

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

JADY CARDONA PERES

**IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE DE TRÊS ELEMENTOS PARA CONTROLE DE
BALÃO DE VAPOR DE CALDEIRA AQUATUBULAR**

Ilha Solteira

2023



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

JADY CARDONA PERES

**IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE DE TRÊS ELEMENTOS PARA CONTROLE DE
BALÃO DE VAPOR DE CALDEIRA AQUATUBULAR**

Trabalho de Graduação apresentado à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" câmpus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira

Ilha Solteira

2023

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P437i Peres, Jady Cardona.
Implementação de controle de três elementos para controle de balão de vapor de caldeira aquatubular / Jady Cardona Peres. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
75 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira

Inclui bibliografia

1. Tubulão de vapor. 2. Identificação de sistemas. 3. Controlador Pid.


Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Setor Técnico de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos trinta dias do mês de junho do ano de dois mil e três, a discente Jady Cardona Peres matriculada sob o nº 151051232, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira, o Prof. Dr. Carlos Antonio Alves e o Dr. Igor Thiago Minari Ramos apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Implementação de controle de três elementos para controle de balão de vapor de caldeira aquatubular" obtendo a nota 10,0 (DEZ INTEIROS) e conceito APROVADO.


 Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira
 - orientador -


 Jady Cardona Peres
 - discente -



Prof. Dr. Carlos Antonio Alves

- Membro da Banca -



Dr. Igor Thiago Minari Ramos

- Membro da Banca -

Para as minhas avós, que não estão aqui, mas estão comigo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus irmãos, Pedro Henrique e Ana Julia, pelos anos de confidencialidade, amizade, joguinhos em *co-op* e piadas internas.

Aos meus pais, Edson e Luciana, que me apoiaram em tudo e acreditaram em mim.

Aos meus amigos da universidade que estiveram comigo desde o início, Jhimmy e Dener, por estarem do meu lado nas ideias certas e nas erradas (com um tom de julgamento, mas do meu lado!). Aos meus amigos de universidade que vieram depois, mas que são tão importantes quanto, Caio, Mimado, Azeite, Smeagol, Lorulia, por aguentarem piadinhas sem graça e minhas músicas de gosto duvidoso.

Ao prof. Igor Thiago Minari Ramos, pelo suporte durante toda a caminhada desse projeto e de outros, por ter me ajudado a não desistir, por oferecer não só a sua opinião técnica mas um ombro amigo. Obrigada por tudo.

Ao meu orientador, Prof. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira, pela gentileza e paciência que você teve comigo desde o princípio. Espero que o senhor veja sempre a vida com essa leveza, e espero um dia vê-la assim também.

A todos os animais de estimação que tive, por serem um conforto constante na minha jornada, em especial aos meus dois anjinhos, Pipico e Nigel.

"In the beginning the Universe was created. This has made a lot of people very angry and been widely regarded as a bad move"
The Hitchhiker's Guide to the Galaxy

RESUMO

O trabalho propõe identificar um sistema real de um controle de nível de um balão de vapor de caldeira aquatubular. Por se tratar de um sistema complexo, utilizou-se a modelagem tipo caixa-preta para a identificação, obtendo um sistema com correspondência aos dados reais de 75,89%. Para isto, foram utilizadas ferramentas de aquisição de dados, como *PI System* aliado ao suplemento *PI Datalink*, e ferramentas de identificação presentes na *toolbox System Identification* do software MATLAB®. Foram então projetados novos controladores para este sistema utilizando como critérios de controle margem de ganho, margem de fase, taxa de amortecimento e porcentagem de *overshoot*, empregados na *toolbox Control System Tuner* e simulados em ambiente MATLAB® *Simulink*™. A abordagem de controle proposta neste trabalho aplica um modelo amplamente aplicado neste processo, o controle de três elementos, onde é utilizado dois controladores PID em cascata, levando-se em consideração a medição de nível do tubulão da caldeira, a vazão de água de entrada e a vazão de vapor de saída, que, como amplamente retratado na literatura, obtém um controle de nível mais preciso e estável, por prever oscilações na demanda de vapor antes que o nível do balão seja afetado. Os resultados obtidos demonstram a usabilidade das ferramentas empregadas, assim como a eficiência do controlador de três elementos para estabilidade de nível de água no tubulão de vapor.

Palavras-chave: Tubulão de vapor; Identificação de Sistemas; Controlador PID

ABSTRACT

This work proposes to identify a real system present in the level control of a watertube boiler steam drum. As it is a complex system, black-box modeling was used for identification, obtaining a system corresponding to real data of 75.89%. For this, data acquisition tools were used, such as *PI System* allied to the *PI Datalink* supplement, and identification tools presented in MATLAB®'s *System Identification toolbox*. New controllers were then designed for this system using as control criteria gain margin, phase margin, damping rate and overshoot percentage, applied in the *toolbox Control System Tuner* and simulated in a MATLAB® *Simulink*TM environment. The control approach proposed in this work is a model widely applied in this process, the three-element control, where two PID controllers are used in cascade, taking into account the measurement of the boiler steam drum level, the inlet water flow and the output steam flow, which, as extensively portrayed in the literature, obtains a more accurate and stable level control, by predicting oscillations in the steam demand before the drum level is affected. The results obtained demonstrate the usability of the tools employed, as well as the efficiency of the three-element controller for water level stability in the steam drum.

