção de vapor saturado, que é levado a um superaquecedor. Assim, a caldeira produz vapor superaquecido. O vapor gerado tem como principal resultado a geração de energia mecânica em turbinas, que são divididas em dois grandes grupos: as turbinas que tem como finalidade a geração de energia elétrica e as que geram energia mecânica de forma direta, como para o acionamento das moendas, das navalhas de corte e desfibradores e acionamento da bomba de alimentação da caldeira. Também, eventualmente, fornece vapor em forma de calor para o processo.

Esse tipo de sistema trabalha com pressão constante e a produção de vapor varia com a necessidade da unidade de produção, podendo variar de 0 a 100% da capacidade. Essa transição de capacidade de produção é uma situação que ocorre em questão de minutos.

O nível de líquido na caldeira deve ser mantido dentro dos parâmetros de especificação, de forma a ter uma operação segura. De acordo com o Professor Martinelli (s.d.), em casos onde o nível de água no reservatório ficar muito alto, o vapor arrastará consigo água (líquida), prejudicando a sua qualidade e danificando possíveis equipamentos ligados à linha de vapor. Ainda de acordo com o autor anteriormente citado, em casos onde o nível de água no reservatório é baixo, sendo a mais séria e frequente das emergências em caldeiras, a superfície imersa em água fica reduzida, onde o calor ocasiona deformações nos tubos, vazamentos, danos no refratário e, no pior dos casos, uma explosão.

Então, por toda a importância que as caldeiras têm no cenário de plantas industriais e pela necessidade de um controle efetivo, visando a operação em segurança, faz-se extremamente necessário o conhecimento de métodos para controle de nível dos reservatórios.

2.3 IMPORTÂNCIA DE UM SISTEMA EFETIVO DE CONTROLE DE NÍVEL

Numa situação onde o fluxo de vapor de uma caldeira aumenta repentinamente, a pressão do tubulão sofre uma diminuição, implicando em uma aceleração do processo de vaporização. Embora o volume de água não aumente, o volume de vapor saturado causa o fenômeno de falso do nível (MENG et al., 2020).

Assim, torna-se necessária a introdução de sistemas efetivos de controle. Alguns modelos de controle não possuem informações suficientes para lidar com a influência de um nível de água falso. Assim, torna-se bastante importante envolver três sinais de medição: o nível da água, o fluxo de abastecimento da mesma e o fluxo de vapor na saída do sistema (ZANG; WANG; YU, 2010). É necessário utilizar um equipamento que lide com os inúmeros tipos de distúrbios e incertezas, mantendo o ambiente dinâmico estável e em equilíbrio. Por este motivo, escolhe-se trabalhar com controladores do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) (ZHOU; SUN, 2011).

Apesar de estarem preparados para lidar com quaisquer distúrbios e incertezas, a ocorrência de um erro estático quando um controlador PID convencional é aplicado para controlar o nível de água do tubulão da caldeira a vapor, baseado no erro, pode implicar numa redução da faixa de flutuação do nível de água e do fluxo de abastecimento de água (ZHOU; SUN, 2011). Esse erro é perigoso, já que o nível de água de uma caldeira é um parâmetro que afeta a operação segura da caldeira. Por isso, as considerações necessárias para evitar este tipo de erro devem ser tomadas na modelagem do sistema.

Quanto aos tipos de arranjos possíveis para realizar o controle de nível de uma caldeira, é possível classificá-los de acordo com o número de elementos levados em consideração para o controle. De forma intrínseca, sabe-se que quanto mais informações são de domínio do operador,

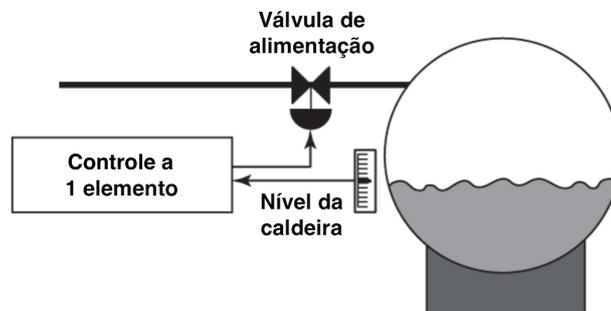
um controle mais efetivo poderá ser realizado. Parece então intuitivo recorrer à opção com mais informações disponíveis, o que será realmente adotado neste trabalho, já que a caldeira em questão possui esse *modus operandi*. De qualquer forma, os três tipos de controles de nível existentes no mercado serão detalhados no que segue.

2.3.1 Controle de Nível a 1 Elemento

Os controles de nível a um elemento são a forma mais simples de controle de nível de uma caldeira. Possuem uma malha similar ao que é visualizado na Figura 4, onde é levado em consideração apenas o nível do tubulão superior.

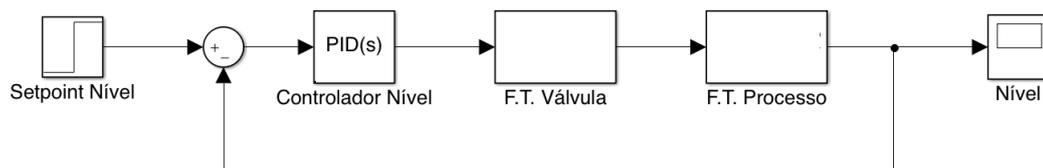
Esse nível é medido através de um sensor apropriado e seu sinal regula adequadamente o fluxo de água de alimentação para manter o nível definido no *setpoint*. Essa manutenção é realizada através da comparação da variável do processo - o nível - com o *setpoint* previamente definido. A diferença resultante é o valor do erro. Os valores do *setpoint* e do erro são levados ao controlador, que gera uma ação corretiva para minimizar o sinal de erro. Assim, o controlador promove a saída adequada para a válvula, que atuará na manutenção do nível. O diagrama de blocos deste tipo de controle está presente na Figura 5.

Figura 4 – Controle de nível a 1 elemento: nível da caldeira.



Fonte – Schneider Electric (2021).

Figura 5 – Diagrama de blocos do controle de nível a 1 elemento.



Fonte – Autor (2022).

É possível citar situações onde, com a abertura da válvula, há um aumento da vazão de vapor que ocasiona arrasto, aumento do nível e diminuição da pressão da caldeira. Com isso, o nível sofreria um aumento. Com esse tipo de controle, ocorre o fenômeno de falso nível e o controlador fechará a válvula de forma errônea, ao invés de abri-la.

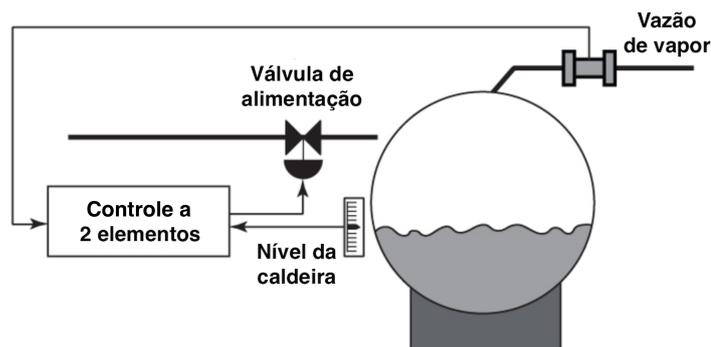
Esse tipo de controle não é recomendado para caldeiras que trabalham com alta potência. Ademais, é necessário que o sistema tenha uma única caldeira e uma única bomba de alimentação, com cargas relativamente estáveis, já que os parâmetros de fluxo de vapor ou da água de alimentação não são considerados.

2.3.2 Controle de Nível a 2 Elementos

Já com relação aos controles de nível a dois elementos, a malha é similar ao esquema visto na Figura 6, onde não apenas o nível do tubulão superior é utilizado como fonte de informação, mas também a vazão de vapor na saída da caldeira. O *modus operandi* do controle a dois elementos (Figura 7) difere do anteriormente visto. O sistema deixa de ser SISO para ser MISO, onde há mais de uma entrada - duas - e uma única saída.

A adição deste segundo elemento é justificada com o intuito de evitar a ocorrência do fenômeno de falso nível - explicado no tópico anterior - que é ocasionado quando há apenas o nível do tubulão como sinal de entrada. Esse segundo elemento promove um controle mais rígido.

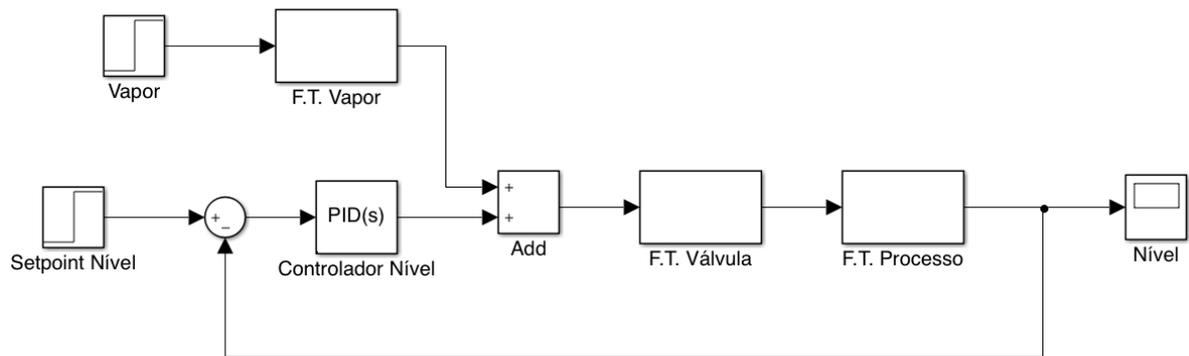
Figura 6 – Controle de nível a 2 elementos: nível da caldeira e vazão de vapor.



Fonte – Schneider Electric (2021).

Há uma placa de orifícios e um transmissor de pressão diferencial, onde o sinal da vazão de vapor é levado a um comparador, juntamente com o nível. Assim, a grande vantagem deste elemento é dada às correções imediatas à demanda de água de alimentação, em resposta a mudanças de carga ou discrepâncias entre a saída de vapor e entrada de água. Exemplificando: quando há um aumento na vazão de vapor, o sistema promove o sinal de abertura da válvula, amenizando a situação do nível.

Figura 7 – Diagrama de blocos do controle de nível a 2 elementos.



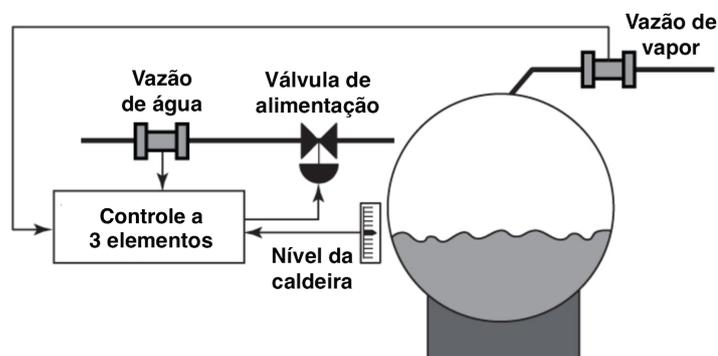
Fonte – Autor (2022).

O controle a dois elementos é aplicado a sistemas de caldeira única, que trabalham com cargas moderadas e onde a água de alimentação é submetida a uma pressão constante.

2.3.3 Controle de Nível a 3 Elementos

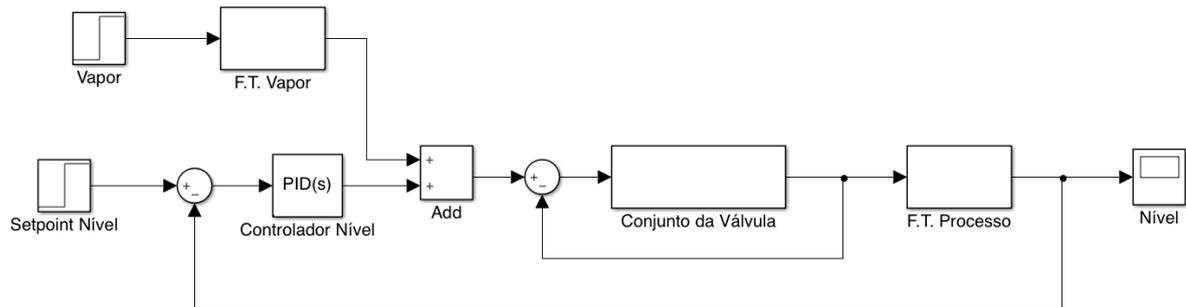
Por fim, para controles de nível a três elementos, a malha é análoga ao sistema visto na Figura 8, onde agora são levados em consideração o nível do tubulão superior, a vazão de vapor e, adicionalmente, a vazão de água. O *modus operandi* do controle é visto na Figura 9, onde nota-se a adição de um ramo de realimentação e um somador, responsáveis por entregar ao sistema a leitura do sensor de vazão de água. O terceiro elemento é importante para realizar correções na variação da entrada da água de alimentação. Por exemplo: caso ocorra variação na pressão da bomba de água ou flutuações de fluxo - modificando a taxa de alimentação de água - o sistema não detectaria a mudança sem a presença do sensor na entrada da caldeira.

Figura 8 – Controle de nível a 3 elementos: nível da caldeira, vazão de vapor e vazão de água.



Fonte – Schneider Electric (2021).

Figura 9 – Diagrama de blocos do controle de nível a 3 elementos.



Fonte – Autor (2022).

Esse tipo de arranjo a três elementos - a saída do controle de nível, o *setpoint* da vazão de água e a vazão de vapor - fornece um controle mais rígido para o nível de tubulões. É adequado a processos nos quais a planta comporta várias caldeiras e várias bombas de água de alimentação, ou ainda situações nas quais a água de alimentação tem variações de pressão ou de vazão. Portanto, sendo um método mais fidedigno, é o mais utilizado em plantas do setor sucroalcooleiro e será aplicado neste estudo.

2.3.3.1 Escolha do Controle a 3 Elementos

Conforme o que já foi percorrido até então, é notório que o controle de nível de a três elementos é mais eficaz. Com a adição das medições dos fluxos de água de alimentação e de vapor, ao invés de apenas obter a leitura do nível - controle com um elemento - pode-se determinar facilmente uma grande discrepância entre os dois e tomar a ação de controle para manter o nível de água. Note que o nível também poderia ser mantido através do controle a dois elementos, mas não é vantajoso, já que este não consideraria possíveis perturbações de carga que ocorrem no abastecimento de água de alimentação, tornando o controle menos eficiente. Além disso, a interação entre o nível do tambor e mudanças no fluxo de água de alimentação não pode ser verificada com controle de dois elementos (IPCOS, 2021).

Esse controle a três elementos ocorre através da conexão do controlador de nível do tubulão - de dois elementos - com o controlador de fluxo de água de alimentação, o que será detalhado posteriormente neste estudo.

2.3.3.2 Implementação Prática

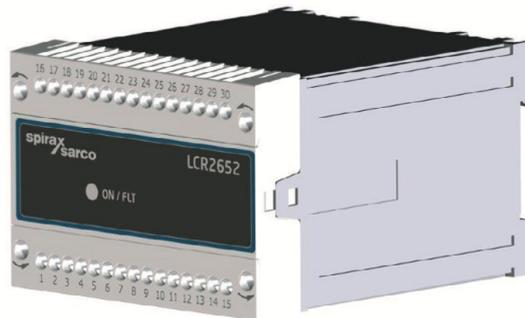
Independentemente de haver reais ou ínfimas pretensões da implementação deste projeto de forma prática, é importante buscar possíveis equipamentos a serem utilizados na operação de um sistema de controle de nível a três elementos.

Os parâmetros de operação da caldeira a vapor em operação na Usina D'Pádua - que

podem ser vistos no Capítulo 3 - devem ser levados em conta na escolha de um controlador apropriado para esta faixa de valores.

Tomando como referência a disponibilidade de controladores de nível da fabricante Spirax Sarco, a unidade de controle adequada para o referido processo é formada através da utilização conjunta do controlador de nível LCR2652 (Figura 10) com a unidade de operação e display BHD50 (Figura 11).

Figura 10 – Controlador de nível LCR2652 para aplicação prática em caldeiras a vapor.



Fonte – Spirax Sarco (2020).

Figura 11 – Interface homem-máquina BHD50 operada em conjunto com o controlador.



Fonte – Spirax Sarco (2020).

A unidade formada pelo controlador e pela interface homem-máquina possui as seguintes propriedades (SARCO, 2020):

- Controle de nível com ação proporcional, integral e controle da válvula de alimentação acionada eletricamente;
- Operação contínua para o controle de uma válvula eletropneumática e um relé para controle on/off da bomba;

- Entradas de corrente para vazões de vapor e de água de alimentação;
- Indicação/ajuste dos parâmetros de controle;
- Ajuste e avaliação das entradas de corrente para vapor e vazão da água de alimentação;
- Faixa de medição padronizada quando o transmissor de nível está conectado;
- Indicação do valor real e dos limites mínimo e máximo de nível de água;
- Controle de enchimento ou descarga;
- Saída de valor real 4-20 *mA*;
- Entrada de alarme do interruptor de limite de nível, permitindo exibir o status de qualquer interruptor de limite de nível;
- Registro de tendências;
- Indicação e listagem de erros, alarmes e avisos;
- Operação manual/automática;
- Comunicação Modbus RTU e Modbus TCP.

2.4 SENSORES DE NÍVEL

Toda a manutenção do nível de líquido no reservatório de uma caldeira para uma operação eficiente e segura, ocorre através da presença de sensores e atuadores. Os sensores realizam leituras referentes aos parâmetros envolvidos no controle do nível de líquido e enviam informações ao sistema, que requer, do(s) controlador(es), a ação de controle devida, executada através do(s) atuador(es).

Nem todos os tipos de sensores de nível disponíveis no mercado podem ser utilizados no sistema de uma caldeira aquatubular, visto que é um ambiente onde existem temperaturas e pressões características. Devem suportar condições de ambientes poluídos e serem inertes a variações de temperatura.

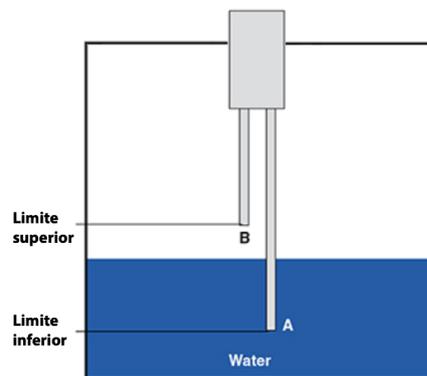
Atualmente, na indústria, esse processo de leitura de nível é realizada com auxílio de sensores e a resposta obtida é entregue ao sistema. De forma a trabalhar com informações precisas acerca dos tipos de sensores disponíveis para aplicação em caldeiras a vapor, foram observadas as opções disponíveis no mercado. Marcas como a britânica Spirax Sarco e a alemã Hiter, grandes referências no mercado de sistemas fluídicos, serviram de fonte confiável para identificar os métodos utilizados na automatização de detecção de nível, expressos a seguir.

2.4.1 Sensor de Condutividade Elétrica

Os sensores de condutividade elétrica funcionam de forma simples, como um circuito fechado. A sonda é fixada no topo do tanque, onde uma camada de revestimento isolante é aplicada ao redor da mesma. O comprimento é ajustado no momento da instalação, realizando o corte, se necessário. Uma tensão elétrica de baixa voltagem, que provém de uma fonte de corrente alternada, é aplicada à sonda.

Caso a sonda entre em contato com o líquido em questão, o circuito é fechado e a corrente atravessa o mesmo, levando um sinal ao controlador associado, provocando a abertura ou o fechamento da válvula de alimentação da caldeira. Evidentemente, esse tipo de monitoramento de nível necessita de duas sondas, que delimitam os limites superior e inferior do tubulão, vide Figura 12.

Figura 12 – Ilustração de um sensor de condutividade elétrica.



Fonte – Spirax Sarco (2021).

Figura 13 – Sensor de condutividade elétrica e controlador associado.



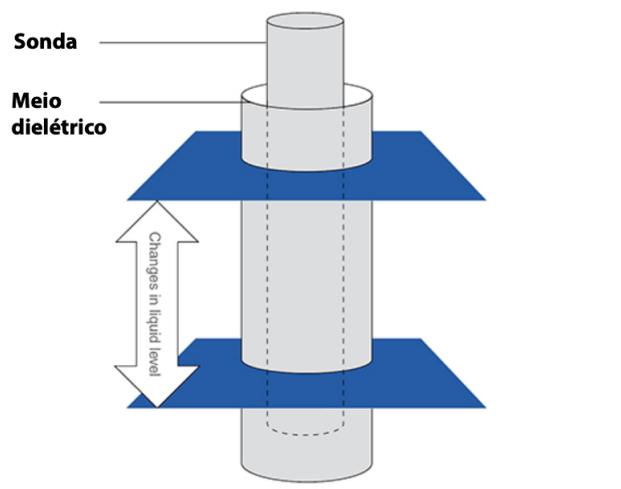
Fonte – Spirax Sarco (2021).

2.4.2 Sensor de Capacitância

De forma sucinta, um capacitor é constituído de duas placas metálicas (material condutor), separadas por material dielétrico (com pouca ou nula condutividade elétrica) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

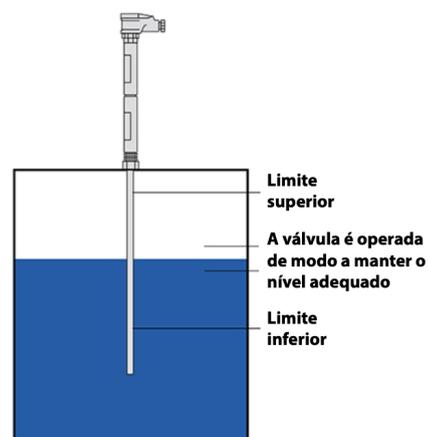
Os sensores de nível de capacitância também contam com sondas cilíndricas. A sonda atua como a primeira placa do capacitor, sendo coberta por material isolante. Já a segunda placa é formada pela água contida no tanque da caldeira e a parede do mesmo, vide Figura 14.

Figura 14 – Funcionamento do sensor de capacitância.



Fonte – Spirax Sarco (2021)

Figura 15 – Sensor de capacitância.



Fonte – Spirax Sarco (2021).