Keywords: Steam drum; System identification; PID Controller

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de blocos para sistema em malha aberta	15
Figura 2 – Diagrama de blocos para sistema em malha fechada	15
Figura 3 – Região de estabilidade (destacada em azul) para os planos de (A) s e (B) Z	16
Figura 4 – Diagramas de bode para a função de transferência 6	19
Figura 5 – Diagramas de bode para a função de transferência 14	19
Figura 6 – Saída de sistema para diferentes valores de ζ	20
Figura 7 – Resposta ao degrau para sistema subamortecio	21
Figura 8 – Caldeira desenvolvida pela empresa brasileira Danpower	22
Figura 9 – Desenho esquemático de uma caldeira aquatubular	23
Figura 10 – Balão de vapor de 30m a ser instalado em uma fábrica de celulose	25
Figura 11 – Caminhão transportando balões pré-montados de uma caldeira aquatubular	25
Figura 12 – Sopradores para caldeira modelo (A) retrátil e (B) fixo	26
Figura 13 – Lavador de gases instalado em conjunto com um exaustor	27
Figura 14 – Desaerador tipo Spray-Tray e reservatório	28
Figura 15 – Sinal analógico Hart	30
Figura 16 – Flutuador tipo magnético	31
Figura 17 – Sensores de pressão da série Siemens SITRANS P320/420	32
Figura 18 – Representação da instalação de dois transmissores de nível tipo radar	33
Figura 19 – Representação da instalação de dois transmissores de nível tipo ultrassônico	34
Figura 20 – Representação da instalação de um transmissor radioativo	35
Figura 21 – Sensores tipo RTD da Emerson-Rosemount	37
Figura 22 – Transmissores de vazão por pressão diferencial da ABB	38
Figura 23 – Transmissor de vazão magnético da fabricante Endress+Hauser	39
Figura 24 – Transmissor de vazão tipo Coriolis da fabricante Emerson	39
Figura 25 – Transmissor de vazão tipo <i>Vortex</i> da fabricante Endress+Hauser	40
Figura 26 – Chave do tipo capacitiva da fabricante Emerson-Rosemount	41
Figura 27 – Esquema de instalação de uma chave de nível tipo vibratória	42
Figura 28 – Diagrama de uma conexão de sistema SCADA	43
Figura 29 – Diagrama de controle de um elemento	45
Figura 30 – Diagrama de controle de três elementos	46
Figura 31 – Diagrama de blocos de controle de três elementos	46
Figura 32 – Dados reais medidos e coletados utilizando a interface PI	48
Figura 33 – Análise dos dados para $t = [1800,2300]$	48
Figura 34 – Ferramenta <i>System Identification</i>	49
Figura 35 – Comparação entre dados medidos e estimados do sistema	50
Figura 36 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado em malha aberta	51

Figura 37 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado em malha aberta	51
Figura 38 – Resposta ao degrau do sistema identificado em malha aberta	52
Figura 39 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado em malha fechada	52
Figura 40 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado em malha fechada	53
Figura 41 – Diagramas de Bode do sistema identificado em malha fechada	53
Figura 42 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado para o primeiro controlador	56
Figura 43 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado para o primeiro controlador	57
Figura 44 – Resposta ao degrau do sistema identificado para o primeiro controlador	57
Figura 45 – Diagramas de Bode do sistema identificado para o primeiro controlador	58
Figura 46 – Diagrama de blocos desenvolvido na plataforma <i>Simulink</i> TM	58
Figura 47 – Resposta do primeiro controlador	59
Figura 48 – Comparação entre sistema real e simulado - Primeiro controlador	59
Figura 49 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado para o segundo controlador	60
Figura 50 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado para o segundo controlador	61
Figura 51 – Resposta ao degrau do sistema identificado para o segundo controlador	61
Figura 52 – Diagramas de Bode do sistema identificado para o segundo controlador	62
Figura 53 – Resposta do segundo controlador	63
Figura 54 – Comparação da resposta entre o primeiro e segundo controladores	63
Figura 55 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado para o terceiro controlador	64
Figura 56 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado para o terceiro controlador	65
Figura 57 – Resposta ao degrau do sistema identificado para o terceiro controlador	65
Figura 58 – Diagramas de Bode do sistema identificado para o terceiro controlador	66
Figura 59 – Resposta do terceiro controlador	66
Figura 60 – Comparação da resposta entre o segundo e terceiro controladores	67
Figura 61 – Comparação entre sistema real e simulado - Terceiro controlador	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controlador lógico programável
FIC	<i>Flow Indicator Controlador</i> : Controlador Indicador de Vazão, é a nomenclatura para malhas de controle que visam controlar a vazão de um determinado ponto do processo.
FIT	<i>Flow Indicator Transmitter</i> : Transmissor Indicador de Vazão
FSK	<i>Frequency Shift-keying</i> : Chaveamento de frequência
GLP	Gás liquefeito de petróleo
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i> : Via de Dados Endereçável por Transdutor Remoto
LIC	<i>Level Indicator Controlador</i> : Controlador Indicador de Nível, é a nomenclatura para malhas de controle que visam controlar o nível em um determinado ponto do processo.
LIT	<i>Level Indicator Transmitter</i> : Transmissor Indicador de Nível
MV	<i>Manipulated Variable</i> : Variável manipulada ou variável de controle
OPC	<i>Open Platform Communication</i> : Comunicação de Plataforma Aberta
PID	Proporcional Integral Derivativo
PV	<i>Process Variable</i> : Variável de processo
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i> : Termorresistência
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> : Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados
SP	<i>Setpoint</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 <i>Objetivo</i>	12
1.2 <i>Estrutura do trabalho</i>	13
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	14
2.1 <i>Sistemas de controle e estabilidade</i>	14
2.2 <i>Controlador PID</i>	16
2.3 <i>Diagramas de Bode, Margens de Ganho e de Fase</i>	17
2.4 <i>Taxa de amortecimento</i>	20
2.5 <i>Overshoot</i>	21
3 SISTEMA E COMPONENTES	22
3.1 <i>Geração de vapor em complexos industriais</i>	22
3.2 <i>Funcionamento de uma caldeira aquatubular</i>	23
3.3 <i>Componentes da caldeira</i>	24
3.4 <i>Instrumentação</i>	29
3.4.1 <i>Nível</i>	30
3.4.2 <i>Pressão</i>	35
3.4.3 <i>Temperatura</i>	36
3.4.4 <i>Vazão</i>	36
3.4.5 <i>Chaves de nível</i>	40
3.5 <i>Sistemas de aquisição e monitoramento de dados</i>	43
3.5.1 <i>SCADA</i>	43
3.5.2 <i>PI System</i>	44
3.5.3 <i>Controle de Três Elementos</i>	44
4 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA	47
4.1 <i>Coleta de dados</i>	47
4.2 <i>Identificação do sistema</i>	49
4.3 <i>Primeiro critério: Ganhos de margem e fase</i>	52
4.4 <i>Segundo critério: Taxa de amortecimento</i>	59
4.5 <i>Terceiro critério: Porcentagem de Overshoot</i>	62
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.1 <i>Perspectivas futuras e contribuições</i>	69
Referências	70

1 INTRODUÇÃO

Existem diversos relatos históricos de mecanismos e sistemas que podem ser considerados como predecessores da automação e controle industrial. Inicialmente, a automação industrial foi desenvolvida e aplicada com o objetivo de redução de custos (GUTIERREZ; PAN, 2008), mas com a evolução das técnicas e metodologias de controle, ficou claro sua importância na confiabilidade de processos, qualidade de produto e ganhos em segurança.

Um desses relatos históricos é a clepsidra (ou relógio de água), considerado um dos exemplos mais antigos de controle via *feedback* (BENNETT, 1996), atribuída a Ctesíbio de Alexandria em 250 a.C. Esse relógio de água utilizava um flutuador, mantendo constante o nível de água em um reservatório e permitindo um fluxo também constante de água, garantindo uma medição mais precisa da passagem do tempo.

Outro exemplo, mais recente, é uma fornalha para aquecimento de uma incubadora, desenvolvida por Cornelius Drebbel em 1620, descrita por Franklin et al. (2002). Drebbel aplicou uma espécie de sensor utilizando álcool e mercúrio dentro de um recipiente de vidro, interligado a um *dampner* que permite a entrada de maior ou menor fluxo de ar, aquecendo ou esfriando a incubadora de acordo com a temperatura detectada pelo sensor.

Desde então, engenheiros e matemáticos têm aplicado esforços para obter processos cada vez mais automatizados. Os controladores PID, por exemplo, foram desenvolvidos ao longo da década de 1920 mas consolidados nas indústrias por volta de 1940, segundo Bennett (2001). Esses controladores se tornaram a tecnologia mais amplamente utilizada nas indústrias (JOHNSON; MORADI, 2005), devido a facilidade de uso e ampla aplicabilidade (JOHNSON; MORADI, 2005). Knospe (2006) aponta alguns motivos pelos quais esse controlador é tão popular, sendo o principal deles é que os três termos que compõem um controlador PID são muito intuitivos, de forma que não é necessário um especialista para entender como cada ganho afetará o sistema.

No entanto, devido ao esforço matemático necessário para escolher adequadamente os parâmetros de um controlador PID, em ambientes industriais é frequente a utilização do método de tentativa e erro para encontrar ganhos satisfatórios para cada um dos componentes do controlador (ZHANG, 2010). Isso acarreta diretamente na não otimização do controlador, podendo gerar desperdícios de produto, aumentar o tempo de produção ou afetar a segurança do processo.

Para alguns casos, no entanto, o controle do sistema precisa ser preciso e otimizado. Uma aplicação existente em indústrias de diversos segmentos é o controle de nível do balão em caldeiras aquatubulares. Esse sistema é crítico por diversos motivos - abordados em Rajkumar, Priyaa e Gobi (2013), Zhou e Sun (2011): caso o nível de água se torne muito baixo, o balão

passará a ser superaquecido acima das temperaturas de projeto, podendo causar danos à estrutura da caldeira. Além disso, o nível baixo diminui o efeito de passivação - uma camada protetora gerada por adição de químicos na água utilizada para alimentação do balão e que protege os componentes do sistema contra efeitos adversos como corrosão. Por outro lado, caso o nível de água fique muito elevado, há a possibilidade de arraste de água para a saída de vapor, gerando vapor de baixa qualidade e danificando componentes do sistema, afetando processos produtivos e gerando altos custos de manutenção para os componentes danificados.