Qualquer que seja a variação de nível, o valor da capacitância, sofrerá uma variação

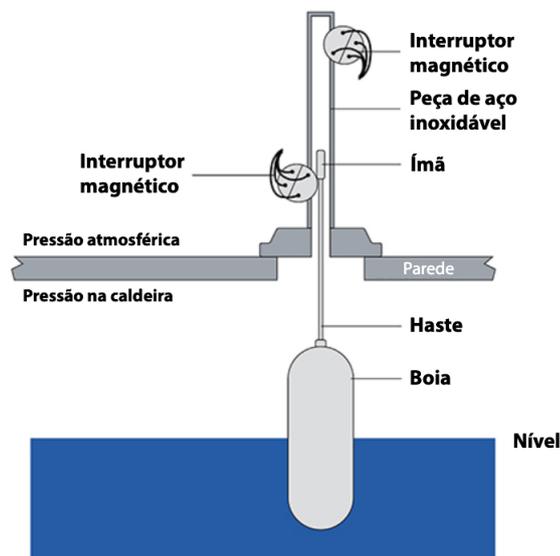
diretamente proporcional. Esse valor é levado ao controlador associado, que serve de gatilho para realizar a abertura ou o fechamento da válvula de alimentação da caldeira, através de um servo sinal.

Diferentemente do tipo de sensor mostrado anteriormente, não há necessidade de mais de uma sonda para realizar a medição do nível, conforme visto na Figura 15. Os pontos limítrofes do nível são definidos diretamente no controlador.

2.4.3 Sensor Tipo Boia (ou Flutuador)

Funciona de forma simples, como os sensores presentes em caixas d'água de privadas. Um flutuador é montado no tubulão superior da caldeira ou em uma câmara externa acoplada ao tubulão. A boia acompanha o nível de água da caldeira. Conta com uma haste na parte superior, que possui um ímã em sua extremidade. De acordo com a variação do nível, esse ímã movimentase dentro de uma peça de aço inoxidável, onde existem dois interruptores magnéticos, vistos na Figura 16. A escolha do aço inoxidável é dada para evitar a passagem de campo magnético. Esses interruptores enviam sinais para o controlador associado, ocasionando abertura ou fechamento da válvula de alimentação da caldeira.

Figura 16 – Sensor flutuador (tipo boia).



Fonte – Spirax Sarco (2021).

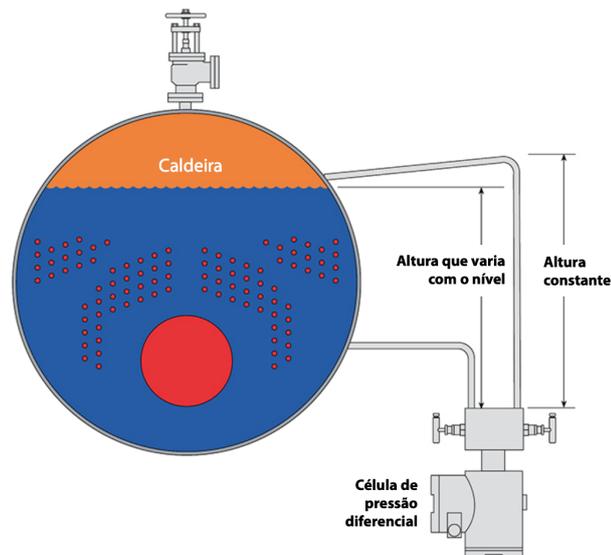
2.4.4 Células de Pressão Diferencial

Como pode ser visto na Figura 17, o arranjo deste tipo de sensor é realizado de modo que a célula conta com uma altura manométrica constante em uma de suas extremidades. Já o outro lado conta com uma cabeça móvel, que varia de acordo com o nível de água da caldeira.

A variação de posição da extremidade móvel emite um sinal, levado ao controlador associado, determinando o comportamento da válvula de alimentação.

Esse tipo de sensor torna-se mais caro e é utilizado em casos mais específicos, onde trabalha-se com água extremamente pura e com baixíssima condutividade, fazendo com que sondas de condutividade e capacitância não funcionem de forma confiável.

Figura 17 – Célula de pressão diferencial.



Fonte – Spirax Sarco (2021).

2.4.5 Implementação Prática

Quaisquer um dos sensores apresentados até então podem ser aplicados no sistema de controle de nível de uma caldeira aquatubular. Evidentemente, possuem suas vantagens e desvantagens.

Quanto aos sensores de condutividade elétrica e de capacitância, apesar de apresentarem baixo custo e facilidade de instalação, estão em contato direto com o produto, suscetíveis a incrustações. A contaminação dos eletrodos de sensores elétricos impede a continuidade do circuito. Já os sensores capacitivos lidam com sensibilidade a variações na constante dielétrica e condutividade (LINCE, 2019).

Nas células de pressão diferencial, a mudança de densidade no espaço de ar torna esse método menos preciso e, portanto, menos confiável em cada fase da operação de uma caldeira. Ademais, esse equipamento possui um custo relativamente mais alto do que os outros apresentados.

Por fim, os sensores tipo boia são ainda mais econômicos do que os de condutividade, que já poderiam ser considerados econômicos. Além disso, funcionam de forma simples, não

requerem energia para o seu funcionamento e indicam um valor de forma direta. Frente às vantagens, as desvantagens são poucas: possuem partes móveis passíveis de manutenção, além de estarem em contato direto com o produto.

2.5 SENSORES DE VAZÃO

Em conformidade com os sensores de nível, os sensores de vazão possuem um *modus operandi* similar. As leituras obtidas por estes dispositivos entregam informações do sistema ao controlador associado, responsável acionar o atuador associado, mantendo o controle do processo.

Os sensores de vazão mais comuns na aplicação de caldeiras são os de placa de orifício, visto na Figura 18. Como o próprio nome indica, trata-se de uma placa de metal com um orifício, por onde o fluido escoa. A placa deve ser fixada entre dois flanges, cujo arranjo pode ser visto na Figura 19. Esse tipo de instalação facilita o manuseio e promove solidez. Pela natureza sua construção, é usado amplamente em aplicações robustas e emprega grande durabilidade.

Figura 18 – Placa de orifício.



Fonte – DIGIMAT (2022).

Estes equipamentos estão presentes tanto na entrada da água de alimentação quanto na saída de vapor saturado, medindo o fluxo de fluido através do princípio de medição por pressão diferencial. Podem ser fabricados de forma específica para um projeto, de acordo com as necessidades da planta. Variações de: tamanho do orifício, disposição dos furos, tamanho e material da placa são realizadas de acordo com as necessidades.

O uso de uma placa de orifícios para a medição da vazão implica em perda de carga imposta ao escoamento, em função da expansão à jusante da placa. Sua incerteza de medição fica em torno de 2 a 4% do fundo de escala (SCHNEIDER, 2007). Porém, como o processo de controle de uma caldeira a vapor é robusto e não necessita de extrema precisão, a utilização desse tipo de equipamento não impacta o processo de forma significativa.

Figura 19 – Sensor de vazão com placa de orifício.



Fonte – DIGIMAT (2022).

2.6 ATUADOR DE CONTROLE

De forma a concretizar a ação requerida pelo sistema, através do sinal obtido dos controladores, emprega-se dispositivos chamados atuadores. Pode-se dizer de forma simples, que os atuadores são responsáveis por executar servo sinais recebidos de outros dispositivos. Como exemplo de atuador disponível na indústria e aplicável ao processo, pode-se utilizar atuadores pneumáticos do tipo diafragma para válvulas de deslocamento linear. É possível visualizar o referido modelo na Figura 20, a seguir.

Figura 20 – Atuador da fabricante Hiter, que deve ser utilizado em conjunto com uma válvula.



Fonte – Hiter (2020).

Em um processo de controle do nível de uma caldeira, o atuador de controle está ligado à válvula de alimentação da caldeira. É possível visualizar o arranjo de uma válvula normalmente aberta Hiter: Série 85 - Duas Vias, na Figura 21, as quais são disponibilizadas em conjunto

com um atuador. Utilizadas em meios de diversos fluidos industriais, possuem uma construção simples e robusta, permitindo um excelente controle com precisão e estabilidade. Além do mais, são extremamente versáteis, possuindo as opções de acionamento pneumático, elétrico ou manual (HITER, 2020).

Figura 21 – Válvula Série 85 - Duas Vias (conjunto válvula + atuador).



Fonte – Hiter (2020).

A escolha de válvulas normalmente abertas é corriqueira na indústria sucroalcooleira e em processos similares. Essa escolha é fundamentada na proteção e segurança do processo. Numa eventual falta de sinal para a válvula, a mesma abrirá e garantirá que a caldeira não fique com um nível abaixo do padrão mínimo de segurança. Entende-se que, numa emergência de falta de sinal, a segurança será garantida. Também fecha-se a saída de vapor, protegendo os equipamentos em linha contra eventuais golpes d'água.

2.7 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO

Existem inúmeros controladores presentes na indústria da automação, utilizados para variados processos de controle. Os controladores PIDs, atualmente, estão muito presentes em sistemas de controle industriais (OGATA, 2010). Este tipo de controlador é uma excelente alternativa, pois trabalha com fator de ganho proporcional, fator integral e fator derivativo, como o próprio nome já indica. Com isso, é possível aproveitar as vantagens fornecidas por cada um desses fatores, obtendo uma resposta transitória, permanente e estabilidade satisfatórias. É possível discorrer um pouco sobre essas vantagens.

- Fator Proporcional (K_p)

O fator proporcional pode ser definido como um amplificador com ganho ajustável. A sua aplicação gera o efeito de redução no tempo de resposta. Também implica em redução do

erro em estado estacionário, apesar de não conseguir eliminá-lo por completo, numa faixa de valor aplicável na prática. Um valor de ganho proporcional muito alto pode tornar o sistema instável, além de exigir grande esforço do sistema. Já um valor muito baixo pode não ser suficiente para corrigir os distúrbios.

$$u_p(t) = K_p e(t) \quad (2.1)$$

- Fator Integral (K_i)

Já o fator integral promove a completa extinção do erro em estado estacionário. Apesar disso, o fator integral implica na adição de polos, o que pode prejudicar a resposta transitória, promovendo uma resposta mais lenta do sistema e um aumento no máximo sobressinal numa resposta a uma entrada em degrau unitário. Um alto valor de ganho integral pode implicar em instabilidade.

$$u_i(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

- Fator Derivativo (K_d)

Por fim, o fator derivativo promove a adição de um zero ao sistema. Assim, é aplicável para realizar uma diminuição no tempo de resposta (aumento da velocidade) e, ao mesmo tempo, tornar o sistema mais estável, com a redução do máximo sobressinal. Não é recomendado para processos que apresente excesso de ruído no sinal medido.

$$u_d(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3)$$

Continuando no domínio do tempo, o sinal de controle proporcional integral derivativo é dado pela expressão a seguir, disponível em ambas literaturas de base utilizadas para a fundamentação teórica deste estudo.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.4)$$

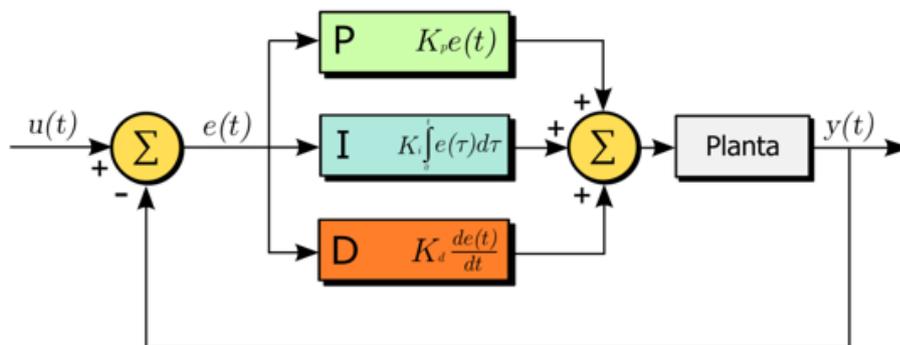
Já no campo dos complexos, a função de transferência, dada pela relação entre o sinal de controle $U(s)$ e o sinal de erro $E(s)$ para controladores PIDs é dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.5)$$

Vale salientar que o erro do sistema é dado pela discrepância entre resposta do sistema $y(t)$ para o domínio do tempo ou $Y(s)$ para o domínio complexo e a resposta esperada para o sinal de controle $u(t)$ (domínio do tempo) ou $U(s)$ (domínio complexo).

Como visto nas expressões (2.4) e (2.5), é possível notar a presença dos três parâmetros: o ganho proporcional K_p , o tempo integral T_i e o tempo derivativo T_d . Um esquema visual dos fatores presentes em um controlador PID pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Esquema de um Controlador PID.



Fonte – Cezar (2016).

2.8 MATLAB

Para efetivar o projeto e a análise de um controlador Proporcional Integral Derivativo, será utilizado o ambiente virtual *MATLAB - Simulink*. Uma vez definido o diagrama de blocos do sistema e as funções de transferência de cada bloco, através da modelagem matemática e observação do arranjo empregado na prática, pode-se realizar análises relativas ao controle do nível do sistema.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento de um sistema de controle de nível com o uso de controladores PIDs para a manutenção segura do nível de uma caldeira a vapor, faz parte de uma pesquisa de cunho explicativo, sendo complexa, delicada e suscetível a erros, demandando extrema cautela. Sendo algo novo que será explanado e desenvolvido, sua realização será pautada na conexão de ideias e teorias. Livros texto dos Ogata (2010) e Nise (2013) servirão como as principais bases teóricas bibliográficas. Apesar disso, conforme já visto na introdução, alguns artigos científicos serão utilizados como fonte de ampliação de conhecimento.

Buscando a forma mais adequada de realizar este projeto, uma metodologia simples porém efetiva, foi escolhida para o mesmo. A pesquisa será específica, já que será tomado um objeto de estudo e as variáveis capazes de influenciá-lo, através da aplicação de formas de controle de nível e observação dos resultados. O volume de água na caldeira será regulado através da variação do aporte de água à mesma, ou seja, através da vazão. A pesquisa tratará apenas de uma única hipótese: o controle do nível.

O sistema de controle contará com um sensor detectando o nível de líquido na caldeira, cuja resposta é enviada ao controlador associado. Além disso, os parâmetros de vazão de entrada de água e saída de vapor também serão utilizados como sinais para promover um controle mais efetivo. O tipo de controlador a ser parametrizado será o PID, como já citado. Estes são muito utilizados na indústria, em processos de controle lineares e invariantes no tempo. Seu uso é difundido pelo fato de que, quando ajustados de forma correta, entregam desempenho satisfatório. As configurações no controle do processo em questão serão explanadas.

Por fim, algumas simulações serão realizadas com auxílio do ambiente virtual *MATLAB* - *Simulink*, com o intuito de visualizar o *modus operandi* do processo com o controlador, considerando sua estabilidade durante o desempenho do processo.

3.1 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA PNEUMÁTICO PRESENTE

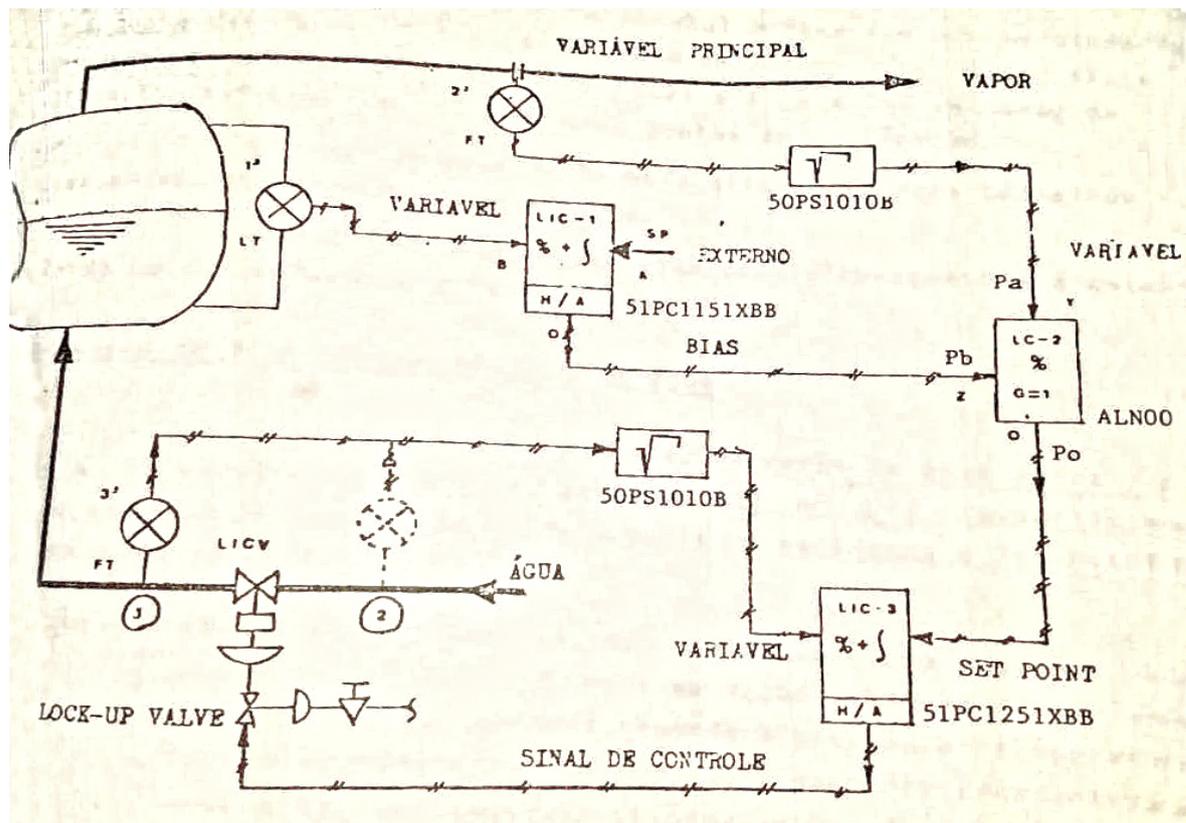
O sistema de controle de nível atualmente em funcionamento na Usina D'Pádua funciona de forma pneumática, utilizando-se de três elementos, conforme pode ser visto na Figura 23. Apesar de, na época da instalação ter sido considerado um sistema de controle moderno da fabricante Fischer & Porter do Brasil, é considerado defasado para algumas aplicações nos dias atuais.

A defasagem do controlador pneumático é dada ao fato de que um controlador elétrico pode ter sua resposta ajustada de forma instantânea a uma mudança no processo, de uma forma que não é possível com uma unidade pneumática. Tal sintonia envolve o ajuste de uma ou todas as variáveis proporcionais, integrais e derivativas do controlador. No mais, não há necessidade

de compressor de ar e maquinário associado, diminuindo custos de manutenção. Quanto ao cabeamento elétrico, é de baixo custo e de fácil instalação. O sistema de controle elétrico não é passível de vazamentos, como em controles pneumáticos, o que confere alta eficiência. Por fim, a resposta do controlador elétrico é instantânea e precisa (YOKOGAWA, 2014).

Como o sistema de controle da caldeira data dos anos 1980, é de se esperar que existam diferentes notações dos dias atuais. Vale notar que as pressões P_o , P_a e P_b presentes no fluxograma, referem-se aos sinais enviados pelos transmissores e controladores, pois trata-se de um sistema de transmissão pneumática. Adicionalmente: os símbolos de porcentagem referem-se a controladores percentuais, que são equivalentes aos controladores proporcionais; os símbolos de integral, denotam a existência de fatores integrais, conforme literatura atual. Por fim, é possível citar os símbolos de raiz quadrada, relativos aos extratores de raiz quadrada presentes nos sensores de vazão - cuja função é linearizar os sinais obtidos. O funcionamento destes será discorrido em seguida.

Figura 23 – Esquema de controle pneumático a três elementos da década de 80.



Fonte – Fischer & Porter do Brasil (1982).

A caldeira aquatubular em questão tem o volume de seu tubulão superior controlado através da presença de três sensores:

1. Sensor transmissor de nível: funciona com um transmissor de pressão diferencial linear.

Ou seja: para um nível 100% dá o sinal máximo e para um nível 0% dá o sinal mínimo. O sinal é levado ao controlador de nível.

2. Sensor transmissor de vazão de vapor: funciona no tubo de saída da caldeira, com uma placa de orifícios, onde é medida a pressão antes e depois do orifício (pressão diferencial). Esse sensor de pressão diferencial gera um sinal enviado a um extrator de raiz quadrada, responsável pela linearização do sinal de transmissão de vazão, pois a velocidade e consequentemente a vazão, são proporcionais à raiz quadrada da diferença de pressão.
3. Sensor transmissor de vazão de água: localizado no tubo de alimentação de água. Funciona com o mesmo princípio de pressão diferencial, cujo dado também é encaminhado a um extrator de raiz quadrada, obtendo um valor final linearizado.

O atuador de controle utilizado no processo real é a válvula de alimentação da caldeira, da fabricante Hiter, que trabalha na posição normalmente aberta, ou seja, o servo sinal é utilizado para fechá-la. Essa válvula conta com um posicionador acoplado, que é um linearizador de abertura da válvula, que, por exemplo, quando recebe o sinal zero está totalmente aberta, o sinal 100 está totalmente fechada e o sinal 50 está com 50% de abertura.

Apesar de tratar-se de um modelo antigo, a forma de controlar o nível de uma caldeira não mudou, apenas seus componentes tornaram-se mais tecnologicamente avançados. É possível então controlar este sistema, considerando as mesmas variáveis, através de um controlador PID. O fator integral elimina o erro do nível por flutuações na capacidade de produção de vapor, onde a válvula precisaria estar mais aberta ou mais fechada que o normal e o nível não poderia sair do controle. Já o fator derivativo acelera a resposta do controle do erro de nível.

Sendo um sistema com uma única variável de controle, como citado anteriormente - o nível, que é regulado pela abertura ou fechamento da válvula de alimentação - pode-se descrevê-lo como um sistema do tipo *Multiple Input Single Output* (MISO), já que possui dois sinais de entrada: o nível da caldeira e a vazão de vapor.

3.2 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE

O nível é medido e tem sua resposta entregue ao controlador de nível. Assim, os sinais obtidos pelos sensores de nível e de fluxo de vapor são levados a um relê de soma e, posteriormente, entregues ao controlador. Esse mesmo controlador também recebe as informações acerca do sensor de fluxo de água na entrada da caldeira. Ainda do controlador citado, parte o sinal de controle, que regula a válvula (atuador) responsável pela alimentação da caldeira.

O comportamento do sistema, de acordo com o aumento de cada um dos parâmetros monitorados pelos sensores pode ser visto na Tabela 1.

Normalmente trabalha-se com dois controladores PIDs. O primeiro controlador recebe o *setpoint* de nível e é realimentado com o valor real do nível, de forma a corrigir o erro. A

Tabela 1 – Funcionamento do sistema de controle.

Sensores	Situação	Sinal para a válvula
Nível	Aumento	Sinal positivo (fechar)
Vazão de vapor	Aumento	Sinal negativo (abrir)
Vazão de água	Aumento	Sinal positivo (fechar)

Fonte: Autor (2021).

saída desse PID é levada a um somador, onde junta-se ao sinal do sensor de vazão de vapor. O sinal somado de nível e vapor é o sinal de entrada do segundo controlador, associado à válvula. Esta última está ligada ao atuador do processo. O segundo controlador também conta com realimentação, promovida pelo sensor de vazão de água. Na prática esse sinal possui um efeito no ajuste do *setpoint* do nível.

Como exemplo prático, é possível citar uma situação onde a caldeira trabalha com 10% da vazão. A válvula teria que estar praticamente fechada. O sinal de controle em sistemas antigos, como o da caldeira em questão, poderiam ser do tipo: pneumático, onde os valores variavam entre 3-15 psi; ou elétrico, com valores de tensão entre 4-12 V. No caso pneumático em aplicação, a válvula necessitaria de um sinal em torno de 14 psi para estar nessa posição. E o nível, se estivesse no *setpoint* estaria com 9 psi. Portanto, o sinal da vazão de água faz-se necessário, já que com uma vazão baixa haveria uma transmissão de sinal baixa, que, em tese, deslocaria o *setpoint* aparente para um ajuste mais baixo.

3.3 PROPOSTA DE MODERNIZAÇÃO: SISTEMA DE CONTROLE ELÉTRICO

Sistemas de controle mecânicos do tipo pneumático estiveram presentes em processos de engenharia do século passado. Em ambientes insalubres - tanto pela poluição do fluido, como pela temperatura e pressão envolvidas - como o interior de uma caldeira a vapor, transmissores pneumáticos eram preferíveis aos elétricos. Essa preferência dava-se à confiabilidade de precisão no controle, mas também é possível citar que havia um baixo custo de instalação, utilizando-se de finos tubos.

No passado, não havia tecnologia o suficiente que permitisse o funcionamento adequado de sistemas de controle elétricos. Ao contrário dos sistemas de controles pneumáticos, os sistemas de controles elétricos sofriam impeditivos como: não suportar as condições de operação de uma caldeira, não entregando a precisão necessária para a operação segura; custo de instalação excessivamente alto, tornando o projeto inviável.

Atualmente, controladores pneumáticos estão cada vez mais em desuso, muito presentes em processos antigos que não foram modernizados ou onde há condições extremas, como gasodutos (YOKOGAWA, 2014). Os controladores pneumáticos ainda estão disponíveis no

mercado, apesar de muitos modelos terem sido descontinuados, por haver pouca demanda. Isso fez com que o preço desses dispositivos sofresse aumento, tornando-os menos interessantes para esse tipo de projeto.

Com o advento da tecnologia, controles elétricos foram modernizados, ao ponto de aguentarem condições extremas de temperatura e pressão, como o ambiente interno de uma caldeira a vapor. A economia de espaço é algo a ser considerado. Controladores elétricos ocupam espaços pequenos, enquanto os controladores pneumáticos contam com um painéis onde há inúmeros tubos, responsáveis pela transmissão pneumática.

O controle elétrico promove recursos eletrônicos para ajustes no processo, através de lógicas de controle personalizadas. Além do mais, um ajuste no processo ocorre de forma mais rápida do que em sistemas de controle mecânicos, como os dos controladores pneumáticos. Para controladores do tipo PID, é possível realizar o ajuste de variáveis proporcionais, integrais e derivativas em controladores elétricos, de forma rápida e efetiva. Esse tipo de controlador permite o monitoramento do desempenho e a avaliação das condições do processo, o que promove a verificação da necessidade de ajuste em variáveis de acordo com a operação.

3.4 PARÂMETROS DA CALDEIRA

Como este estudo tem a possibilidade de ser implementado de forma prática, é importante levar em consideração os parâmetros de operação da caldeira aquatubular anteriormente referida. O sistema trabalha com pressão constante no valor de 35 kg/cm^2 e a produção de vapor varia com a necessidade da unidade de produção, podendo variar de 0 a 100% da capacidade. Essa transição de capacidade de produção é uma situação que ocorre em questão de minutos. O combustível em questão é o bagaço de cana-de-açúcar e a caldeira gera vapor superaquecido, produzido através de vapor saturado que passa por um superaquecedor. Ademais, é possível encontrar mais detalhes acerca das características da caldeira.

Na Tabela 2, é possível observar os parâmetros de funcionamento da caldeira em operação na Usina D'Pádua, vista nas Figuras 24 e 25. Angariar estes detalhes é de suma importância visto que, ao projetar um novo sistema de controle de nível, é necessário saber as condições de operação do sistema, para então escolher equipamentos condizentes com o ambiente.

3.5 SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO

A seguir, é possível visualizar o diagrama de blocos que representa o funcionamento do sistema de controle de nível de uma caldeira aquatubular, assim como as funções de transferência envolvidas no processo.

Tabela 2 – Características da Caldeira.

Fabricante	M. Dedini S.A. Metalúrgica
Modelo	V2/4 GB-1500
Tipo de Caldeira	Aquatubular
Capacidade de produção de vapor	50 Ton/h (regime contínuo)
Temperatura da água de alimentação	60°C
Temperatura do vapor	360°C
Pressão de trabalho na entrada de água	34 Kgf/cm^2
Pressão de máxima na entrada de água	38 Kgf/cm^2
Pressão na saída de vapor	28 a 30 Kgf/cm^2
Combustível	Bagaço de cana
Consumo de bagaço	22.700 Kg/h
Poder Calorífico Inferior	1.850 $Kcal/Kg$
Poder Calorífico Superior	2.250 $Kcal/Kg$
Eficiência da Caldeira	82%
Diâmetro interno	1.500 mm
Diâmetro externo	1.411 mm

Fonte: Autor (2022).

Figura 24 – Caldeiras a vapor e esteiras de alimentação que transportam o bagaço.



Fonte – Autor (2022).

3.5.1 Esboço do Diagrama de Blocos

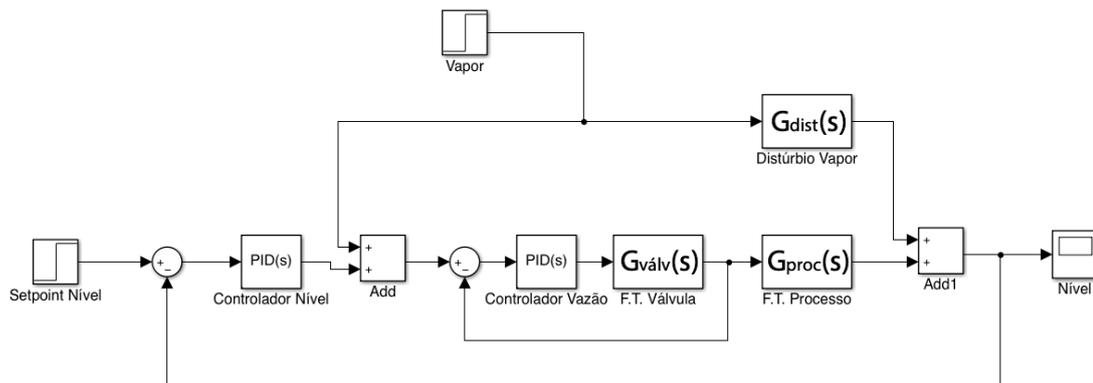
A Figura 26 mostra o esquema de funcionamento do sistema de controle de nível a 3 elementos empregado na caldeira deste estudo. Vale notar que a configuração do sistema de controle foi realizada com base na planta pneumática presente no sistema real, vista anteriormente na Figura 23. Observa-se que são utilizados dois controladores: o controlador da água de alimentação - denominado "Controlador Vazão", no esquema acima; e um controlador de nível em cascata - "Controlador Nível".

Figura 25 – Caldeiras a vapor, bagaço de cana utilizado como fonte de energia.



Fonte – Autor (2022).

Figura 26 – Diagrama de blocos do sistema de controle de nível a 3 elementos.



Fonte – Autor (2022).

3.5.2 Distúrbio de Vapor

No diagrama de blocos visto na Figura 26 na seção anterior, nota-se a presença de um bloco denominado: distúrbio de vapor. Sendo um conceito inédito até então, faz-se necessário discorrer um pouco sobre o seria distúrbio de vapor e por quê torna-se importante considerá-lo.

Durante o funcionamento de uma caldeira aquatubular, o consumo de vapor não é constante, já que as cargas variam em conformidade com as necessidades operacionais. Como exemplo, de acordo com o tamanho e com o tipo das canas-de-açúcar envolvidas no processo, que possuem inúmeras variedades, as navalhas e moendas demandam, em momentos próximos entre si, consumos de vapor diferentes para um mesmo equipamento. Assim, a necessidade de energia no sistema ocorre em picos.

Ao longo da operação do sistema de manutenção de nível, no momento onde existe um aumento no consumo de vapor, naturalmente, existe a necessidade de um aumento na reposição de água, de forma equivalente à massa de água reduzida pelo volume de vapor requisitado. Quando o aumento do consumo de vapor é significativo, o aspecto dinâmico da caldeira leva a uma redução na pressão interna do tubulão superior e, conseqüentemente, imprime um nível falso de água. Utilizando de linguagem comum, pode-se dizer que: o nível aumenta sem ter realmente aumentado.

Assim, com o fato de que a demanda de vapor é variável e tornando-se um possível agente provocador do fenômeno de falso nível, cria-se a necessidade de controlar esse distúrbio. O monitoramento do distúrbio de vapor permite lidar com variações da demanda do vapor, proporcionando efeitos corretivos no nível e matendo-o no *setpoint* almejado.

3.5.3 Funções de Transferência do Sistema e Diagrama de Blocos

A modelagem do sistema de uma caldeira a vapor envolve uma metodologia complexo. Como o objetivo deste estudo não é a modelagem matemática em si, que poderia ser considerada um tema por si só, é possível recorrer a expressões padrões para as funções de transferência do processo (3.1), da válvula (3.2) e do distúrbio de vapor (3.3). É possível encontrar estas funções em livros, artigos e publicações.

Neste caso, é possível referenciar Bequette (2002). Vale notar que, por falta de dados e acesso amplo à caldeira, foi necessário utilizar funções de transferência que tivessem relação com o processo estudado. Essas funções não refletem exatamente a caldeira em operação, mas permitem trabalhar com um modelo similar e, com isso, realizar um estudo de forma paralela. As funções de transferência do autor citado são reduzidas, estão normalizadas para valores entre -1 e 1, tanto na entrada, quanto na saída.

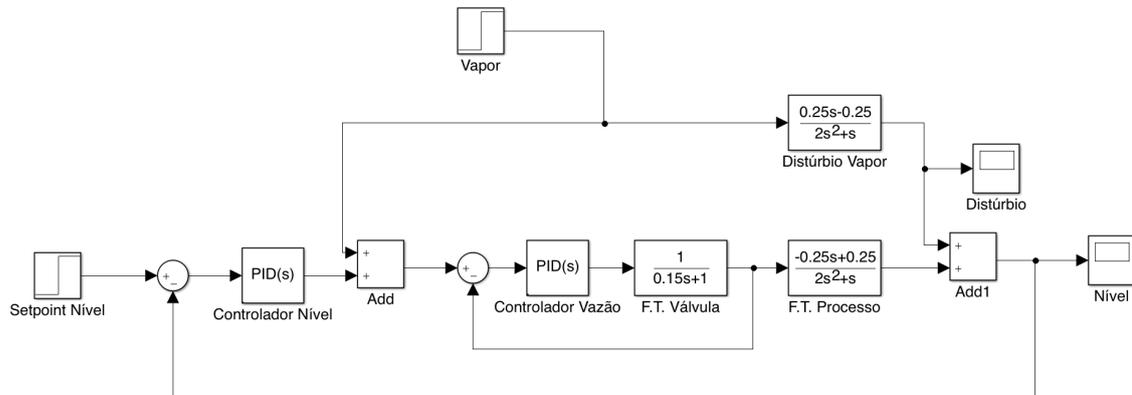
$$G_{proc}(s) = \frac{0.25(-s + 1)}{s(2s + 1)} \quad (3.1)$$

$$G_{valv}(s) = \frac{1}{0.15s + 1} \quad (3.2)$$

$$G_{dist}(s) = \frac{-0.25(-s + 1)}{s(2s + 1)} \quad (3.3)$$

A partir de agora, com todas as funções de transferência em mãos, observadas: na expressão (3.1) para a função de transferência do processo; na expressão (3.2) para a função de transferência da válvula; na expressão (3.3) para a função de transferência do distúrbio causado pelo vapor, pode-se obter o diagrama de blocos final.

Figura 27 – Diagrama de blocos de controle de nível a 3 elementos de uma caldeira a vapor.



Fonte – Autor (2022).

A configuração visualizada na Figura 27, será utilizada no *MATLAB - Simulink*, onde serão realizadas análises com diferentes arranjos de controladores, buscando obter uma melhor resposta ao sistema.

3.5.4 Análise do Sistema

Faz-se necessário tratar isoladamente diferentes ramos do sistema, onde há necessidade de controladores. Os polos do sistema devem ser analisados, de modo a prever o comportamento da resposta a uma entrada em degrau. Com o auxílio do *MATLAB*, o método lugar das raízes será empregado nos sistemas em malha aberta, que permite visualizar como os polos de um sistema variam, ao alterar-se o valor do ganho (OGATA, 2010). Análises de resposta a uma entrada em degrau para os sistemas isolados em malha fechada também serão empregadas. Vale notar que todas essas operações serão realizadas com o auxílio de um único script, cujas linhas de código serão apresentadas nos anexos deste estudo.

Ao fim das análises, será possível retornar ao ambiente do *Simulink*, onde o sistema em sua forma integral estará disposto, em conjunto com os controladores e seus fatores calculados. A resposta a uma entrada em degrau será simulada e, em seguida, analisada, de forma a visualizar o comportamento do nível controlado pelo sistema, o grande objeto deste estudo.

4 RESULTADOS

Antes de partir diretamente para as análises, vale notar que o controle de nível de uma caldeira não é um processo extremamente delicado. Nesta situação, o que é buscado em relação ao controle do nível é um sistema com constância. É possível trabalhar com controladores mais lentos. Um nível mediano de precisão seria satisfatório, já que, idealmente, os níveis máximos e mínimos nunca deverão ser atingidos, pois existe uma folga de segurança nessa faixa de operação. Ademais, como alternativa final, o sistema conta com alarmes de baixo/alto nível, o que cortam o funcionamento da caldeira. E esse é o tipo de ação que o controle de nível efetivo deve evitar.

Para um engenheiro de controle, o processo de sintonização das constantes proporcional, integral e derivativa para o controle de um sistema é um processo que pode ser resolvido em questão de alguns minutos, quando estão envolvidas simulações que utilizam modelos perfeitos. O uso de ferramentas que auxiliam na busca ideal destes valores, permite realizar testes e regulagens baseadas em bom senso e métodos de tentativa e erro. Para indivíduos que não têm contato frequente com o processo e seus parâmetros ideais, poderia tornar-se custoso em relação ao tempo, se escolhidos valores iniciais longe dos ideais.

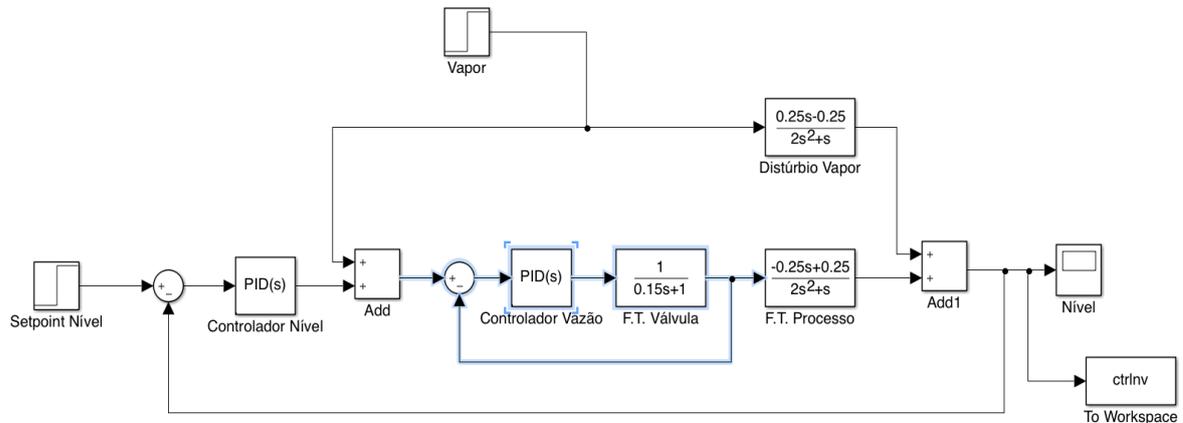
O modelo obtido para simular a operação do controle de nível da caldeira lida com degraus em uma faixa de validade de 0,1 de magnitude - à exceção da entrada de vapor associada ao distúrbio, onde o degrau dado é de 0,5. Portanto, é possível citar que os valores de segurança associados aos alarmes de baixo/alto nível serão tratados neste estudo como -0,3 e 0,3. Essa decisão foi tomada pois a faixa de controle de nível possui uma variação de 25-30% na altura no fluido, tomada a partir da altura média do tubulação. Assim, os escolhidos valores são bem coerentes.

Foi possível notar, na Figura 26 presente no capítulo anterior, que o sistema conta com a presença de dois controladores: o de nível e o de vazão. Numa abordagem inicial, é possível isolar o controlador de vazão e o diagrama de bloco que representa a função de transferência da válvula - vide Figura 28 - de modo a trabalhar apenas com o controlador na parte mais "interna" do diagrama de blocos.

Em seguida, de posse dos parâmetros do controlador de vazão, é possível reduzir todo o diagrama de blocos - à exceção do controlador de nível - a um único bloco, representante do processo como um todo e, em seguida, calcular e obter os parâmetros relativos ao controlador de nível.

Por fim, vale notar que todos os cálculos realizados nas seções que seguem serão realizados com auxílio do *MATLAB*, onde será utilizado um único script - disponível nos anexos deste relatório - de modo a evitar a necessidade de declarar as mesmas funções mais de uma vez.

Figura 28 – Diagrama do controle de nível com destaque para o sistema da válvula.



Fonte – Autor (2022).

4.1 CONTROLADOR DE VAZÃO

Conforme visto no capítulo anterior, a função de transferência relativa à válvula é dada por:

$$G_{valv}(s) = \frac{1}{0,15s + 1} \quad (4.1)$$

Antes de qualquer coisa, uma breve análise da função de transferência vista em (4.1) será realizada. Inicialmente, através do cálculo dos polos, com auxílio da função *roots*, é possível prever a resposta do sistema a um sinal de entrada em degrau. Os valores dos polos em malha aberta e em malha fechada da função $G_{valv}(s)$, dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores dos polos da função de transferência $G_{valv}(s)$ em malha aberta e fechada.

Malha	Polo
Aberta	- 6,6667
Fechada	- 13,3333

Fonte: Autor (2022).

Os polos são reais e negativos, o que implica que os sistemas são estáveis. Trabalha-se, neste caso, em malha fechada. Apesar disso, seja para malha aberta ou fechada, trata-se de um sistema superamortecido que responde de maneira exponencial - sem oscilações - a uma entrada em degrau.

Ainda com relação ao comportamento do sistema, fica claro que é do tipo 0, não tendo polos na origem. Dessa forma, o erro em estado estacionário teórico em malha fechada para entrada em degrau é finito e pode ser encontrado com auxílio da expressão (4.2) a seguir.

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K_{ep}} \quad (4.2)$$

Na equação (4.2), é possível notar o fator K_{ep} , que é a constante de erro estático de posição, cujo valor pode ser encontrado através da expressão encontrada em (4.3), onde $G(s)$ é uma forma genérica de referir-se a função de transferência de um bloco qualquer.

$$K_{ep} = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) \quad (4.3)$$

Agora de posse das expressões anteriormente citadas, é possível calcular o valor do erro estático de posição e_{ss} e da constante de erro estático K_{ep} .

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G(s)} = \frac{1}{1 + G(0)} \quad (4.4)$$

Mais uma vez, recorrendo ao *MATLAB*, tem-se os resultados expressos em (4.5) e (4.6).