No entanto, para a otimização do controlador, principalmente em sistemas de maior complexidade, é necessário obter um modelo matemático do sistema (JOHNSON; MORADI, 2005). O modelo proporciona uma análise mais profunda de critérios como estabilidade, erro em regime permanente, taxas de decaimento, entre outros. Idealmente, a obtenção desse modelo é feita pelas leis físicas que descrevem esse sistema e exige um extenso conhecimento do sistema a ser modelado. Esse tipo de modelagem, conforme definido em Aguirre (2014) é chamado de modelagem caixa branca.

Infelizmente, raramente um processo industrial será simples o suficiente para ser definido pela modelagem caixa branca. Devido a isso, pesquisadores da área de identificação de sistemas buscam alternativas para a modelagem caixa branca, onde pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema é exigido para a definição do modelo adequado. A esse tipo de modelagem é dado o nome modelagem caixa preta, onde são utilizadas técnicas que em geral empregam apenas dados na tentativa de obter uma correlação entre entradas e saídas do sistema.

No presente trabalho a modelagem caixa preta será utilizada para identificar, através do software MATLAB® e dados reais de uma caldeira aquatubular, o modelo matemático do balão da caldeira. A partir da modelagem da planta, serão projetados controladores que respeitem determinados critérios de controle, como estabilidade e porcentagem máxima de *overshoot*.

Além disso, o controlador proposto busca minimizar o efeito de distúrbios no sistema (principalmente variações de demanda de vapor que causam flutuações no nível do balão), e portanto utilizará controle de três elementos, como visto em Rajkumar, Priyaa e Gobi (2013), Chew et al. (2017), que é composto de dois controladores PID em cascata e pode reduzir os efeitos dos distúrbios no sistema (WU et al., 2010).

1.1 Objetivo

O trabalho tem por objetivo conectar conhecimentos obtidos durante a graduação em teoria de controle e situações reais vivenciadas por engenheiros no mercado de trabalho. Para isso, será analisado como parâmetros normalmente não considerados durante o estudo conceitual (como distúrbios externos) afetam a malha de controle e como ferramentas digitais podem auxiliar na mitigação desses efeitos.

1.2 Estrutura do trabalho

Os dados utilizados para identificação e simulação do sistema foram coletados de uma caldeira de alta pressão instalada em uma unidade fabril de moagem de soja e produção de biodiesel. Esses dados foram coletados através do PI System, de propriedade da OSISoft, especificamente com o auxílio da interface PI DataLink, um suplemento do Microsoft Excel.

Em posse destes dados, o sistema foi identificado com o uso da *System Identification Toolbox* do MATLAB®. O controlador foi projetado através da *toolbox Control System Tuner* e simulado em ambiente MATLAB® *Simulink*™.

Todas as ferramentas e metodologias utilizadas estão descritas ao longo dos cinco capítulos do trabalho, organizados da seguinte forma:

- Capítulo 1: Traz um breve contexto histórico do uso de controladores PID na indústria e quais as dificuldades encontradas para obter parâmetros adequados para estes controladores. A estrutura e objetivo do trabalho também são apresentados.
- Capítulo 2: Aborda os conceitos fundamentais de teoria de controle e identificação de sistemas para compreensão do desenvolvimento do trabalho.
- Capítulo 3: Descreve o sistema simplificado de uma caldeira aquatubular e aborda uma breve descrição dos componentes do sistema, incluindo a instrumentação.
- Capítulo 4: Neste capítulo são apresentadas as ferramentas do MATLAB® aplicadas para desenvolvimento do projeto, bem como os resultados de cada requisito implementado no controlador e simulado com o software *Simulink*™, utilizando dados reais de medição de vazão de vapor e água da planta identificada.
- Capítulo 5: Dispõe sobre a conclusão geral do projeto, resultados obtidos e perspectiva de trabalhos futuros nessa linha.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Este capítulo visa abordar os conceitos-chave fundamentais para a compreensão da metodologia de identificação utilizada, assim como os critérios selecionados para os controladores simulados. Inicialmente, serão abordadas metodologias de identificação de sistemas e alguns critérios para definir a estabilidade destes sistemas. Em seguida, serão apresentados os diagramas utilizados para avaliação dos resultados, assim como a definição de cada um dos critérios aplicados aos controladores desenvolvidos.

2.1 Sistemas de controle e estabilidade

Por definição, um sistema de controle é um conjunto de componentes, máquinas e equipamentos que, interligados, oferecem um desempenho desejado para determinado processo (OGATA, 2010). Portanto, o entendimento dos sistemas de controle é fundamental para a automação industrial, onde se deseja que toda a cadeia de processo seja estável, confiável e precisa.