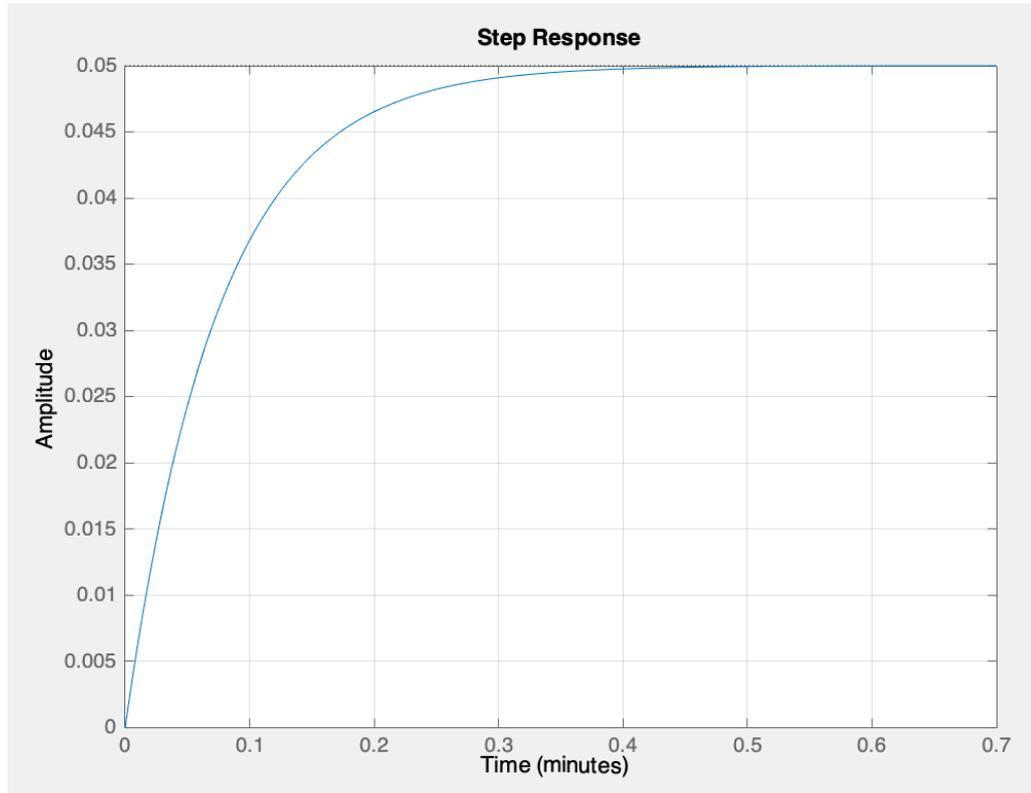
$$G(0) = K_{ep} = 1 \quad (4.5)$$

$$e_{ss} = 0,5 \quad (4.6)$$

Nota-se que um sistema que possui um erro estacionário de 50% não entrega uma boa resposta estacionária. Também sabe-se que, por ser uma função com polo real negativo, tem resposta transitória estável. Poderia-se, a partir destas informações, partir para o cálculo de um controlador, porém é necessário analisar o desempenho através da mensuração dos parâmetros de tempo da curva. Portanto, a critério confirmativo, é possível obter o gráfico de resposta de uma entrada em degrau 0,1 aplicada à função $G_{valv}(s)$ em malha fechada (4.7), visto na Figura 29.

$$G_{valvMF}(s) = \frac{1}{0,15s + 2} \quad (4.7)$$

Figura 29 – Resposta do sistema em malha fechada $G_{valvMF}(s)$ para entrada degrau 0,1.



Fonte – Autor (2022).

O desempenho pode ser mensurado através da observação dos parâmetros de tempo dispostos na Tabela 4. O sistema isolado da válvula em malha fechada entrega uma resposta rápida a uma entrada em degrau 0,1, tendo uma boa resposta transitória, com bons tempos de subida e de acomodação e sem a presença de picos e oscilações. Apesar disso, a resposta estacionária imprime um erro de 50%, ou seja, esse arranjo necessita de um sistema de controle.

Tabela 4 – Parâmetros de desempenho da resposta do sistema em malha fechada $G_{valvMF}(s)$.

Parâmetros	$G_{valvMF}(s)$
Tempo de subida (t_r)	0,165 min
Máximo sobressinal	-
Tempo de acomodação (t_s)	0,293 min
Erro estacionário	50%

Fonte: Autor (2022).

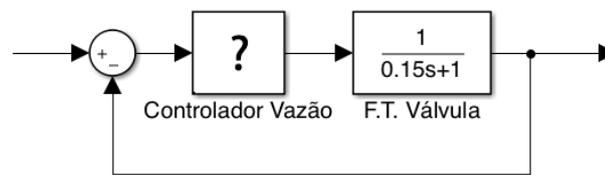
Numa abordagem simplória, nota-se que a aplicação de um controlador proporcional poderia ser suficiente já que, de acordo com a teoria, quanto maior o ganho, menor o erro estacionário. Porém isso não ocorre de forma tão simples, já que acarreta mudanças na resposta

transitória e, em certos casos, pode gerar desestabilização no sistema. Para entender como esse comportamento realmente acontece, o projeto de um compensador será visto no que segue.

4.1.1 Projeto de um Compensador

A presença de um compensador ocorre em série, como já visto no arranjo original do sistema de controle de nível da caldeira. Portanto, a nova equação do sistema da válvula seria a expressa em 4.8. O esquema estudado é o da Figura 30.

Figura 30 – Configuração do sistema da válvula isolado.



Fonte – Autor (2022).

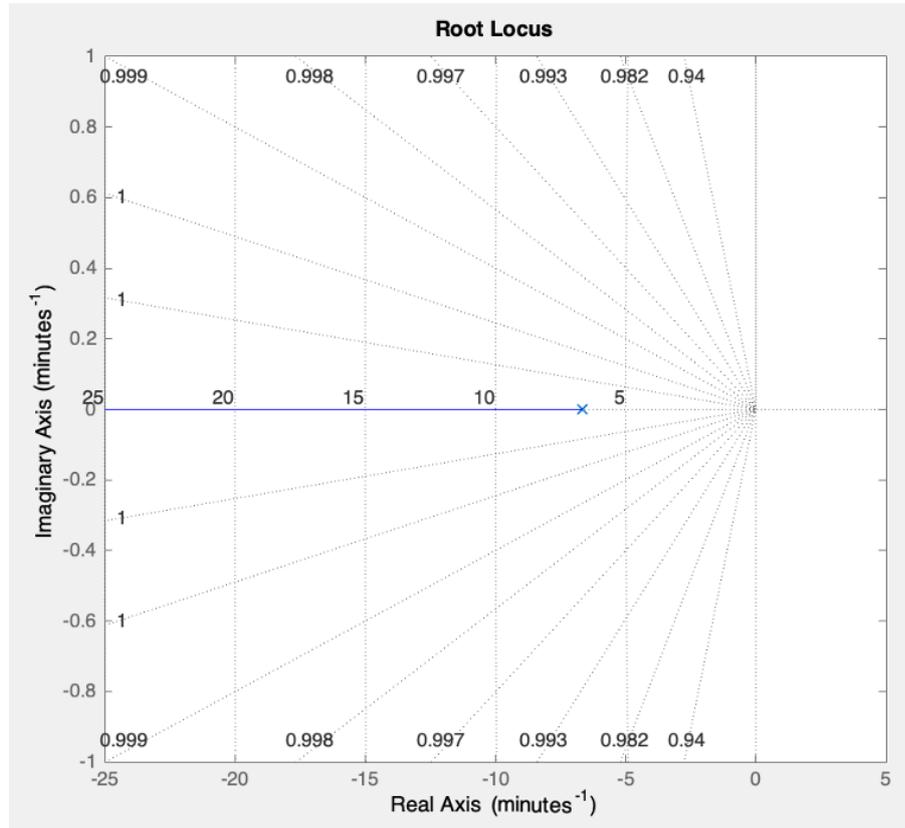
$$G_{Kpvalv}(s) = K_p * G_{valv}(s) \quad (4.8)$$

Existe mais de um método para o projeto de um compensador. Neste caso, o projeto será realizado através do método lugar das raízes. Para determinar o lugar das raízes do sistema, deve-se aplicar a função *rlocus* na função de transferência de malha aberta $G_{valvula}(s)$. Ou seja, a partir da função de transferência em malha aberta é que se obtém o lugar das raízes do sistema em malha fechada para diversos valores de ganho proporcional, visto na Figura 31.

É possível verificar que o lugar das raízes está inteiramente localizado no semiplano esquerdo do plano s . Isso significa que é possível lidar com valores de ganho que variam de zero a infinito sem perder a estabilidade, apesar de não ser viável trabalhar com valores excessivamente altos. Como pode ser visto no gráfico, há apenas um polo real negativo e um zero no infinito. Ou seja, esse comportamento indica que não haverá configurações onde o gráfico saia do eixo real, jamais existindo a possibilidade de haver polos complexos - o que acarretaria em oscilações na resposta transitória do sistema - visto que estes trabalham em pares conjugados.

De modo a buscar uma configuração de alta confiabilidade para o sistema da válvula, pode-se almejar um erro estacionário da ordem de 1%. Para um valor de erro dessa magnitude sobre uma entrada em degrau de valor 0,1, significa que o valor do erro seria 0,001. Como visto anteriormente, a expressão para o cálculo do erro é relacionada à constante de erro estático de

Figura 31 – Lugar das raízes para sistema em malha fechada $G_{valvMF}(s)$.



Fonte – Autor (2022).

posição. É possível então obter o valor da constante. Em seguida, com o auxílio do valor da constante, pode-se obter um possível valor de ganho para o erro anteriormente definido.

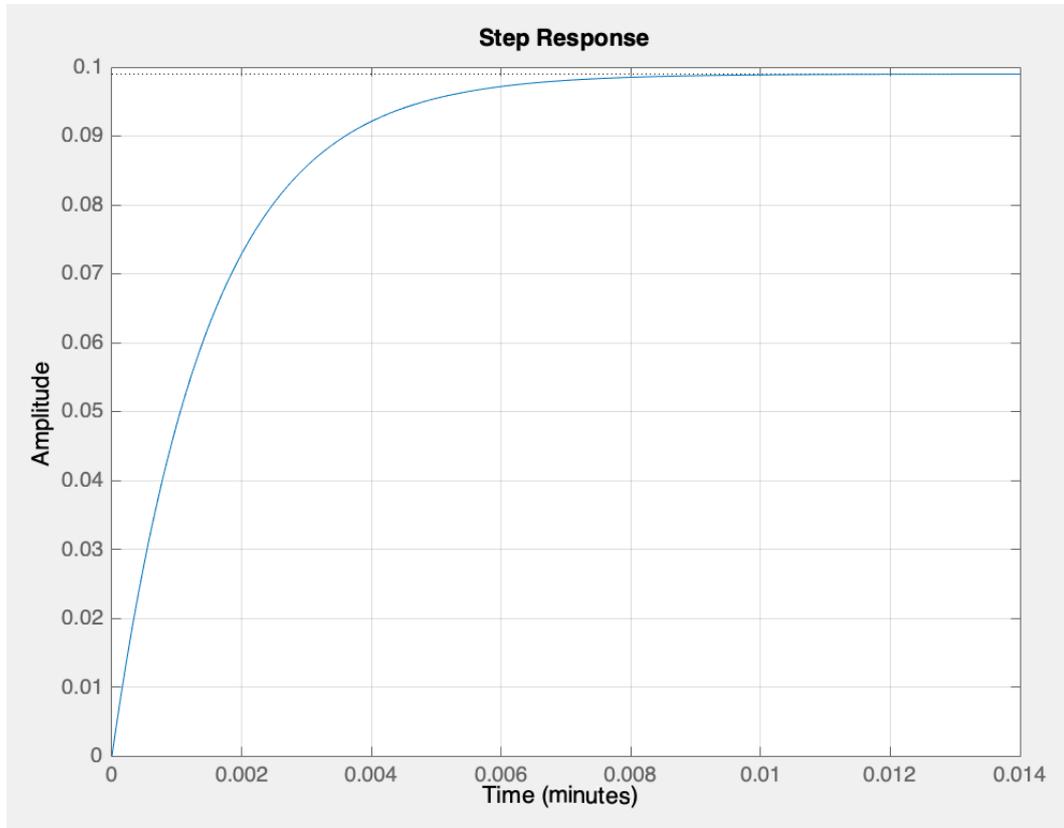
$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K_{ep}} \implies K_{ep} = 99 \quad (4.9)$$

$$K_{ep} = \lim_{s \rightarrow 0} K_p * G_{valv}(s) = K_p * \frac{1}{1} = 99 \implies K_p = 99 \quad (4.10)$$

Seria prudente partir para um novo arranjo, já que o valor de 99 para a constante proporcional é demasiadamente alto e fora dos padrões práticos de operação. A critério explanatório, a curva de resposta do sistema isolado em malha fechada será vista. Com o valor encontrado para K_p , é possível obter a função de malha fechada a partir da função de malha aberta multiplicada por 99. Conseqüentemente, pode-se obter a resposta a uma entrada em degrau 0,1 (Figura 32). A função de transferência obtida pode ser visualizada na expressão (4.11).

$$G_{Kpvalv(MF)}(s) = \frac{99}{0,15s + 100} \quad (4.11)$$

Figura 32 – Resposta do sistema em malha fechada $G_{Kpvalv(MF)}(s)$ para entrada degrau 0,1.



Fonte – Autor (2022).

Conforme esperado, o alto valor do ganho corrigiu o erro do sistema, mas gerou uma resposta transitória excessivamente rápida e que nem é possível de ser aplicada nas válvulas envolvidas em plantas de caldeiras a vapor, visto que estes servo equipamentos trabalham não só de forma elétrica, mas também pneumática, onde não é possível operar nesta faixa de velocidade.

Desta forma, é prudente buscar o controle do erro estacionário através da inserção de uma constante integral. Antes, porém, é possível concluir que a presença de um fator integral trará melhorias na resposta estacionária, ao mesmo tempo que trará prejuízos à resposta transitória, já que há o acréscimo de polos, o que tende a desestabilizar o sistema, aumentando o tempo de acomodação.

Assim, para equilibrar o sistema, um fator derivativo também deve ser introduzido, responsável por inserir um zero no sistema. Com o fator derivativo, os prejuízos causados pela inserção do polo referente ao fator integral são amenizados, onde há uma melhoria na resposta transitória, inclusive com redução do tempo de acomodação.

Por fim, é evidente que a melhor solução para o controle, conforme especulado no início deste estudo, é a aplicação de um controlador Proporcional Integral Derivativo. As ações proporcional, integral e derivativa unidas em um único controlador permite obter boas respostas

nos regimes transitório e permanente.

4.1.2 Projeto de um controlador PID

Um controlador PID pode ter seus ganhos parametrizados com o auxílio de diversas ferramentas matemáticas. Neste caso, como o software *MATLAB* tem sido requisitado ao longo deste estudo, faz sentido utilizar-se das ferramentas disponíveis para facilitar cálculos realizar iterações de possíveis valores dos ganhos. O método de abordagem de otimização computacional pôde ser encontrado em Ogata (2010). Para isto, o controlador PID relacionado à válvula foi definido como pode ser visto em (4.12).

$$G_{pid}(s) = K \frac{(s + a)^2}{s} \quad (4.12)$$

Então, através de iterações realizadas com o código aplicado no *MATLAB*, foi possível atribuir uma gama de valores tanto a K quanto a a , de modo que a combinação obtida gerasse um gráfico de resposta com o maior sobressinal possível e que fosse menor que 10%. O referido código pode ser encontrado nos anexos deste relatório.

A expressão (4.12) pode ser rearranjada, vista em (4.13). Ao comparar a expressão para o cálculo iterativo dos ganhos do PID com a expressão vista no início deste estudo, em (2.5), pode-se identificar em (4.14) os valores dos ganhos proporcional, integral e derivativo em função de K e/ou a .

$$G_{pid}(s) = Ks + 2Ka + \frac{Ka^2}{s} \quad (4.13)$$

$$K_p = 2Ka \quad K_i = Ka^2 \quad Kd = K \quad (4.14)$$

Através de iterações realizadas em faixas de valores determinadas de forma empírica, foi possível obter um bom resultado para os valores de K e a , que podem ser vistos na Tabela 5, assim como os valores dos ganhos.

Sendo valores aplicáveis de forma prática, nota-se que o resultado obtido pode ser aplicado em uma operação real. Antes de continuar, a resposta do sistema a uma entrada em degrau 0,1 deve ser analisada. Para isso, deve-se analisar a malha fechada da função de transferência da válvula (4.1) em conjunto com a função de transferência do controlador (4.15).

$$G_{cl}(s) = \frac{0,625s^2 + 4,375s + 7,656}{s} \quad (4.15)$$

Tabela 5 – Parâmetros obtidos para o controlador da válvula.

Parâmetros	PID - Válvula
K	0,6250
a	3,5000
K_p	4,3750
K_i	7,6562
K_d	0,6250

Fonte: Autor (2022).

A notação utilizada para o único bloco deste sistema isolado, representando o conjunto da válvula - formado através da junção do bloco do PID com o bloco da função de operação da válvula - será $G_{cv}(s)$. A função de transferência deste bloco único, assim como a função em malha fechada, na qual será aplicado o degrau, podem ser vistas, respectivamente, em (4.16) e (4.17).

$$G_{cv}(s) = \frac{0,625s^2 + 4,375s + 7,656}{0,15s^2 + s} \quad (4.16)$$

$$G_{cvMF}(s) = \frac{0,625s^2 + 4,375s + 7,656}{0,775s^2 + 5,375s + 7,656} \quad (4.17)$$

Finalmente, é possível aplicar uma entrada em degrau 0,1 à função de transferência $G_{cvMF}(s)$, cujo gráfico de resposta está expresso na Figura 33. Os parâmetros de desempenho podem ser encontrados na Tabela 6.

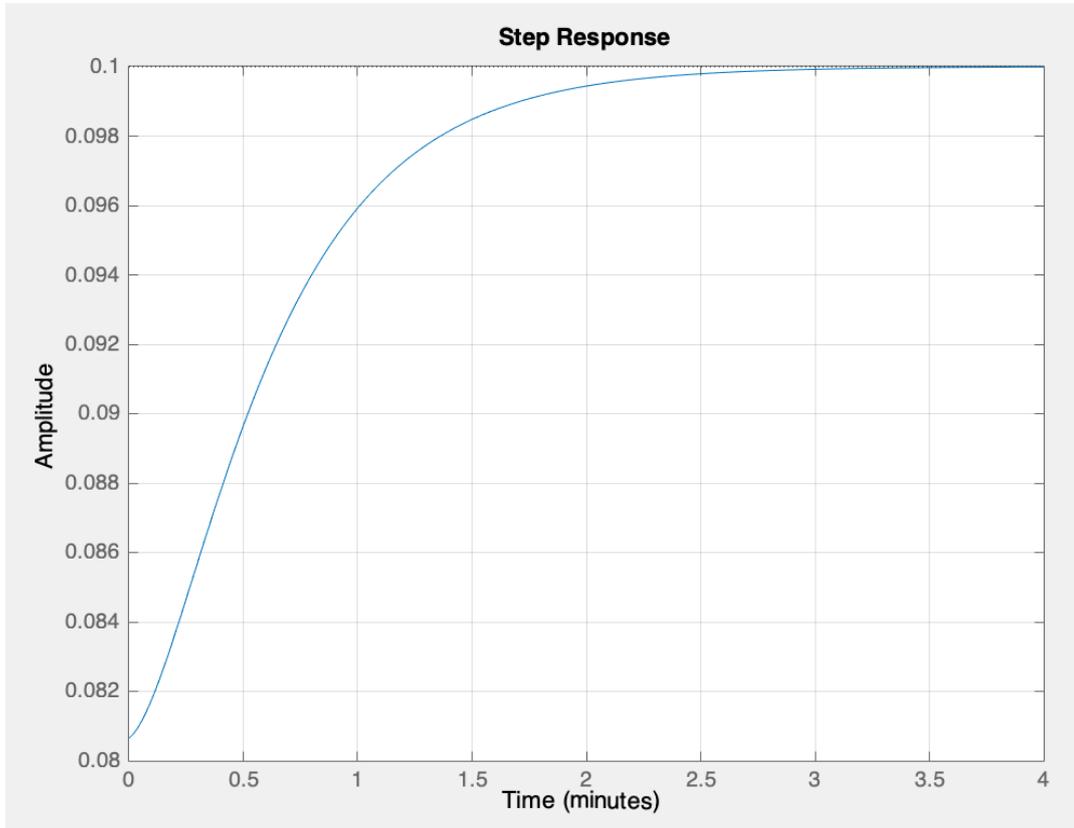
Tabela 6 – Parâmetros de desempenho da resposta do sistema em malha fechada $G_{cvMF}(s)$.

Parâmetros	$G_{cvMF}(s)$
Tempo de subida (t_r)	1,23 min
Máximo sobressinal	-
Tempo de acomodação (t_s)	2,19 min
Erro estacionário	0%

Fonte: Autor (2022).

Ao comparar os parâmetros de desempenho há pouco obtidos com a aplicação de um degrau, aos obtidos para o sistema da válvula não controlada em malha fechada, nota-se que o erro estacionário foi completamente abolido. Quanto aos tempos de subida e de acomodação, de fato, estes sofreram um acréscimo inaceitável, já que o sistema tornou-se, aproximadamente, dez vezes mais lento que o original.

Figura 33 – Resposta do sistema em malha fechada $G_{cvMF}(s)$ a uma entrada degrau 0,1.



Fonte – Autor (2022).

Deve ser buscada uma configuração para o referido controlador PID onde obtenha-se uma melhora na resposta transitória, tornando-a mais rápida. Ou seja, é notório que devem ser realizados aumentos no valor do fator integral. Os fatores proporcional e derivativo serão ajustados para amenizar os prejuízos trazidos pelo aumento do fator integral. O ganho proporcional provavelmente não aumentará muito em relação ao que já foi encontrado. Já o derivativo, poderá não ser necessário, pois a função de transferência da válvula é de primeira ordem e possui uma curva de resposta exponencial, sem oscilações. Com isso, nota-se que o método escolhido para sintonização do controlador PID da válvula não foi muito efetivo. Todas essas constatações acerca do comportamento da válvula já haviam sido anteriormente realizadas. Portanto, uma simples análise da curva de resposta, observando os pontos que necessitam de melhoria, seria suficiente para admitir valores para os ganhos proporcional, integral e derivativo de forma empírica.

Os valores finalmente obtidos para os ganhos proporcional e derivativo do controlador podem ser encontrados na Tabela 7, assim como sua função de transferência em (4.18). Em seguida, está disposta a função de transferência do conjunto válvula + PID em malha fechada (4.19). A curva de resposta para uma entrada em degrau, tal qual seus parâmetros, podem ser

vistos, respectivamente, na Figura 34 e na Tabela 8.

Tabela 7 – Parâmetros obtidos para o controlador da válvula.

Parâmetros	PID - Válvula
K_p	5
K_i	40
K_d	-

Fonte: Autor (2022).

$$G_{c1}(s) = \frac{5s + 40}{s} \quad (4.18)$$

$$G_{cvMF}(s) = \frac{5s + 40}{0,15s^2 + 6s + 40} \quad (4.19)$$

Tabela 8 – Parâmetros de desempenho da resposta do sistema em malha fechada $G_{cvMF}(s)$.

Parâmetros	$G_{cvMF}(s)$
Tempo de subida (t_r)	0,0604 min
Máximo sobressinal	1,33%
Tempo de acomodação (t_s)	0,0944 min
Erro estacionário	0%

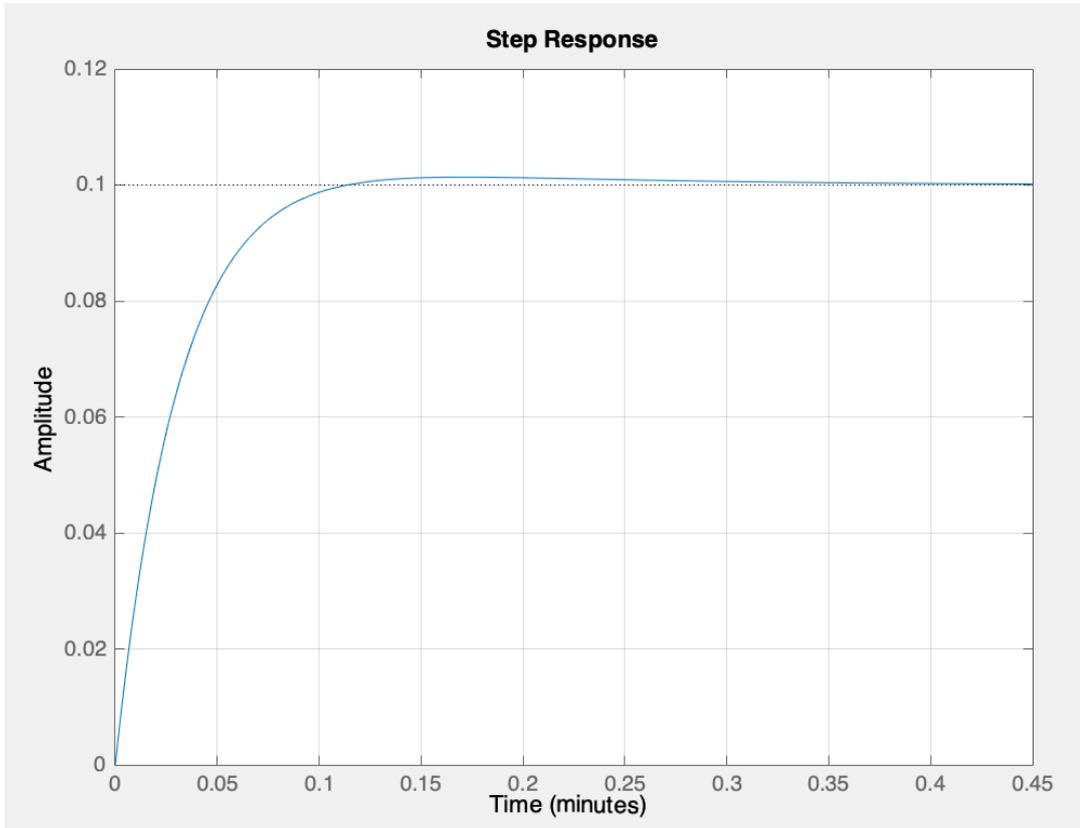
Fonte: Autor (2022).

Finalmente, o arranjo obtido é satisfatório. A resposta transitória sofreu uma melhora significativa, conforme esperado com o aumento do ganho K_i . Nota-se também que, como previsto, o fator derivativo K_d não mostrou-se imprescindível para o controle adequado de válvula de alimentação. O máximo sobressinal, no valor de 1,33% é um valor aceitável, possuindo um impacto irrisório ao processo. Como a configuração obtida é satisfatória para o sistema, toma-se a sintonização do controlador associado ao nível como finalizada.

4.2 CONTROLADOR DE NÍVEL

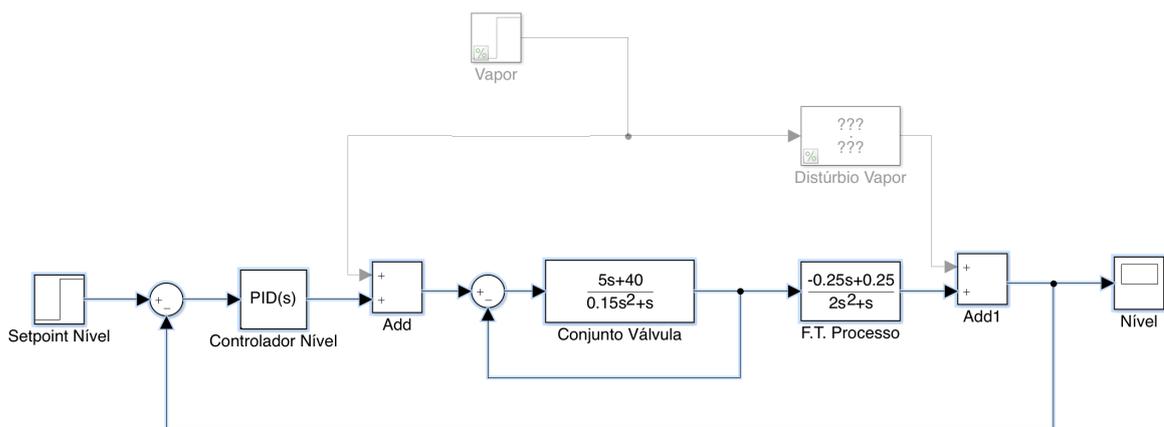
Após a sintonização do controlador PID associado à válvula, pode-se combinar os blocos do controlador e da função de transferência da válvula em um único. Essa junção tem por intuito a facilitar as operações de simplificação do diagrama de blocos do sistema, que serão apresentadas posteriormente, permitindo a sintonização do PID de controle de nível. O resultado obtido pode ser visto na Figura 35.

Figura 34 – Resposta do sistema em malha fechada $G_{cvMF}(s)$ a uma entrada degrau 0,1.



Fonte – Autor (2022).

Figura 35 – Malha de controle de nível a 2 elementos com os blocos da válvula unificados.

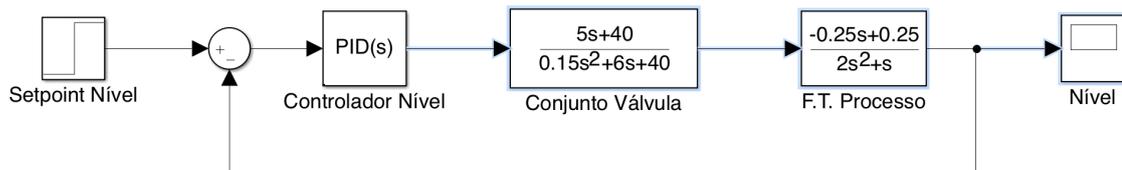


Fonte – Autor (2022).

A redução de sistemas do tipo *MISO* a um único diagrama de bloco não é possível, já que entradas independentes necessitam de pontos de operação (blocos) diferentes. Naturalmente, é impossível reduzir o sistema de controle apresentado a um único bloco. Um possível método de

análise, que será seguido neste estudo, é a eliminação temporária da entrada de vapor, trabalhando-se, então, com um controle de nível a 2 elementos sem distúrbios. Assim, os ramos alimentados pela entrada relativa ao vapor: a linha de realimentação do terceiro elemento de controle e o distúrbio de vapor, podem ser colocados em *standby*, retornando ao sistema após a sintonização do PID, onde serão observados os impactos causados à resposta. É fácil visualizar em destaque, na Figura 36, a malha de controle a 2 elementos, do tipo *SISO*, que será simplificada em seguida.

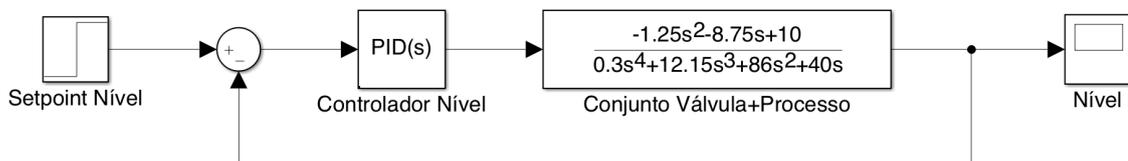
Figura 36 – Malha de controle de nível a 2 elementos sem distúrbio, blocos da válvula unificados.



Fonte – Autor (2022).

Nota-se que o bloco resultante do conjunto da válvula com realimentação já foi substituído na Figura 36, já que a função de transferência havia sido anteriormente obtida em (4.19). Uma vez realizada a substituição, deve-se simplificar a parte destacada na malha da Figura 36, unificando os blocos do conjunto da válvula e da função de transferência do processo. Deste modo, obtém-se o bloco representante do sistema de controle de nível a 2 elementos, vide Figura 37. A notação utilizada para representar a função de transferência do bloco representante do processo será $G_{red}(s)$, cuja expressão pode ser encontrada em (4.20).

Figura 37 – Malha de controle a 2 elementos simplificada, sem distúrbio.



Fonte – Autor (2022).

$$G_{red}(s) = \frac{-1,25s^2 - 8,75s + 10}{0,3s^4 + 12,15s^3 + 86s^2 + 40s} \quad (4.20)$$

De posse do sistema resultante a ser estudado, pode-se partir para a sintonização do PID associado ao controle do nível. Antes, porém, é imprescindível realizar uma análise do sistema apresentado. Vale salientar que as análises serão realizadas para o sistema reduzido em malha

fechada $G_{redMF}(s)$, sem a presença do controlador. A expressão para a função de transferência citada está expressa em (4.21).

$$G_{redMF}(s) = \frac{-1,25s^2 - 8,75s + 10}{0,3s^4 + 12,15s^3 + 84,75s^2 + 31,25s + 10} \quad (4.21)$$

4.2.1 Análise do Sistema a 2 Elementos Simplificado

Na seção anterior - projeto do controlador de vazão - foi possível provar, em uma abordagem inicial, que um controlador puramente proporcional não era aplicável. A função de transferência da válvula em malha fechada (4.7) conta com apenas um polo real, sendo de natureza mais simples do que a função de transferência simplificada em malha fechada (4.19), que conta com dois zeros reais e quatro polos reais (Tabela 9). É notório que o controle de uma função mais complexa necessita de um controlador mais abrangente, que é o caso de um controlador PID. Portanto, não seria interessante tentar controlar o sistema com um controlador puramente proporcional. Essa afirmação pode ser consolidada na análise que segue.

Tabela 9 – Valores dos zeros e polos da função de transferência $G_{redMF}(s)$.

$G_{redMF}(s)$	
Zeros	Polos
- 8	- 31,6875
1	- 8,4418
-	- 0,1854 + 0,3004 j
-	- 0,1854 - 0,3004 j

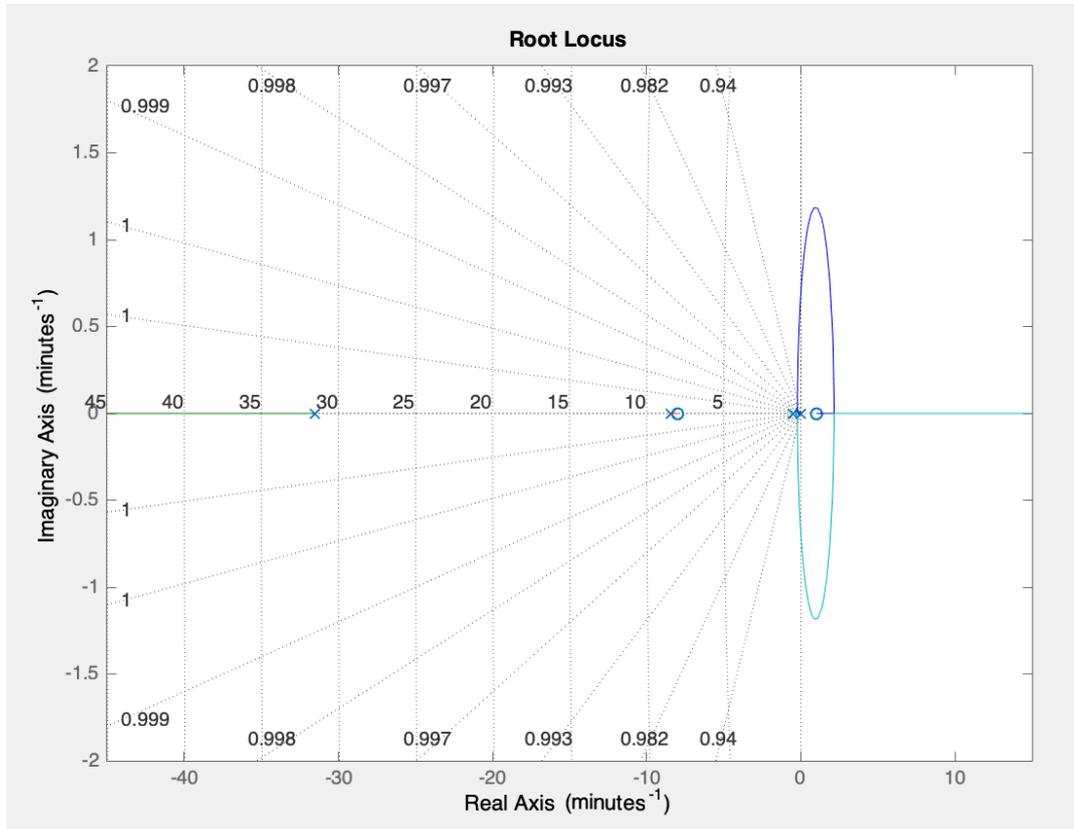
Fonte: Autor (2022).

Observando os valores dos zeros da função em malha fechada, nota-se a presença de um par complexo conjugado, fonte promovedora de oscilações. Espera-se que a resposta transitória do sistema não controlado seja prejudicada. No gráfico lugar das raízes da função em malha aberta $G_{red}(s)$ (Figura 38), é possível visualizar que existem inúmeros valores de ganho proporcional K_p que geram instabilidade no sistema, visto que o gráfico não está localizado inteiramente no semiplano esquerdo do plano s . Além disso, deve-se levar em consideração que existem valores de K_p para os quais ocorrem pontos de saída do eixo real, implicando na presença de pares complexos conjugados e mudanças no tipo da resposta transitória.

O gráfico visto na Figura 38 indica que a sintonização de um controlador PID poderá ser custosa em relação ao ganhos. Esse tipo de comportamento indicativo de possíveis instabilidades, faz concluir que o sistema necessitará de valores consideráveis de ganho derivativo, o que pode tornar-se não muito interessante para aplicações práticas. É provável que, para uma sintonização facilitada do controlador de nível, seja necessário resintonizar o primeiro controlador - associado

à válvula - modificando o lugar das raízes da função reduzida. Essa necessidade será observada no tópico a seguir, onde o objetivo será encontrar os valores dos ganhos.

Figura 38 – Lugar das raízes de $G_{red}(s)$.

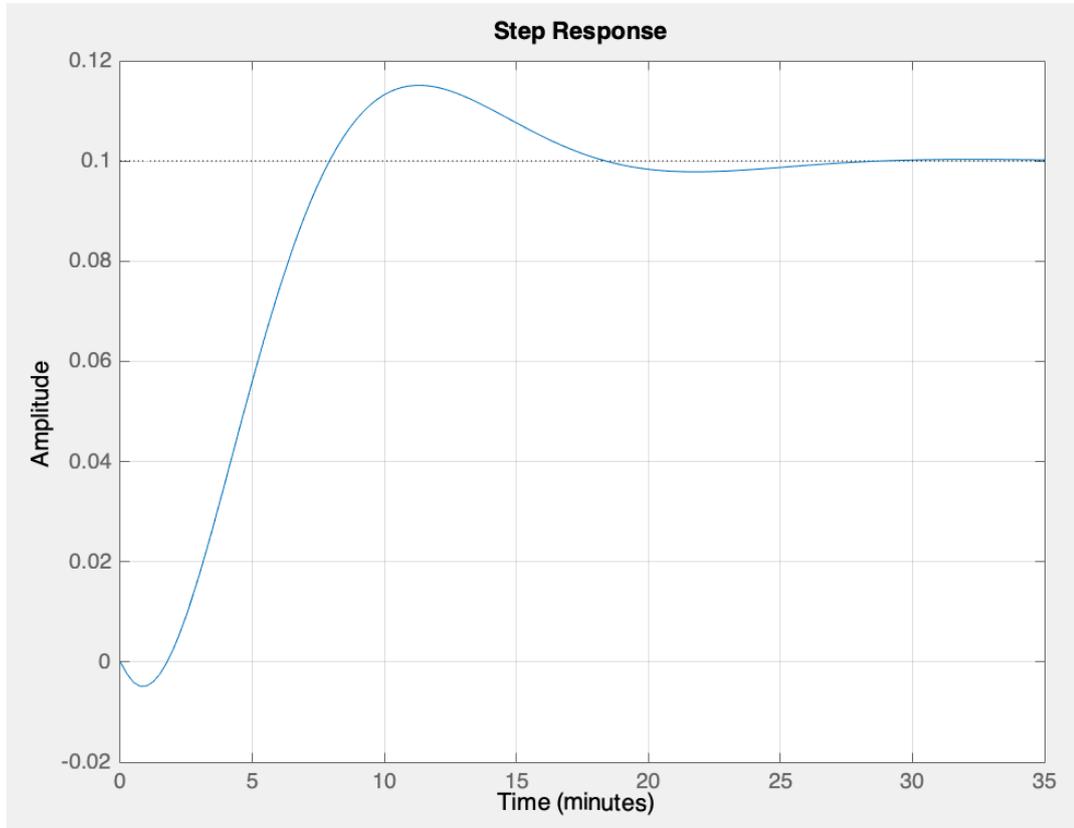


Fonte – Autor (2022).

De modo a ratificar a decisão de partir diretamente para a sintonização dos fatores proporcional, integral e derivativo, têm-se, na Figura 39, a resposta do sistema reduzido em malha fechada, à exceção da presença do controlador. Com a observação do comportamento da curva de resposta, por seu formato e seus parâmetros (Tabela 10), pode-se se dizer que a resposta transitória é insatisfatória. O sistema não controlado responde de forma lenta, com alto tempo de acomodação. O máximo sobressinal, apesar de não ser excessivamente alto, pode ser melhorado. Já a resposta estacionária não conta com erro, imprimindo excelente resultado.

Numa abordagem simplória e inicial, pode-se imaginar que o fator integral seria desnecessário, já que não há necessidade de correção do erro. Porém, com a alteração de valores no ganho proporcional, a resposta estacionária pode sofrer modificações, sendo necessária a presença de um fator integral. Evidentemente, o fator derivativo é indispensável neste caso, promovendo a melhora na resposta transitória, que é a parte mais periclitante da resposta. Então, conforme previsto apenas pela observação do número de zeros e polos da função, um controlador do tipo PID é o mais adequado para o processo.

Figura 39 – Resposta de $G_{red}(s)$ em malha fechada a uma entrada em degrau 0,1.



Fonte – Autor (2022).

Tabela 10 – Parâmetros de desempenho da resposta do sistema em malha fechada $G_{redMF}(s)$.

Parâmetros	$G_{redMF}(s)$
Tempo de subida (t_r)	4,52 min
Máximo sobressinal	15,1%
Tempo de acomodação (t_s)	22,6 min
Erro estacionário	0%

Fonte: Autor (2022).

4.2.2 Projeto de um controlador PID

Foi visto na sintonização do primeiro controlador - da válvula - que o método empregado para a obtenção de valores para os ganhos proporcional, integral e derivativo não mostrou-se extremamente eficaz. De fato, serve como uma primeira abordagem, para aproximar-se de valores adequados para os fatores. Apesar disso, pode tornar-se falho, caso os valores escolhidos de forma aleatória não sejam adequados.

Conforme explicado no tópico anterior, o gráfico lugar das raízes obtido favorece bastante

a ocorrência de instabilidade nas funções controladas. Isso foi verificado ao tentar realizar a sintonização do controlador de nível, que tornou-se incrivelmente difícil, não sendo obtido um bom resultado com variados arranjos para o controlador. Pequenas variações no fator integral K_i promoviam respostas instáveis com picos da ordem de 10^{20} . Como o resultado obtido para o controlador associado à válvula foi excelente e, de modo a agir de forma mais pontual, o controlador citado terá seu desempenho um pouco prejudicado, o que é perfeitamente aceitável. Essa redução no desempenho será dada para observar se é possível tornar o lugar das raízes da função reduzida menos suscetível à instabilidade, facilitando a sintonização do controlador de nível.

4.2.2.1 Ressintonização do Controlador da Válvula

Como o resultado obtido anteriormente retirou não só o erro existente na resposta da válvula não controlada, mas também tornou o processo três vezes mais rápido - o que nem seria extremamente necessário para a operação de um servomecanismo trabalhando em um processo lento, que não demanda rapidez extrema em sua operação - têm-se uma grande faixa de valores a ser trabalhada para tornar o desempenho mais lento e, ao mesmo tempo, continuar satisfatório.

Alguns testes foram realizados com valores próximos aos aplicados no controlador da válvula anteriormente. Assim, foi possível promover uma redução na velocidade da dos tempos de subida e de acomodação da válvula controlada, porém mantendo-a mais rápida do que a configuração da válvula não controlada. É possível visualizar em (4.22) a nova função de transferência da válvula controlada - em malha fechada - e na Tabela 11 é possível verificar quais os valores de ganho que foram empregados.

$$G_{cvMF}(s) = \frac{0,01s^2 + 2,75s + 22}{0,16s^2 + 3,75s + 22} \quad (4.22)$$

Tabela 11 – Parâmetros obtidos para o controlador da válvula.

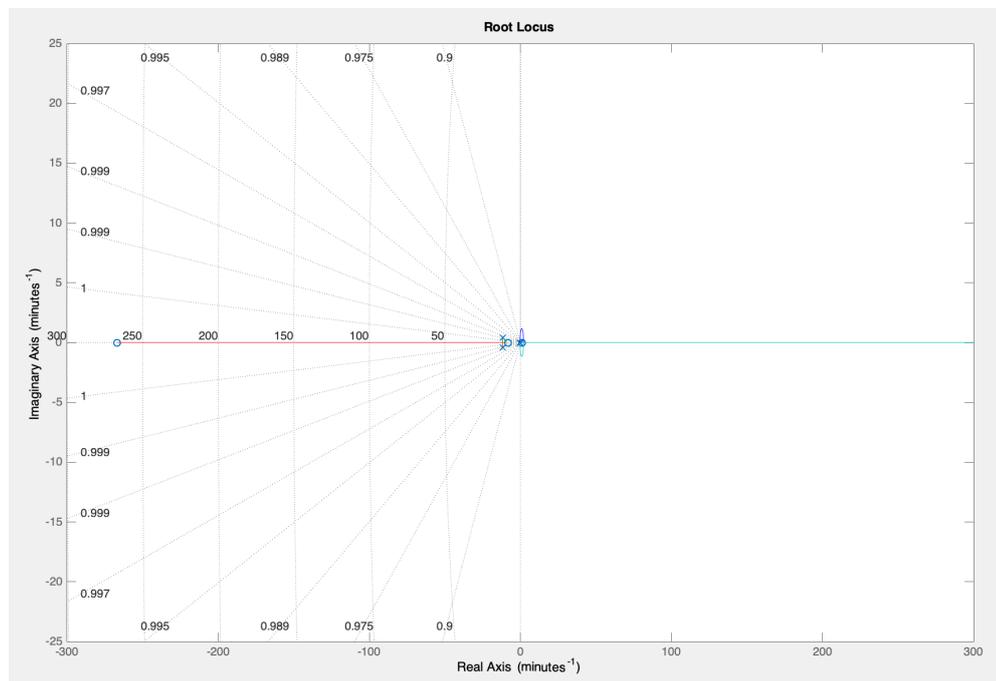
Parâmetros	PID - Válvula
K_p	2,75
K_i	22
K_d	0,01

Fonte: Autor (2022).