Os sistemas de controle em geral são representados através de um modelo matemático que relaciona entradas e saídas através de uma ou mais equações. Estes modelos podem ser obtidos por fenômenos físicos já conhecidos ou por métodos experimentais coletando dados relevantes que representem o comportamento do sistema (ASSUNÇÃO; TEIXEIRA, 2018).

Existem diferentes tipos de modelagem para identificar e parametrizar corretamente a equação que descreve o sistema, conforme descrito em Aguirre (2014). O primeiro tipo é a modelagem caixa branca, onde é necessário um extenso conhecimento prévio do sistema, definindo-o através de equações representativas de fenômenos físicos. Este tipo de modelagem é o mais aplicado para o estudo da teoria de controle, em geral em sistemas bastante simples.

Com o aumento da complexidade dos processos a serem estudados, a identificação de sistemas passa a se apoiar em outros dois tipos de modelagem: caixa cinza e caixa preta. No primeiro, algumas equações que descrevem o modelo são conhecidas e a parametrização é definida por dados experimentais, avaliando a dinâmica do sistema (AGUIRRE, 2014). No segundo, modelagem caixa preta, não há nenhum conhecimento prévio sobre o sistema, de forma que toda investigação e identificação depende exclusivamente de dados experimentais.

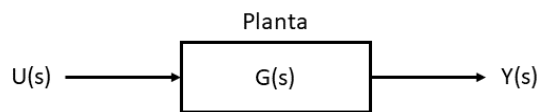
A principal forma de representação de um sistema é através de um diagrama de blocos, como na Figura 1. Este diagrama é chamado de malha aberta, com o sistema reagindo à variação da entrada e a saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema (OGATA, 2010). Como muitos sistemas apresentam comportamentos regidos por equações diferenciais, utiliza-se a transformada de Laplace, possibilitando o estudo do sistema através de equações algébricas.

Assim, a entrada e a saída do sistema mostrado na Figura 1 se relacionam através da equação 1

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s), \quad (1)$$

onde $G(s)$ é a transformada de Laplace do modelo da planta, $U(s)$ é a transformada de Laplace do sinal de entrada e $Y(s)$ é a transformada de Laplace do sinal de saída.

Figura 1 – Diagrama de blocos para sistema em malha aberta

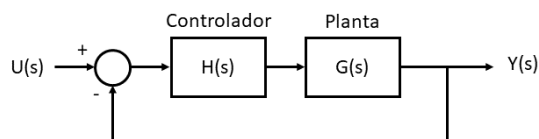


Fonte: Elaborado pela autora.

Para sistemas em malha fechada, conforme Figura 2, é inserido um controlador $H(s)$ e uma realimentação, de forma que a entrada e a saída estão relacionados pela equação 2. Com este arranjo, o controlador atua sobre a diferença entre o estado desejado (entrada $U(s)$) e o estado atual do sistema (saída $Y(s)$).

$$Y(s) = \frac{G(s) \cdot H(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} \cdot U(s) \rightarrow \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G(s) \cdot H(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} \quad (2)$$

Figura 2 – Diagrama de blocos para sistema em malha fechada



Fonte: Elaborado pela autora.

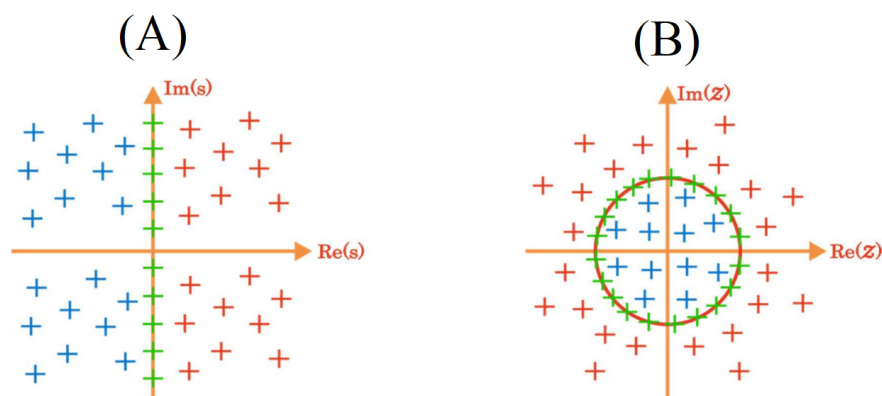
Um conceito essencial para o estudo de controle é a estabilidade do sistema. A estabilidade é definida de forma que um sistema é considerado estável se, para qualquer saída limitada, a saída correspondente é também limitada.

Uma forma simplificada de avaliar se qualquer entrada limitada manterá o sistema em regime estável é através dos polos e zeros do sistema. Pode-se definir os zeros como as raízes do numerador da equação 2, enquanto os polos são as raízes do denominador (ASSUNÇÃO; TEIXEIRA, 2018).

Para sistemas contínuos no tempo, utilizando a transformada de Laplace, o sistema em malha fechada será considerado estável caso os polos, ou as raízes do polinômio $1 + G(s) \cdot H(s)$, não possuam parte real positiva ou nula. Graficamente, conforme Figura 3 (A) abaixo, os polos devem estar no semiplano esquerdo do plano complexo.