A inserção do fator derivativo - em um valor representativo - promoveu uma melhora significativa na resposta da válvula controlada, em comparação ao resultado obtido sem K_d . Além disso, a inserção do fator derivativo promove uma mudança sutil no gráfico lugar das raízes

da função reduzida, como pode ser visto nas Figuras 40 e 41. Apesar da mudança ocasionada na parte esquerda do gráfico, a parte direita, que é a parte mais prejudicial, pouco muda, visto que está intrinsecamente ligada ao bloco do processo. Apesar disso, a sintonização do controlador associado ao nível será dada tomando, para o controlador associado à válvula, os valores vistos na Tabela 11. Essa decisão é pautada no fato de que é possível promover o controle com valores, praticamente, equivalentes à metade dos que foram anteriormente obtidos, não trabalhando de forma desnecessária com valores maiores.

Figura 40 – Lugar das raízes de $G_{red}(s)$.

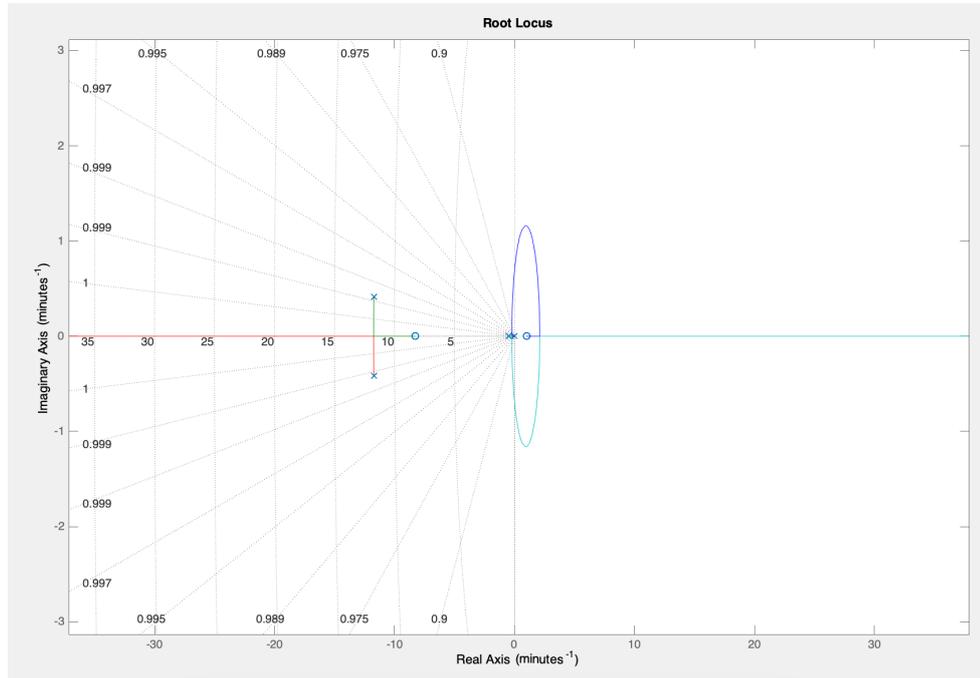


Fonte – Autor (2022).

Antes de partir para a sintonização do segundo controlador, a seguir, está apresentada a nova curva de resposta da válvula controlada em malha fechada, para uma entrada em degrau 0,1. Tanto em sua curva (Figura 42) quanto na Tabela 12, pode-se observar o comportamento e os parâmetros de $G_{cvMF}(s)$, que estão mais lentos do que o arranjo obtido no começo deste capítulo, porém mais ainda mais rápidos e precisos do que a curva original.

4.2.2.2 Sintonização do Controlador de Nível

Finalmente, pode-se partir para a obtenção dos fatores proporcional, integral e derivativo para o controlador de nível. A seguir, em (4.23) e (4.24) é possível visualizar as novas expressões para a função de transferência do sistema simplificado em malha aberta e em malha fechada. É necessário ter posse desses valores para poder sintonizar o PID associado ao nível, visto na

Figura 41 – Lugar das raízes de $G_{red}(s)$ com imagem ampliada.

Fonte – Autor (2022).

Tabela 12 – Parâmetros de desempenho da resposta do sistema em malha fechada $G_{cvMF}(s)$.

Parâmetros	$G_{cvMF}(s)$
Tempo de subida (t_r)	0,112 min
Máximo sobressinal	1,47%
Tempo de acomodação (t_s)	0,169 min
Erro estacionário	0%

Fonte: Autor (2022).

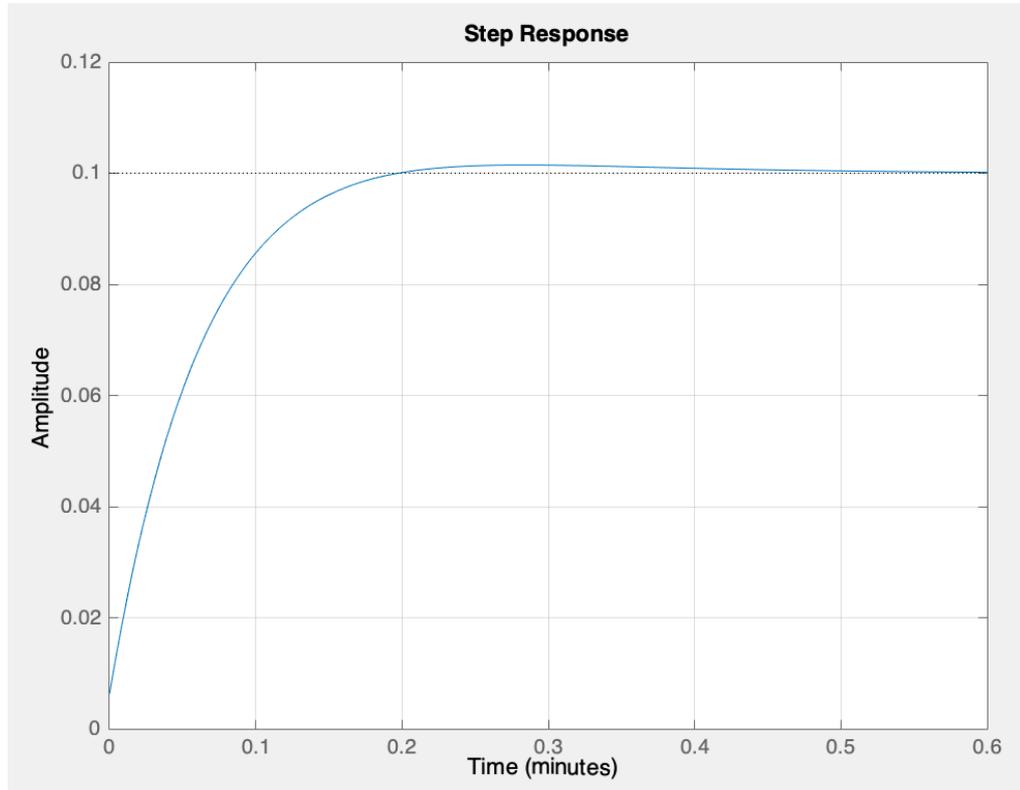
Figura 37. Em seguida, a curva de resposta de $G_{redMF}(s)$ está exposta na Figura 43 e seus referidos parâmetros na Tabela 13.

$$G_{red}(s) = \frac{-0,0025s^3 - 0,685s^2 - 4,812s + 5,5}{0,32s^4 + 7,66s^3 + 47,75s^2 + 22s} \quad (4.23)$$

$$G_{redMF}(s) = \frac{-0,0025s^3 - 0,685s^2 - 4,812s + 5,5}{0,32s^4 + 7,657s^3 + 47,06s^2 + 17,19s + 5,5} \quad (4.24)$$

Como pôde-se observar anteriormente nas Figuras 39 e 43, a natureza da curva do sistema reduzido é praticamente a mesma, independentemente da configuração do controlador da válvula.

Figura 42 – Resposta do sistema em malha fechada $G_{cvMF}(s)$ a uma entrada degrau 0,1.



Fonte – Autor (2022).

Tabela 13 – Novos parâmetros de desempenho da resposta de $G_{redMF}(s)$.

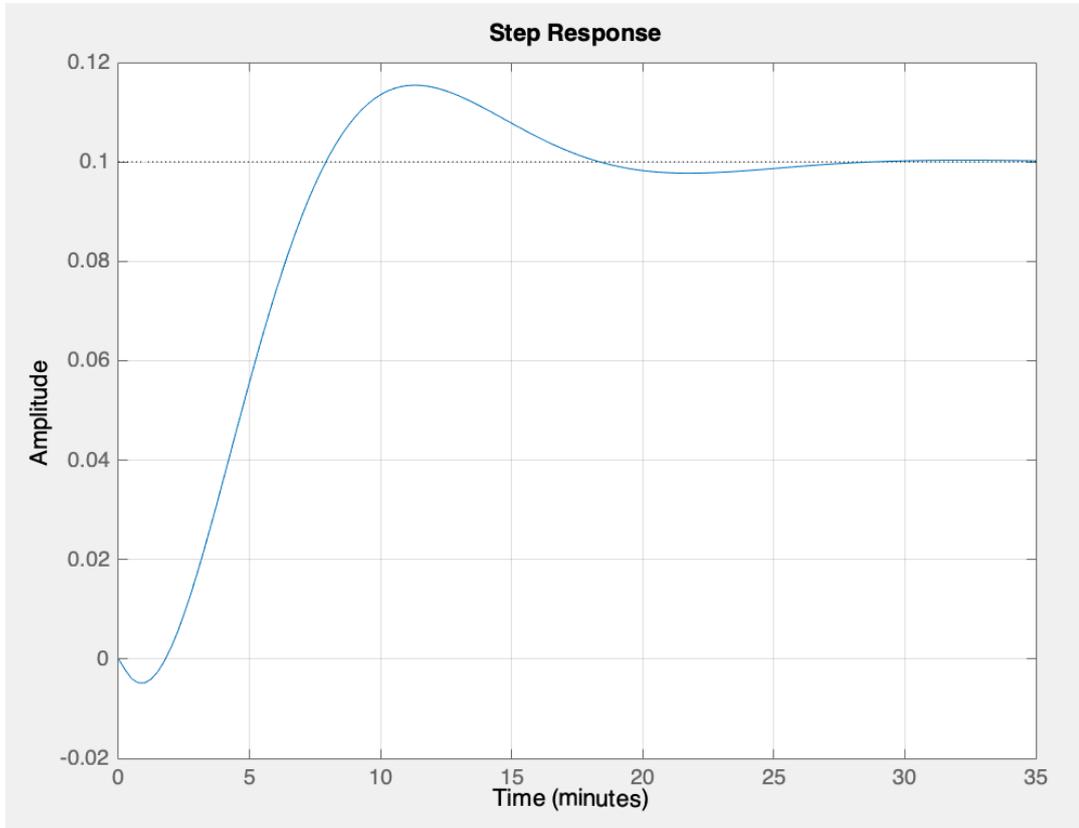
Parâmetros	$G_{redMF}(s)$
Tempo de subida (t_r)	4,5 min
Máximo sobressinal	15,4%
Tempo de acomodação (t_s)	22,9 min
Erro estacionário	0%

Fonte: Autor (2022).

Evidentemente, os parâmetros de desempenho obtidos continuaram muito próximos do resultado obtido anteriormente. Isso se dá pela natureza da função do processo, que é dominante em relação à função de transferência da válvula - uma função mais simples, do tipo 0. A mudança do controlador da válvula pouco impactou a uma entrada em degrau 0,1 e pode parecer desnecessária. Porém, o novo lugar das raízes obtido impacta consideravelmente a sintonização do controlador de nível, permitindo operar com uma gama maior de valores que não provocam instabilidade no sistema.

A grande questão da sintonização do controlador de nível é que: a natureza da função do

Figura 43 – Nova resposta de $G_{redMF}(s)$ a uma entrada em degrau 0,1.



Fonte – Autor (2022).

processo conta com alguns fatores dificultosos. Nota-se a presença de um pequeno vale no início da curva de resposta, que sempre estará presente, já que comporta-se de forma oposta ao máximo sobressinal. De fato, sempre busca-se reduzir o máximo sobressinal ao tentar otimizar um processo ou uma função e, neste caso, não será diferente. A otimização do máximo sobressinal ocorre em detrimento do vale presente na curva. Caberá, então, encontrar o arranjo mais adequado para o controlador de nível. A natureza instável da função também faz com que a sintonização de fatores integrais - de quaisquer valores - no controlador de nível torne-se extremamente penosa, pois as curvas de resposta ficam facilmente instáveis.

Após várias tentativas realizadas de forma manual com auxílio de códigos encontrados nos anexos deste estudo, com auxílio da ferramenta *PID Tuner*, presente no *MATLAB* e com a constante análise da curva de resposta do sistema reduzido controlado, a uma entrada em degrau 0,1, foi possível chegar nos ganhos vistos na Tabela 14. As funções reduzidas controladas em malha aberta e em malha fechada podem ser vistas em (4.25) e (4.26).

$$G_{rc}(s) = \frac{-0,0035s^5 - 0,9615s^4 - 7,423s^3 + 2,887s^2 + 5,495s + 0,0055}{0,32s^5 + 7,66s^4 + 47,75s^3 + 22s^2} \quad (4.25)$$

Tabela 14 – Parâmetros obtidos para o controlador do nível.

Parâmetros	PID - Nível
K_p	1
K_i	0,001
K_d	1,4

Fonte: Autor (2022).

$$G_{rcMF}(s) = \frac{-0,0035s^5 - 0,9615s^4 - 7,423s^3 + 2,887s^2 + 5,495s + 0,0055}{0,3165s^5 + 6,699s^4 + 40,33s^3 + 24,89s^2 + 5,495s + 0,0055} \quad (4.26)$$

Conforme especulado na análise do sistema a 2 elementos simplificado, o fator integral realmente mostra-se de pouquíssimo valor na sintonização deste controlador. Apesar disso, não significa que o mesmo pode ser zerado. Neste caso, ao zerar o K_i , a curva de resposta não possuiria tempo de subida nem tempo de acomodação, já que a resposta estacionária tenderia ao infinito. E, ainda em conformidade com o que foi previsto, o fator mais considerável desta configuração é o fator derivativo, responsável pelo ajuste necessário na resposta transitória da curva não controlada. Na Figura 44 é possível visualizar a curva de resposta do sistema reduzido controlado $G_{rcMF}(s)$. Seus respectivos parâmetros de desempenho estão dispostos na Tabela 15.

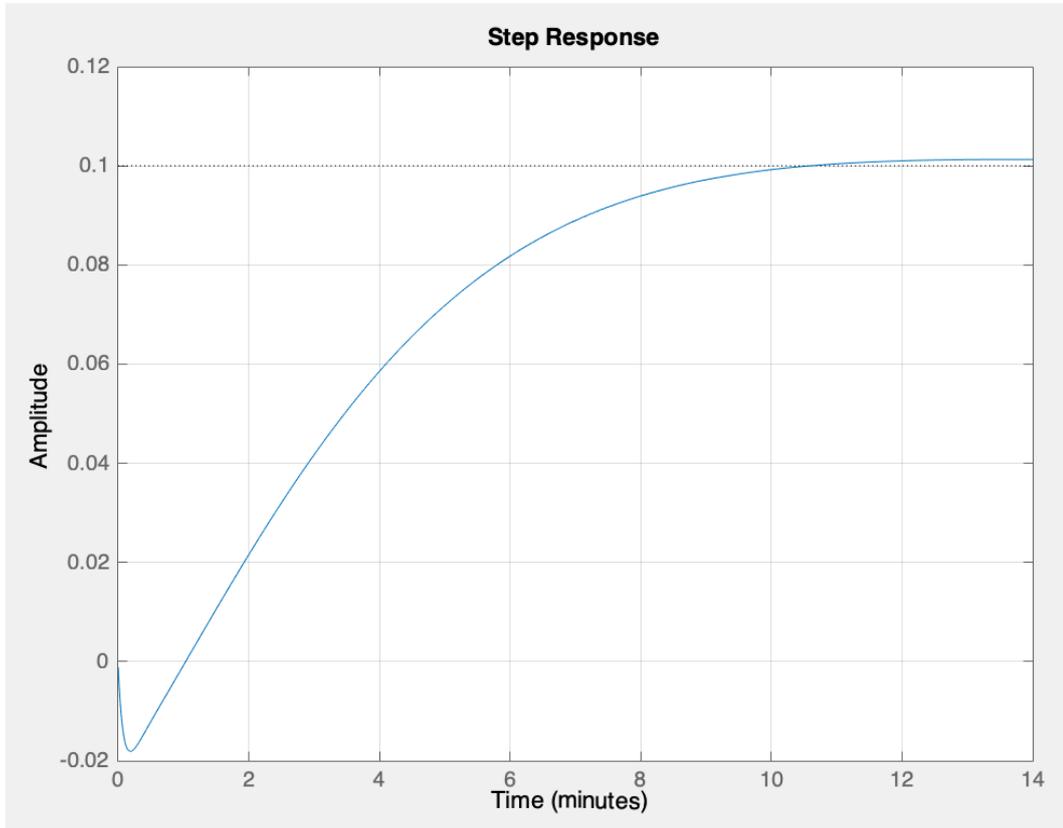
Tabela 15 – Parâmetros de desempenho da resposta de $G_{rcMF}(s)$.

Parâmetros	$G_{rcMF}(s)$
Tempo de subida (t_r)	5,73 min
Máximo sobressinal	1,29%
Tempo de acomodação (t_s)	9,19 min
Erro estacionário	0%
Margem de ganho	14,8471 dB
Margem de fase	68,2832°

Fonte: Autor (2022).

Quanto aos parâmetros obtidos, pode-se realizar algumas considerações. Houveram melhoras significativas no máximo sobressinal e no tempo de acomodação. O primeiro decresceu de 15,4% para 1,29% e o segundo foi diminuído de 22,9min para 9,19min. Quanto ao tempo de subida, ficou pouco mais de 1 minuto mais lento, indo de 4,5min para 5,73min. Esse decréscimo é perfeitamente aceitável e entrega valores dentro das faixas de operação de um processo lento como o de uma caldeira. A aceitação de um valor de tempo de subida menor é aceitável, também, pelo fato de que natureza da função impede a contemplação de todos os parâmetros de desempenho ao mesmo tempo. O vale no início da curva também é muito sensível

Figura 44 – Resposta de $G_{rcMF}(s)$ a uma entrada em degrau 0,1.



Fonte – Autor (2022).

a mudanças e torna-se muito negativo em algumas configurações. Ademais, o fato de ter reduzido significativamente o máximo sobressinal e o tempo de acomodação faz com que o aumento de, aproximadamente, 1 minuto no tempo de subida tenha pouco ou nenhum efeito no processo propriamente dito.

Em relação à margem de fase, sabe-se que valores acima de 45° , em geral, são aceitáveis. Margens de fase maiores tornam o sistema mais estável. Assim, valores em torno de 60° são suficientes, permitindo maior flexibilidade. O valor encontrado é satisfatório para o processo. Uma margem de ganho positiva, que é o caso do valor obtido, é um resultado seguro, garantindo a estabilidade do sistema em malha fechada.

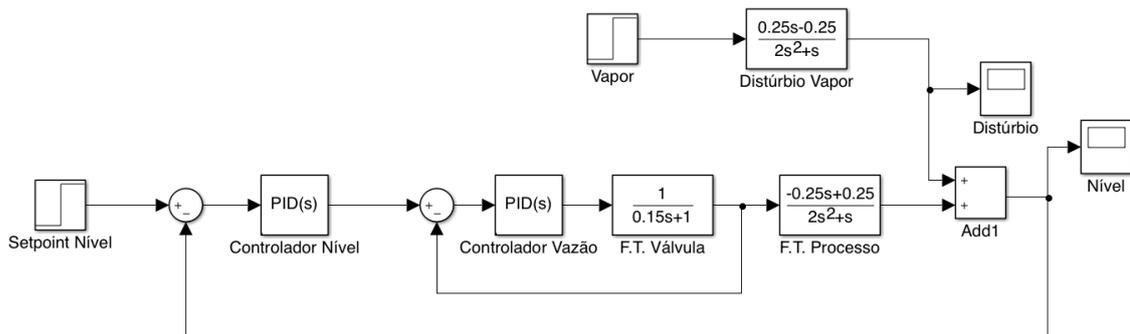
O vale presente no início da curva atinge um pico negativo no valor de, aproximadamente, 0,018. Ou seja, a curva de resposta desloca-se 18% em relação ao valor inicial, tratando de um degrau de 0,1. Tratando desse vale em termos práticos, o sistema não sofre prejuízo. O tubo possui um diâmetro interno no valor de 1.411 mm. Conforme explicado anteriormente, a flutuação de nível de fluido na caldeira não ocorre desde o ponto zero real - caldeira vazia - até o ponto mais alto - caldeira completamente cheia - visto que existem limites inferiores e superiores de segurança, associados a alarmes. Na verdade, essa flutuação de 18% ocorre na metade da

altura da caldeira, em torno do *range* do nível escolhido que, normalmente, é cerca de 25% a 30% do diâmetro do tubulão. Assumindo uma média entre os valores médios, pode-se dizer que trabalharia-se com um valor de 385 mm. Uma variação negativa de 18% no valor de 385 mm, traria um decréscimo de 69,3 mm que, em termos práticos, nada afetaria no desempenho ou na segurança do processo. O resultado obtido permite prosseguir com a análise do sistema.

4.3 ANÁLISE DO DISTÚRBIO

Após a sintonização do controlador associado a válvula e do controlador associado ao nível nos tópicos anteriores, a metodologia escolhida para a realização deste estudo segue com a inserção do distúrbio de vapor. O elemento da vazão de vapor, por ora, não será reinserido, de forma a observar como o sistema controlado reage à presença do distúrbio. Com a reinserção do distúrbio de vapor, o sistema deixa de ser do tipo SISO. O uso linhas de código no *MATLAB* torna a análise de sistemas *MISO* muito trabalhosa. Com isso, as análises a seguir serão realizadas com o auxílio do *Simulink*. A malha de controle em questão está disposta na Figura 45.

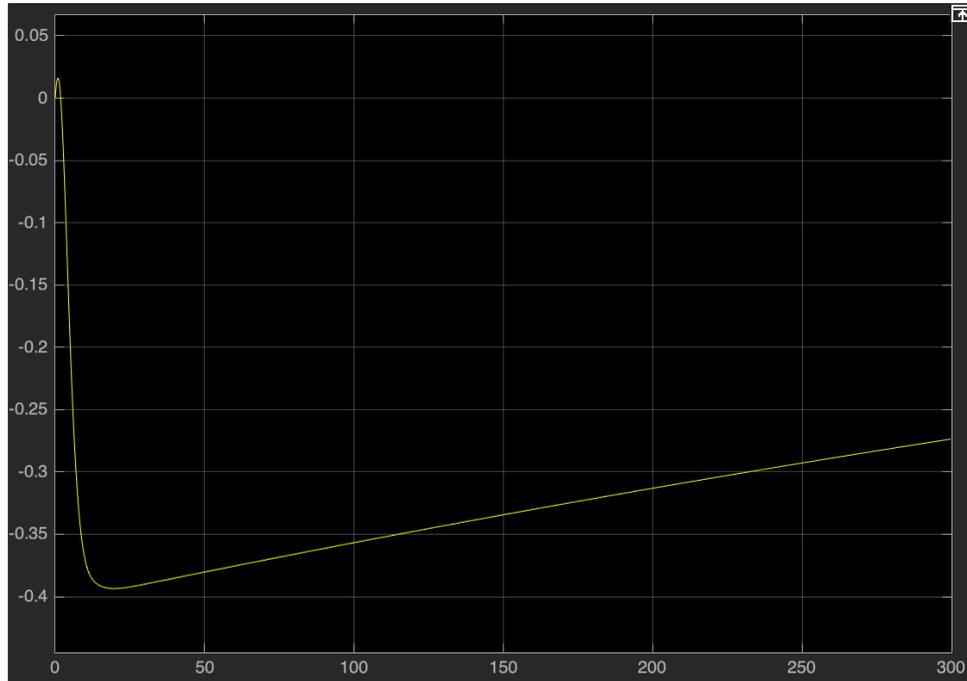
Figura 45 – Malha de controle de nível a 2 elementos com a presença do distúrbio.



Fonte – Autor (2022).

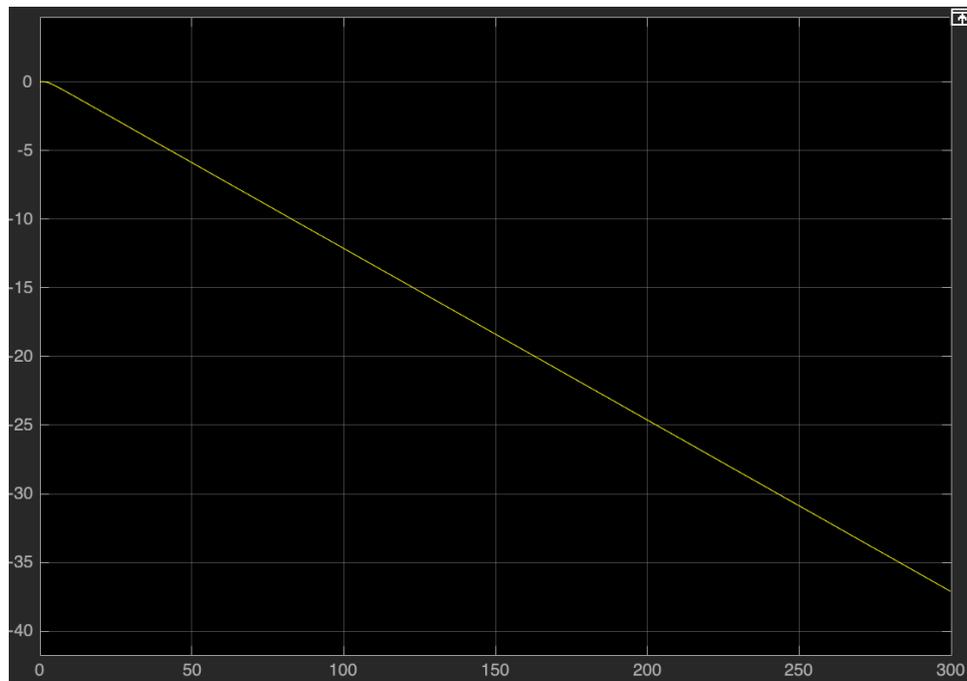
O distúrbio causado pelo vapor deve estar presente em qualquer simulação de um processo real de uma caldeira, proporcionando uma maior aproximação da realidade. Esse distúrbio é causado pelo fato de que a demanda de vapor em uma caldeira a vapor é variável, dependendo da necessidade de energia requerida pelo processo, conforme detalhado em tópicos anteriores. A presença do distúrbio faz com que o controle de nível, nas configurações atuais dos controladores, seja altamente prejudicado, sendo necessário tentar sintonizar novamente os mesmos. Ao visualizar a curva de resposta do distúrbio a uma entrada em degrau 0,5 (Figura 47), uma rampa com tendência a valores negativos, percebe-se o porquê do prejuízo à curva de resposta do sistema controlado ao inserir o distúrbio. É possível visualizar o comportamento do nível na Figura 46. A simulação foi realizada em um intervalo de tempo maior do que os intervalos vistos anteriormente, sendo de 300 minutos. Essa decisão foi tomada para expor que, com a presença do distúrbio, o sistema - com os ganhos atuais - nunca atingirá a estabilidade.

Figura 46 – Curva de resposta do nível ao degrau, sistema a 2 elementos com distúrbio.



Fonte – Autor (2022).

Figura 47 – Curva de resposta do distúrbio a uma entrada em degrau 0,5.



Fonte – Autor (2022).

Inúmeros testes foram realizados com auxílio da ferramenta *PID Tuner* ou de forma manual no *Simulink* - a segunda para o caso de controladores com ganhos maiores - para tentar sintonizar os controladores. Todas tentativas foram frustradas e nenhum resultado obtido foi satisfatório. Na Tabela 16 é possível visualizar algumas configurações escolhidas para representar os resultados obtidos, sendo o controlador 1 o associado à da válvula e o 2 o associado ao nível.

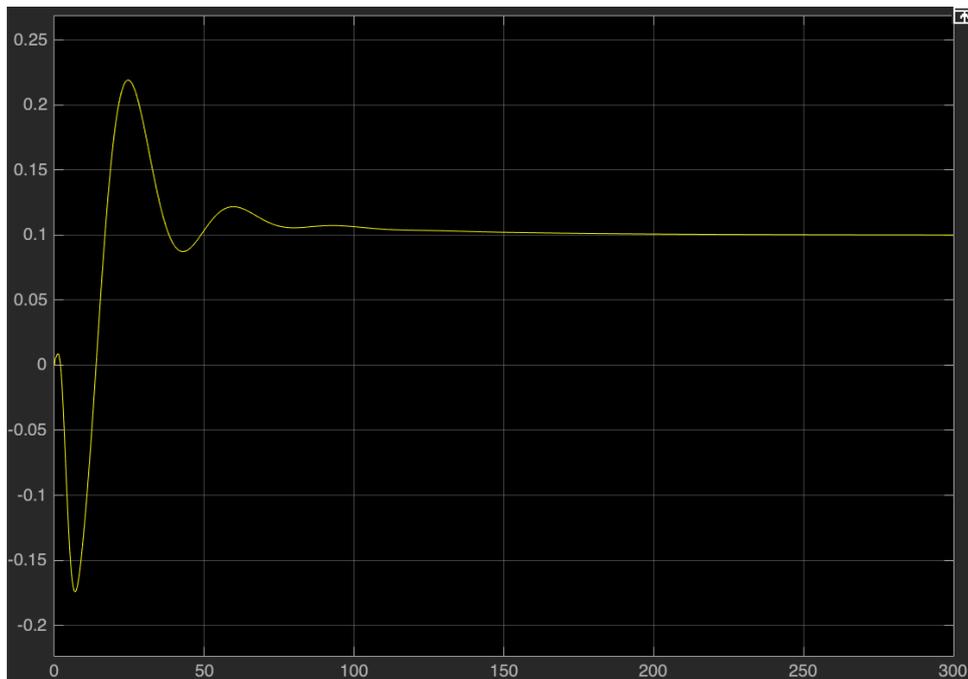
Tabela 16 – Alguns dos ganhos testados nos controladores.

Configuração	K_{p1}	K_{i1}	K_{d1}	K_{p2}	K_{i2}	K_{d2}
1	0,2613	0,0050	0,0793	5	1	16
2	0,1957	0,0011	0,0826	12	1,5	10
3	0,1846	0,0011	0,0247	15	1	20

Fonte: Autor (2022).

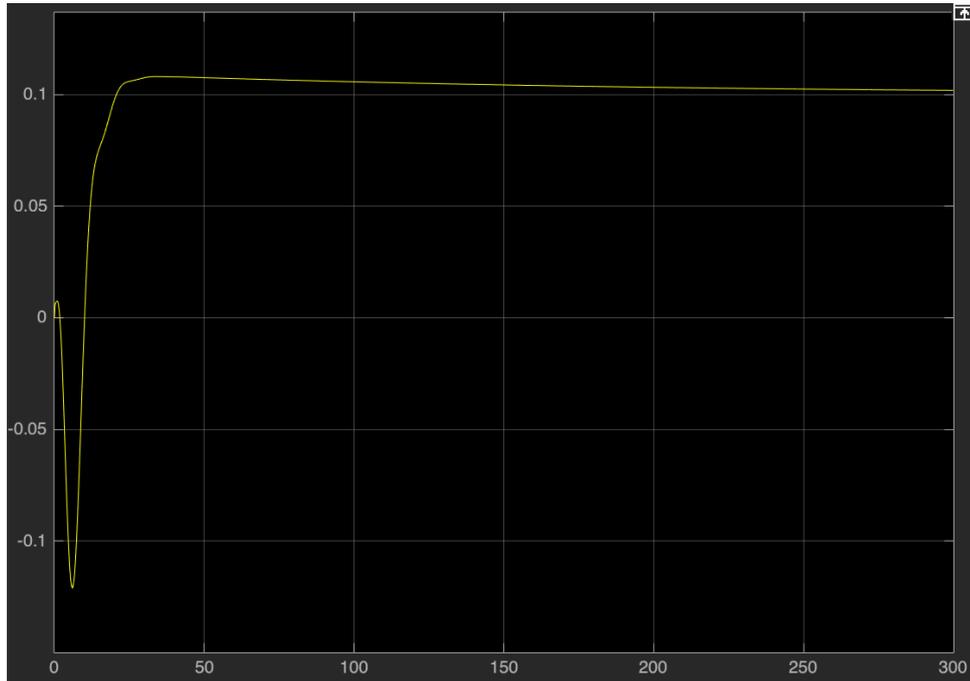
Observando a curva de resposta do distúrbio, que possui natureza instável - em formato de rampa decrescente, tendendo a valores infinitos negativos - seria possível cogitar que a sintonização dos controladores para obter um resultado sem oscilações seria extremamente difícil ou praticamente impossível. Pode-se visualizar nas Figuras 48, 49 e 50, a presença constante de ruído na resposta a uma entrada em degrau, causada pela presença do distúrbio.

Figura 48 – Curva de resposta do nível a um degrau para a configuração 1.



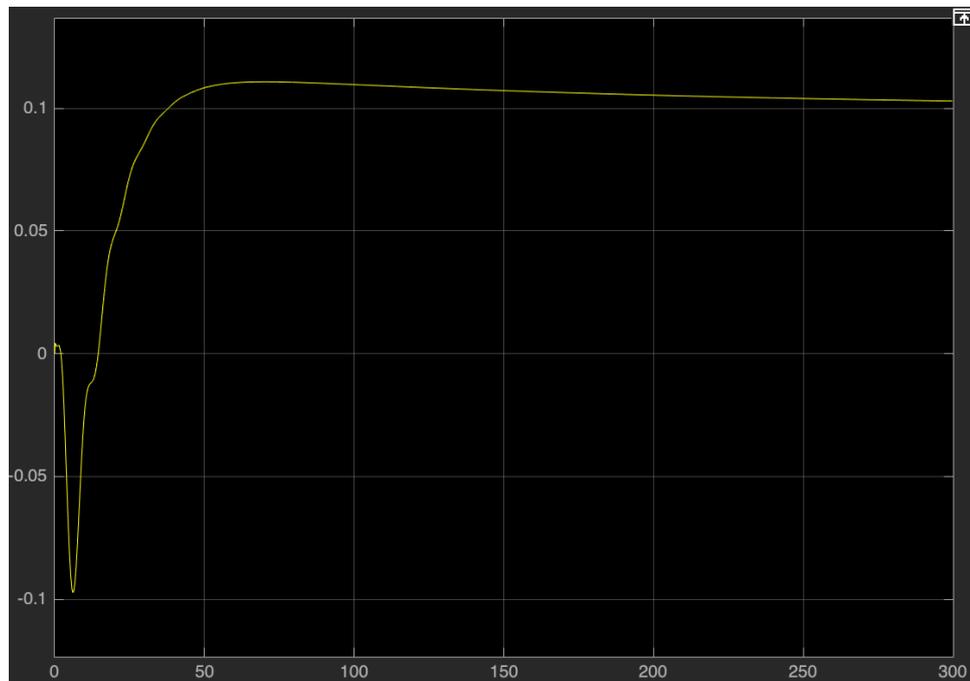
Fonte – Autor (2022).

Figura 49 – Curva de resposta do nível a um degrau para a configuração 2.



Fonte – Autor (2022).

Figura 50 – Curva de resposta do nível a um degrau para a configuração 3.



Fonte – Autor (2022).

É notório que, além do ruído presente, principalmente ao longo da curva da resposta transitória do nível, o sistema tornou-se consideravelmente mais lento. Apesar disso, do ponto de vista da engenharia de controle, as configurações expostas atingem a estabilidade em sua plenitude, entregando resultados que funcionam, apesar de não serem ideais para o processo - por sua parte transitória e por sua lentidão. Também vale notar que, para as configurações obtidas, nem o vale presente no início da curva e nem o máximo sobressinal ultrapassaram os limites da margem de segurança da flutuação do nível: entre -0,3 e 0,3. Então esse sistema promove um controle seguro do nível, apesar de não ser adequado.

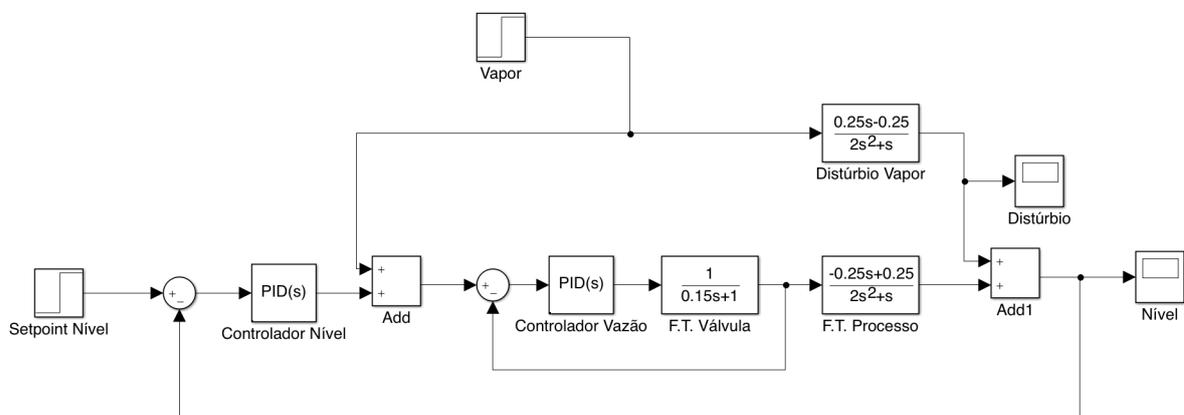
Isso mostra que, numa situação de controle a dois elementos, sendo os elementos de controle: o nível e a vazão de água, sempre existirá um ruído causado pelo distúrbio de vapor. Portanto, retornando aos valores dos ganhos obtidos para os controladores associados à válvula e ao nível para o caso sem a presença do distúrbio (Tabela 17) e, finalmente, adicionando o elemento de controle da vazão de vapor, é possível analisar novamente a curva de resposta do sistema a uma entrada em degrau 0,1 no *setpoint* do nível e uma entrada em degrau 0,5 no vapor. A malha utilizada no *Simulink* é a mesma vista ao fim do capítulo anterior deste estudo, na Figura 27. Para facilitar a visualização, a mesma é apresentada novamente na Figura 51.

Tabela 17 – Valores dos ganhos na configuração final dos controladores.

Ganhos	PID 1 - Válvula	PID 2 - Nível
K_p	2,75	1
K_i	2	0,001
K_d	0,01	1,4

Fonte: Autor (2022).

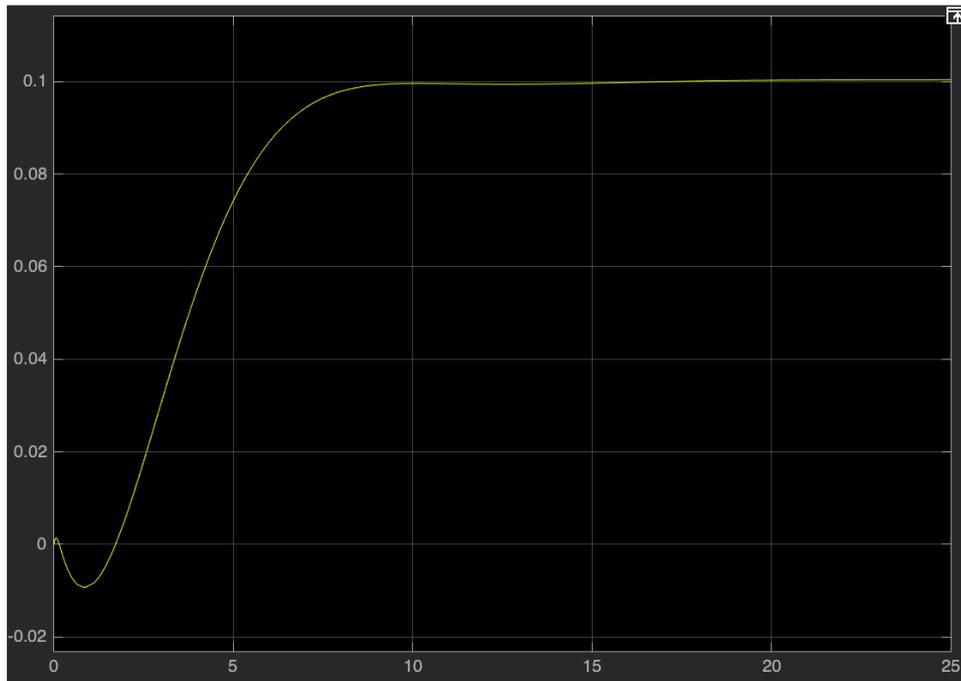
Figura 51 – Diagrama de blocos de controle de nível a 3 elementos de uma caldeira a vapor.



Fonte – Autor (2022).

Na Figura 52, têm-se a resposta do sistema de controle de nível - a uma entrada em degrau. O arranjo visto na Figura 51 é o que mais representa o que está presente em casos práticos de controle de nível - utilização de três elementos de controle e presença de distúrbios. A curva de resposta do nível obtida no *Simulink*, foi exportada para o *Workspace* do *MATLAB*.

Figura 52 – Curva de resposta do nível em sistema de controle a 3 elementos com distúrbio.

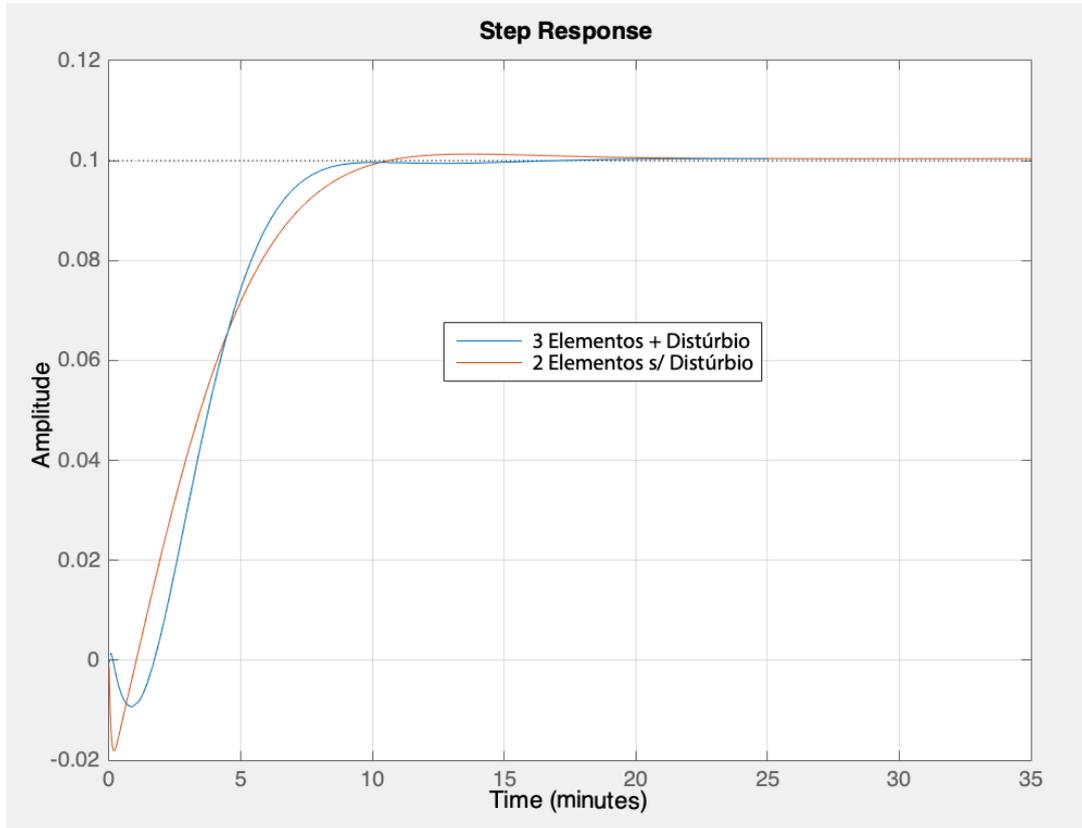


Fonte – Autor (2022).