Uma vez que a transformada de Laplace é utilizada para sistemas contínuos, para abordagem em sistemas discretos no tempo, como é o caso do presente trabalho, é necessário utilizar a transformada Z. Para sistemas discretos, são considerados estáveis os sistemas cujos polos não possuírem módulo maior ou igual a 1, ou, graficamente, os polos devem estar contidos na parte interna de um círculo de raio unitário, centrado na origem, no plano complexo, conforme Figura 3 (B).

Figura 3 – Região de estabilidade (destacada em azul) para os planos de (A) s e (B) Z



Fonte: Adaptado de Assunção (2020).

2.2 Controlador PID

Como pontuado no primeiro capítulo, os controladores PID (proporcional-integral-derivativo) são amplamente aplicados na indústria, embora a escolha dos ganhos de cada um dos seus parâmetros é comumente feita através de tentativa e erro, requerendo moderado conhecimento das necessidades do processo e uma compreensão básica dos ganhos que compõem um controlador PID.

O ganho proporcional relaciona a entrada e a saída do sistema através da equação 3. Assim, fica claro que um controlador proporcional atua diretamente no erro da malha de controle, "acelerando" o controlador para que o sistema retorne ao *setpoint* desejado. Assim, é possível ajustar a intensidade da resposta ao erro ajustando-se o ganho proporcional K_p . No entanto, valores muito altos no ganho proporcional podem acarretar em sinais muito elevados de saída, levando o sistema à instabilidade (OGATA, 2010).

$$Y(z) = K_p \cdot U(z) \quad (3)$$

Outro ponto a ser considerado é que, para controles que contenham somente o ganho proporcional, uma vez que a saída é proporcional ao erro, um erro de *offset* (erro não nulo) pode ser gerado, sendo possível compensá-lo ao utilizar um controlador do tipo PI (proporcional-integral). Com a adição da parcela integral, tem-se a equação 4, onde K_i é o ganho integral e T_s é o tempo de amostragem do sistema. Enquanto corrige o erro de *offset*, o ganho integral permite que o sistema chegue ao estado desejado (*setpoint*) mais rapidamente. Tempos de estabilização muito elevados podem estar associados com ganhos integrais baixos.

$$Y(z) = \left(K_p + K_i \cdot T_s \cdot \frac{1}{z-1} \right) \cdot U(z) \quad (4)$$

Por fim, adicionando o ganho derivativo T_d , tem-se a equação 5. A ação derivativa nos controladores PID estão associadas à velocidade de variação do erro, ou seja, o ganho derivativo exerce uma correção antecipada da malha de controle, garantindo que o valor do erro não fique muito elevado. A correção pelo ganho derivativo é bastante útil em aplicações onde o sistema não atua bem em regime transitório (com altas taxas de *overshoot*, por exemplo).

$$Y(z) = \left(K_p + K_i \cdot T_s \cdot \frac{1}{z-1} + K_d \cdot \frac{1}{T_s} \cdot \frac{z-1}{z} \right) \cdot U(z) \quad (5)$$

Em alguns processos, a implementação de um controlador PID completo pode ser complexa, uma vez que o ganho derivativo pode atrasar a resposta do controlador, impossibilitando a aplicação em malhas que exijam resposta rápida do controlador. Além disso, caso o sinal de entrada possua muito ruído, o ganho derivativo tentaria responder de acordo, levando o sistema à instabilidade - normalmente, para tais casos, é aplicado um filtro para a parte derivativa do controlador.

2.3 Diagramas de Bode, Margens de Ganho e de Fase

O diagrama de Bode é uma ferramenta de apoio à análise da resposta em frequência do sistema. Este diagrama é composto de dois gráficos, um de ganho (em decibéis) e um de fase (em graus), construído com escala logarítmica para a frequência (eixo horizontal) e escala linear para o ganho e a fase (eixo vertical).

$$G(s) = \frac{1}{-5s + 1} \quad (6)$$

Tomando como exemplo a função de transferência 6, substituindo $s = j\omega$, e calculando a magnitude, temos:

$$|G(s)| = \left| \frac{1}{-5j\omega + 1} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + 25\omega^2}} \quad (7)$$

Analisando a equação [7](#) para baixas frequências (ou seja, $\omega \ll \frac{1}{5} \text{rad/s}$), temos [8](#):

$$|G(s)|_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 25\omega^2}} \right) \approx 20 \log_{10} \left(\frac{1}{1} \right) = 0 \text{dB} \quad (8)$$

À medida que a análise se aproxima de $\omega = 1/5$ (frequência de corte), temos [9](#):

$$|G(s)|_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 25\omega^2}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) = -3 \text{dB} \quad (9)$$

Para altas frequências ($\omega \gg \frac{1}{5} \text{rad/s}$), temos a aproximação da equação [10](#):

$$|G(s)|_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 25\omega^2}} \right) \approx 20 \log_{10} \left(\frac{1}{5\omega} \right) = -20 \log_{10}(5\omega) \quad (10)$$

Calculando o resultado anterior para diferentes valores de ω , obtemos que o ganho, após a frequência de corte, tem uma queda contínua de -20dB a cada década ([ASSUNÇÃO; TEIXEIRA, 2016](#)). Analisando o ângulo, temos $\angle G(s) = \arctg(5\omega)$ e, considerando baixas [11](#), médias [12](#) e altas frequências [13](#):

$$\omega \rightarrow 0 \Rightarrow \angle G(s) = \arctg(5\omega)|_{\omega \rightarrow 0} = 0^\circ \quad (11)$$