A resposta obtida pôde ser comparada à curva de resposta do sistema a dois elementos e sem distúrbios, vista anteriormente na Figura 44. O comparativo, vide Figura 53, mostra que as curvas têm comportamentos similares, de forma geral. Houve uma pequena melhora no máximo sobressinal e no vale inicial. Com isso, nota-se que o método escolhido para realizar a sintonização dos PIDs, removendo a entrada de vapor e seus ramos associados e seus posteriores retornos, é efetivo e entregou os resultados esperados.

Portanto, em um sistema de controle de nível ideal, sem a presença de distúrbios causados pelo vapor, o sistema a dois elementos poderia ser suficiente, controlando o processo adequadamente. Em casos de simulações que buscam replicar o que ocorre de forma prática, o controle a dois elementos atende às expectativas em parte, visto que entrega uma resposta estacionária adequada, mas possui muitas oscilações na resposta transitória que, na prática, seriam fontes de prejuízo ao sistema. A inserção do terceiro elemento no sistema que replica casos práticos - com distúrbios - devolve a estabilidade encontrada no caso a dois elementos e sem distúrbio, obtendo uma resposta ainda melhor. Assim, nota-se a real necessidade de um controle a três elementos para a operação segura de uma caldeira, através da sua manutenção de nível.

Figura 53 – Comparativo dos sistemas controlados obtidos.



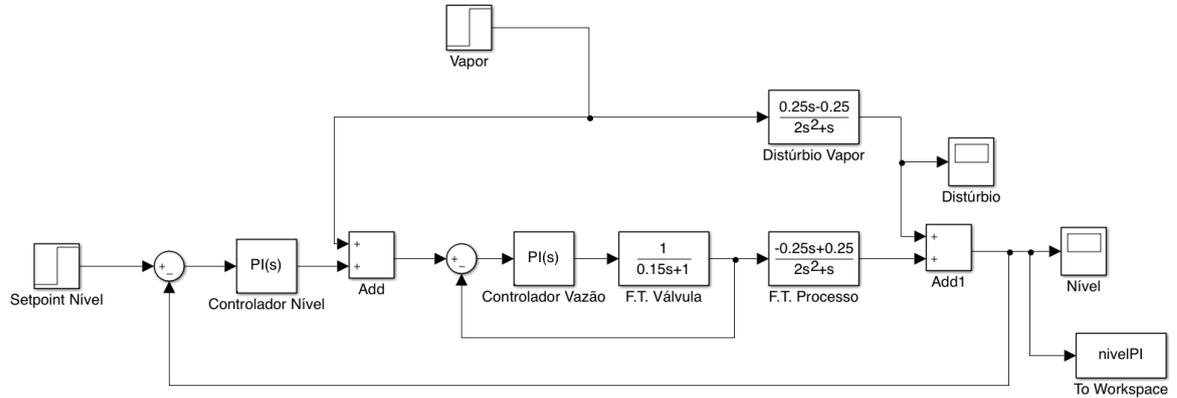
Fonte – Autor (2022).

Por fim, a título comparativo e também confirmativo da melhoria ocasionada pela mudança do sistema de controle de nível, o diagrama de blocos em sua forma integral - representando um sistema o mais próximo possível da realidade - terá sua resposta para um controle realizado com auxílio de controladores do tipo proporcional integral (PI) - como é realizado no sistema pneumático presente na Usina D'Pádua - comparada à resposta controlada por controladores do tipo PID. O *modus operandi* dos controlares será o mesmo, sendo posicionados da mesma forma, como é possível visualizar na Figura 54. Quanto aos valores para os fatores proporcional e integral dos controladores, foram mantidos, conforme a configuração anteriormente obtida, enquanto os fatores derivativos foram descartados.

As curvas de resposta do nível, estão dispostas na Figura 55, obtidas no *Simulink* e exportadas para o *Workspace* do *MATLAB*, onde a curva azul corresponde à resposta do nível com controladores PIDs e a laranja corresponde à resposta do nível com controladores PIs. De fato, é notória a importância e a necessidade da evolução de um sistema de controle PI para um PID. Quando observada a curva laranja, nota-se que ela assemelha-se bastante à resposta não controlada. E, ainda observando-a, é possível perceber que a resposta transitória não tem um comportamento adequado ao processo, a resposta estacionária responde de uma forma adequada,

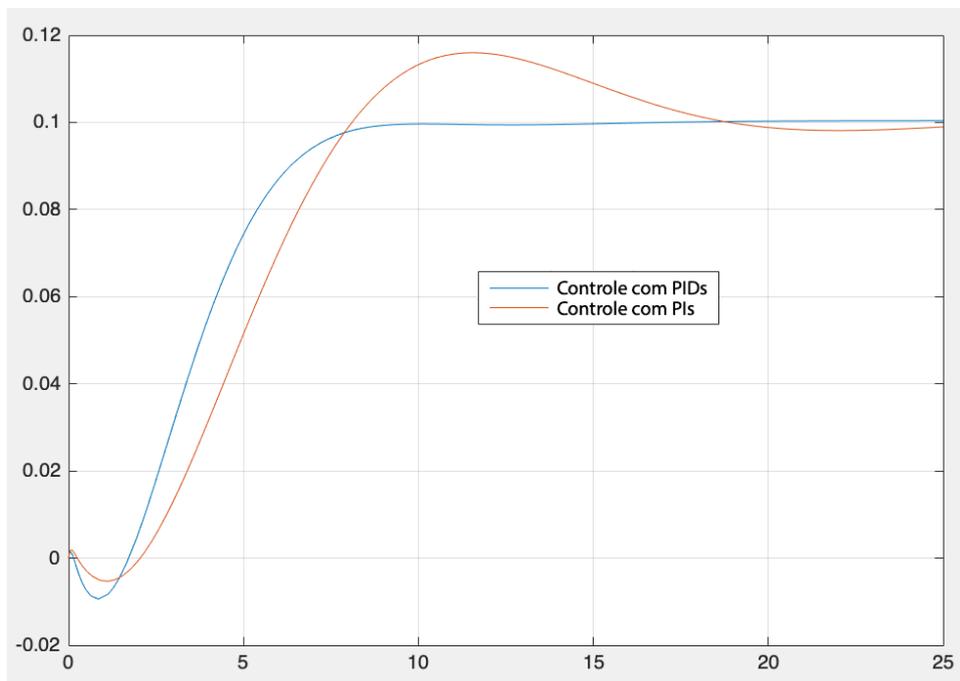
mas a curva de resposta é muito lenta. Assim, é evidente que o fator derivativo é mais do que importante para o funcionamento seguro de uma caldeira, é imprescindível.

Figura 54 – Malha de controle de nível a 3 elementos, com controladores PIs.



Fonte – Autor (2022).

Figura 55 – Comparativo das respostas do nível para controles PID x PI.



Fonte – Autor (2022).

5 CONCLUSÕES

Esta monografia é focada na apresentação e na análise de um sistema de controle de nível a três elementos, inserido na planta de uma caldeira a vapor, onde opera-se um sistema de controle pneumático. Análise esta, realizada com o intuito de estudar a implementação de um sistema de controle de nível elétrico. Foi possível estudar a importância do controle de nível de uma caldeira, além dos impactos causados por um nível mal controlado, sendo passível de fatalidades.

Foram vistos os tipos de arranjo para um sistema de controle de nível de uma caldeira: a um elemento, a dois elementos e a três elementos. Além disso, equipamentos necessários a uma possível aplicação prática para os parâmetros de operação caldeira - visto que este trabalho foi realizado com intuito de aprendizado - foram listados. Assim, caso haja o desejo de concretizar o projeto, será possível.

Destaca-se a sintonização dos controladores do sistema de controle de nível. O modelo proposto apresenta bons valores para todos os parâmetros de resposta: tempo de subida, tempo de acomodação, máximo sobressinal e erro estacionário. Além disso, o método escolhido para realizar a sintonização dos controladores envolvidos no processo, permitiu provar o quão prejudicada é a resposta - a uma entrada em degrau - da curva de nível do sistema a dois elementos, em comparação ao sistema a três elementos.

Foi possível notar que, em um sistema de controle de nível ideal - sem a presença de distúrbios de vapor - um sistema a dois elementos seria suficiente e poderia controlar o processo. Já quando esse sistema a dois elementos não é ideal - com a presença de distúrbios - o resultado obtido funciona, do ponto de vista da engenharia de controle, já que atinge a estabilidade em sua forma plena, sem erro. Porém, em simulações que buscam replicar o que ocorre de forma prática, o controle a dois elementos atende ao sistema em parte. Como foi visto, mesmo tendo uma resposta estacionária adequada, essa configuração conta com a presença constante de distúrbios na resposta transitória, que, na prática, pode acarretar em prejuízos ao processo.

Assim, foi possível notar e provar que o uso de um sistema de controle a três elementos, em uma simulação que tenta aproximar-se ao máximo da situação real - incluindo a presença de perturbações causadas pela linha de vapor - é o mais adequado e permite o melhor controle, tratando tanto da resposta transitória quanto da estacionária. Com esse controle do nível, é possível garantir a operação segura da caldeira, quando essa segurança é baseada na manutenção do nível - visto que também existem outros fatores, que não cabem ser citados neste estudo.

Por fim, como os sistemas de controle de nível presentes nas caldeiras da Usina D'Pádua funcionam com controladores PIs, foi possível analisar o comportamento do nível, para uma situação onde o sistema de controle simulado utilizasse de controladores PIs. De fato, conforme

esperado, a resposta não foi adequada ao sistema, sendo lenta e com a presença de sobressinal. Provou-se que os controladores PIDs promovem uma melhora significativa ao processo. A melhoria citada, que pode ser obtida através da mudança da tecnologia pneumática - com controladores PIs - para uma tecnologia elétrica - com controladores PIDs - além de todas as outras melhorias citadas ao longo deste estudo, servem de incentivo para uma modernização do sistema de controle presente na Usina D'Ádua.

O auxílio computacional através do uso de linhas de código elaboradas no *MATLAB* ou de um diagrama de blocos no *Simulink*, permitiu realizar trocas rápidas nos valores dos ganhos dos controladores o que, não necessariamente, quer dizer que a sintonização foi um processo extremamente simples, especialmente com funções que possuem predisposição a tornarem-se instáveis, como a função de transferência do processo.

Uma proposta para o futuro seria a implementação de um novo sistema de controle de nível, com controladores do tipo PID, conforme foi visto que são necessários, sob a supervisão de um profissional da área. Na prática, as sintonizações seriam realizadas diretamente, de forma empírica. Evidentemente, os valores obtidos nesse estudo não poderiam ser utilizados como ponto de partida, já que o modelo - as funções de transferência utilizadas - não corresponde ao modelo real da caldeira em questão.

REFERÊNCIAS

- AGRO, C. **PIB do agronegócio: quais são as previsões para 2022?** 2022. <<https://summitagro.estadao.com.br/noticias-do-campo/pib-do-agronegocio-quais-sao-as-previsoes-para-2022/>>. Acessado em: 21 de fevereiro de 2022. Citado na página 15.
- BARBOSA, A.; SILVA, E.; GÓMEZ, E. **Biomassa para energia**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Unicamp, 2008. Citado na página 15.
- BEQUETTE, B. W. **Process Control: Modeling, design, and simulation**. 1st. Upper Saddle River, N.J: Pearson Prentice Hall, 2002. Citado na página 43.
- CEZAR, P. **Controladores PID**. 2016. <<https://smarti.blog.br/controladores-pid/>>. Acessado em: 25 de agosto de 2021. Citado na página 35.
- CNA, C. da Agricultura e Pecuária do B. **PIB do Agronegócio alcança participação de 26,6% no PIB brasileiro em 2020**. 2021. <<https://www.cnabrazil.org.br/boletins/pib-do-agronegocio-alcanca-participacao-de-26-6-no-pib-brasileiro-em-2020>>. Acessado em: 20 de fevereiro de 2022. Citado na página 15.
- DIGIMAT. **Orifice Plates**. 2022. <<https://www.digimat.com.br/en/produto/placas-de-orificio/>>. Acessado em: 02 de março de 2022. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- ELECTRIC, S. **Boiler Drum Level Control**. 2021. <<https://www.eurotherm.com/process-control-applications/boiler-drum-level-control/>>. Acessado em: 31 de outubro de 2021. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 23.
- HALIHAL, A. F. Modeling and control of water level in boiler drum for nassiriyah thermal power plant. **Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering**, Iran University of Science and Technology, v. 15, n. 2, jun. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.22068/IJEEE.15.2.229>>. Citado na página 15.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 9ª. Rio de Janeiro: LTC, 2012. Citado na página 28.
- HITER. **Série 85 - Duas Vias**. 2020. <<https://www.hiter.com.br/produtos/serie-85-duas-vias/>>. Acessado em: 17 de março de 2022. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- IPCOS. **Boiler Steam Drum Level Control Strategies**. 2021. <<https://blog.incatools.com/steam-boiler-drum-level-control>>. Acessado em: 15 de março de 2022. Citado na página 24.
- LINCE. **Medição de Nível em caldeiras vai além da necessidade, é uma obrigação**. 2019. <<https://instrumentacaoecontrole.com.br/medicao-de-nivel-em-caldeiras-vai-alem-da-necessidade-e-uma-obrigacao/>>. Acessado em: 17 de março de 2022. Citado na página 30.
- MARTINELLI, L. C. **Geradores de Vapor**. s.d. <<https://docplayer.com.br/506344-Geradores-de-vapor-luiz-carlos-martinelli-jr-prof-unijui-campus-panambi.html>>. Acessado em: 25 de agosto de 2021. Citado na página 20.
- MENG, F. et al. Fuzzy control and simulation of boiler drum water level. **MATEC Web of Conferences**, EDP Sciences, v. 309, p. 05003, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/mateconf/202030905003>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 20.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO DO BRASIL. **Norma Regulamentadora NR-13**: Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento. Brasília, 2019. Citado na página 18.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 6^a. Rio de Janeiro: LTC, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 36.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5^a. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 33, 36, 44 e 52.

SARCO, S. **Level Controls**. 2020. <<https://www.spiraxsarco.com/global/en-GB/products/boiler-controls-and-systems/level-controls>>. Acessado em: 17 de março de 2022. Citado na página 25.

SARCO, S. **The Boiler House: Water-tube boilers**. 2021. <<https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/the-boiler-house/introduction#article-top>>. Acessado em: 5 de novembro de 2021. Citado 5 vezes nas páginas 19, 27, 28, 29 e 30.

SCHNEIDER, F. S. **Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos**: Apostila da disciplina de medições térmicas, engenharia mecânica. Porto Alegre: UFRGS, 2007. Citado na página 31.

TORREIA, R. P. **Fluidos Térmicos**: Água, vapor, óleos térmicos. 1^a. São Paulo: Hemus, 2001. Citado na página 19.

YOKOGAWA. **Digital vs. Pneumatic Control**. 2014. <<https://www.cnabrazil.org.br/boletins/pib-do-agronegocio-alcanca-participacao-de-26-6-no-pib-brasileiro-em-2020>>. Acessado em: 17 de fevereiro de 2022. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 39.

ZANG, H.; WANG, L.; YU, X. Fuzzy controller of drum water level for industrial boiler. In: **2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering**. IEEE, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/cmce.2010.5610298>>. Citado na página 20.

ZHOU, L.; SUN, X. The study of boiler control system of water level of steam drum based on new immune PID controller. In: **2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation**. IEEE, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/icdma.2011.328>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 20.

APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE UTILIZADO NO MATLAB

```

%% PRIMEIRA TENTATIVA PID1
% Gvalv = F.T. da valvula
% Gc1 = F.T. do PID associado a valvula
% Gcv = F.T. do conjunto da valvula (PID + valvula)
% Valores escolhidos
% K = 0.625
% a = 3.5
% Valores de K e a para teste
K = [0.05 0.1 0.125 0.375 0.5 0.625];
a = [0.5 1.5 2 2.5 3 3.5];
% Avalia a resposta ao degrau unitario em malha fechada em cada combinacao
% de 'K' e 'a' que fara o maximo sobressinal ser menor que 10%
t = 0:0.01:10;
Gvalv = tf([1],[0.15 1]);
k = 0;
for i = 1:6;
    for j = 1:6;
        Gc1 = tf(K(i)*[1 2*a(j) a(j)^2], [1 0]);
        Gcv = Gc1*Gvalv; % F.T. em malha aberta
        GcvMF = Gc1*Gvalv/(1 + Gc1*Gvalv); % F.T. em malha fechada
        y = step(GcvMF,t);
        m = max(y);
        if m < 1.10
            k = k+1;
            solution(k,:) = [K(i) a(j) m];
        end
    end
end

solution

sortsolution = sortrows(solution,3)

% Gera o grafico da resposta com o maior sobressinal que e menor que 10%
K = sortsolution(k,1)
a = sortsolution(k,2)

Gc1 = tf(K*[1 2*a a^2], [1 0]);
Gcv = Gc1*Gvalv
GcvMF = feedback(Gc1*Gvalv,1);
step(GcvMF,t)
Kp = 2*K*a
Ki = K*a^2
Kd = K

%% SEGUNDA TENTATIVA PID1
%Novos valores 1
% Kp = 5; Ki = 40; Kd = 0;
Gc1 = tf([5 40],[1 0])
Gcv = Gc1*Gvalv
GcvMF = feedback(Gcv,1)
step(GcvMF,t)

```

```

%% SISTEMA REDUZIDO A UM UNICO BLOCO
%Simplificacao do D.B. a 2 Elementos
% Gproc = F.T. do processo
Gproc = tf([-0.25 0.25],[2 1 0])
% Gred = F.T. do sistema a 2 el. reduzida a um unico bloco
Gred = GcvMF*Gproc

%Funcao em Malha Fechada Gred(s)
GredMF = feedback(Gred,1)
%Polos de GredMF(s)
polos = pole(GredMF)
%Zeros de GredMF(s)
zeros = zero(GredMF)
%Lugar das raizes
rlocus(Gred);
axis([-30 30 -2 2]);
%Resposta a uma entrada degrau unitario
step(GredMF)

%% PID2 GENERICO
% Gc2 = F.T. do PID associado ao nivel
% Grc = F.T. do sistema reduzido controlado
Kp2 = ; %Inserir valor de Kp2
Ki2 = ; %Inserir valor de Ki2
Kd2 = ; %Inserir valor de Kd2
Gc2 = tf([Kd2 Kp2 Ki2],[1 0]);
Grc = Gc2*Gred;
GrcMF = feedback(Grc,1);
figure;
step(GrcMF)

%% VOLTA AO PID1 PARA TENTAR OBTER UM MELHOR LDR PARA Gred(s)
%% PRIMEIRA TENTATIVA
t = 0:0.01:5;
Gvalv = tf([1],[0.15 1]);

%PID1 GENERICO
Kp1 = ; %Inserir valor de Kp1
Ki1 = ; %Inserir valor de Ki1
Kd1 = ; %Inserir valor de Kd1
Gc1 = tf([Kd1 Kp1 Ki1],[1 0]);
Gcv = Gc1*Gvalv;
GcvMF = feedback(Gcv,1);
figure;
step(GcvMF);

%Valores escolhidos do teste anterior
Kp = 2; Ki = 14; Kd = 0;
Gc1 = tf([Kd Kp Ki],[1 0]);
Gcv = Gc1*Gvalv;
GcvMF = feedback(Gcv,1);
figure;
step(GcvMF);
%Teste LDR
Gproc = tf([-0.25 0.25],[2 1 0]);
Gred = GcvMF*Gproc;
figure;
rlocus(Gred);
%Nao houve melhora significativa no LDR
%Porem segue a tentativa do controlador 2

```

```

%Resultados obtidos para o controlador 2
Kp2 = ; %Inserir valor de Kp2
Ki2 = ; %Inserir valor de Ki2
Kd2 = ; %Inserir valor de Kd2
Gc2 = tf([Kd2 Kp2 Ki2],[1 0]);
Grc = Gc2*Gred;
GrcMF = feedback(Grc,1);
figure;
step(GrcMF)
%Controlador 2
% Kp = 2.5; Ki = 0.2; Kd = 4; < "melhor" resultado
%Nenhuma resposta foi 100% satisfatoria, voltemos ao controlador 1

%% SEGUNDA TENTATIVA
%% CALCULOS PID1 E PID2 – MELHORES VALORES
%PID1
Gvalv = tf([1],[0.15 1]);
Kp1 = 2.75;
Ki1 = 22;
Kd1 = 0.01;
Gc1 = tf([Kd1 Kp1 Ki1],[1 0]);
Gcv = Gc1*Gvalv;
GcvMF = feedback(Gcv,1);
Gproc = tf([-0.25 0.25],[2 1 0]);
Gred = GcvMF*Gproc;
figure;
rlocus(Gred);
GredMF = feedback(Gred,1);
figure;
step(GredMF);
%PID2
Kp2 = 1;
Ki2 = 0.001;
Kd2 = 1.4;
Gc2 = tf([Kd2 Kp2 Ki2],[1 0]);
Grc = Gc2*Gred;
GrcMF = feedback(Grc,1);
figure;
step(GrcMF);

%Comparacao do controlador da valvula
GvalvMF = feedback(Gvalv,1);
figure;
step(GvalvMF);
hold on;
step(GcvMF);

%Margens de estabilidade do sistema
[Gm,Pm,Wcg,Wcp] = margin(Grc);
GmdB = 20*log10(Gm);
[GmdB Pm Wcg Wcp]

%Comparacao 2 elementos s. disturbio x 3 elementos c. disturbio
%Nivel = Curva de resposta do nivel importada do Simulink
step(GcvMF);
hold on;
step(Nivel);

```