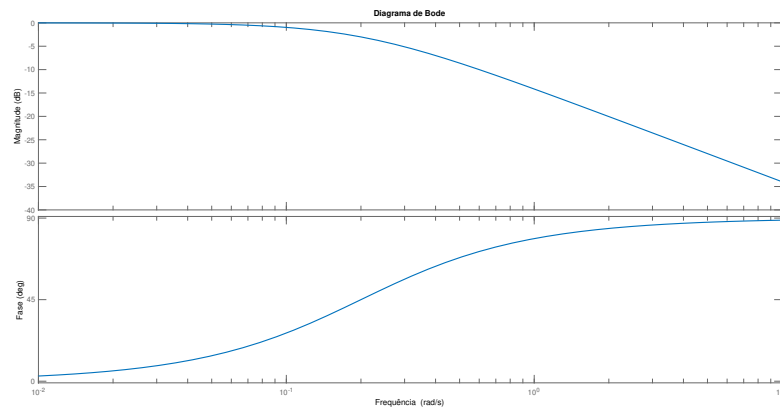
$$\omega = \frac{1}{5} \Rightarrow \angle G(s) = \arctg(5/5) = 45^\circ \quad (12)$$

$$\omega \rightarrow \infty \Rightarrow \angle G(s) = \arctg(5\omega)|_{\omega \rightarrow \infty} = 90^\circ \quad (13)$$

Considerando as análises feitas para magnitude e fase, obtemos a Figura [4](#), representando os diagramas de Bode da função de transferência [6](#). A partir desta Figura, é possível perceber que existe uma atenuação do sinal a partir da frequência de corte ($0,2 \text{rad/s}$). A partir do diagrama de Bode, é possível obter duas medidas de estabilidade relativa ([OGATA, 2010](#)): a margem de ganho e a margem de fase.

A margem de ganho é obtida pelo gráfico de magnitude na frequência de *crossover* (frequência onde a fase cruza o eixo de -180°). A margem de fase é medida no gráfico de fase na frequência onde a magnitude cruza o eixo de 0dB . Para o sistema em malha aberta [14](#), tem-se os diagramas de Bode da Figura [5](#) abaixo.

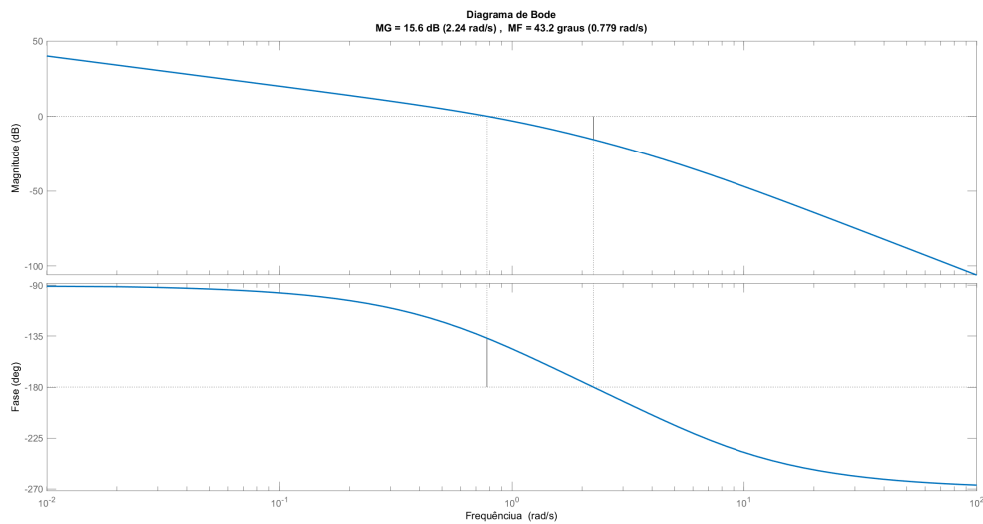
Figura 4 – Diagramas de bode para a função de transferência 6



Fonte: Elaborado pela autora.

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)(0,2s+1)} \tag{14}$$

Figura 5 – Diagramas de bode para a função de transferência 14



Fonte: Elaborado pela autora.

O ponto de instabilidade é $1 \angle 180$ ($1 = 0dB$), portanto deseja-se que a margem e fase estejam o mais longe possível deste ponto. A margem de ganho positiva indica que há espaço para se alterar o ganho do sistema antes que o ponto de instabilidade seja atingido. Da mesma forma, para análise da estabilidade, busca-se uma margem de fase positiva. Assim, com margem de ganho de $15,6 \text{ dB}$ e margem de fase de $43,2^\circ$, o sistema 14 é estável em malha fechada.

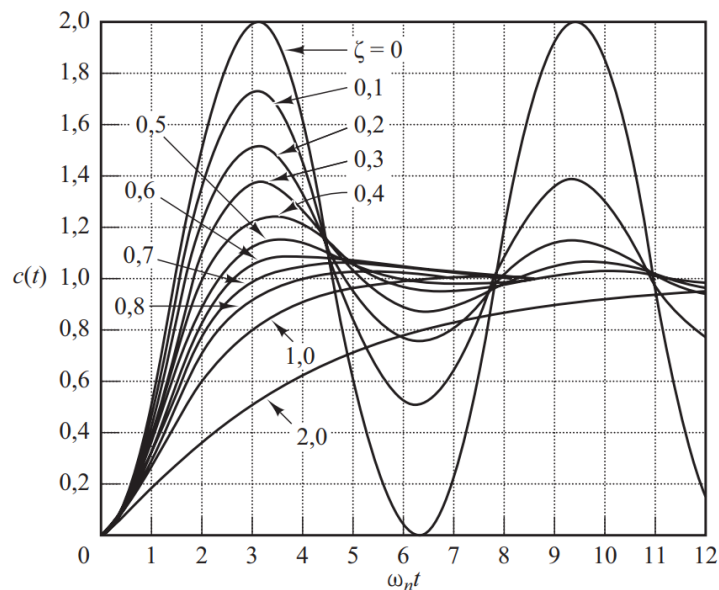
O estudo da estabilidade analisando o critério de margens de ganho e de fase positivas é válido para sistemas de fase mínima. Para sistemas mais complexos, deve ser utilizado o Critério de Estabilidade de Nyquist para definir a estabilidade do sistema (OGATA, 2010).

2.4 Taxa de amortecimento

A taxa de amortecimento está relacionada com a oscilação da saída do sistema em torno do ponto de estabilidade. Assim, conforme apontado por Ogata (2010), sistemas não amortecidos (coeficiente de amortecimento igual à zero) oscilam indefinidamente.

A maioria dos sistemas estáveis possui um coeficiente de amortecimento maior que zero, chamados de sistemas subamortecidos, onde há uma oscilação no sistema em resposta ao degrau e um tempo definido de acomodação (tempo necessário para que a saída do sistema entre e permaneça dentro de uma faixa aceitável em torno do ponto de estabilidade). A Figura 6 mostra os efeitos da variação do coeficiente de amortecimento ζ na saída $c(t)$ de um sistema de segunda ordem.

Figura 6 – Saída de sistema para diferentes valores de ζ



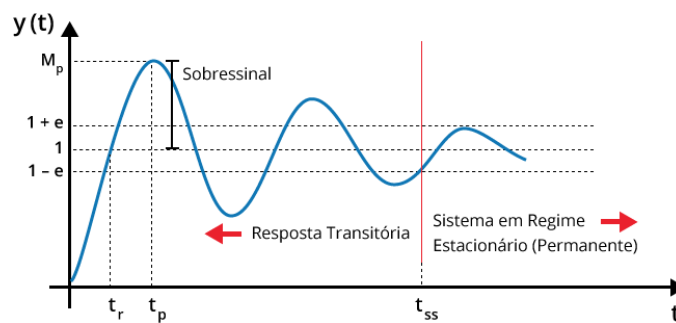
Fonte: Ogata (2010)

O aumento do coeficiente de amortecimento diminui as oscilações do sistema. Sistemas com coeficiente de amortecimento igual a 1 são chamados de criticamente amortecidos, enquanto sistemas superamortecidos são aqueles com coeficiente maior que 1 (ASSUNÇÃO; TEIXEIRA, 2018). Embora a diminuição das oscilações possa ser um atrativo para muitas aplicações, deve-se levar em consideração que o aumento da taxa de amortecimento para do sistema, para $\zeta > 1$, leva a um sistema mais lento.

2.5 Overshoot

Ogata (2010) define o *overshoot*, ou sobressinal, como "(...) o valor máximo de pico da curva de resposta, medido a partir da unidade.", também sendo comum definir o *overshoot* em porcentagem. A Figura 7 contém a resposta ao degrau de um sistema subamortecido, especificando a medição do *overshoot*.

Figura 7 – Resposta ao degrau para sistema subamortecido



Fonte: Dantas (2003)

O *overshoot* é um critério de estabilidade relativa do sistema, uma vez que, mantendo-se o sobressinal limitado, limita-se a saída, evitando que o sistema desestabilize. Este critério está estritamente relacionado com a taxa de amortecimento, devido ao aumento do amortecimento resultar em menores valores de sobressinal.

3 SISTEMA E COMPONENTES

Neste capítulo, será abordada a importância da geração de vapor para o diversos processos industriais, o funcionamento de caldeiras aquatubulares, em especial o balão de vapor cujo controle de nível é o foco deste trabalho, instrumentos utilizados no sistema e as especificações relevantes da caldeira utilizada para coleta dos dados identificados no projeto.

3.1 Geração de vapor em complexos industriais

A utilização de vapor é um dos pontos-chave em diversos processos dentro dos mais diferentes tipos de indústria. Indústrias químicas, alimentícias, farmacêuticas, entre outras, necessitam de vapor em diferentes configurações de pressão e temperatura para o seu processo produtivo.

A caldeira apresentada na Figura 8, por exemplo, é uma caldeira tipo aquatubular desenvolvida pela empresa Danpower para a indústria alimentícia, especificamente para processamento de milho.

Figura 8 – Caldeira desenvolvida pela empresa brasileira Danpower



Fonte: Danpower (2013)

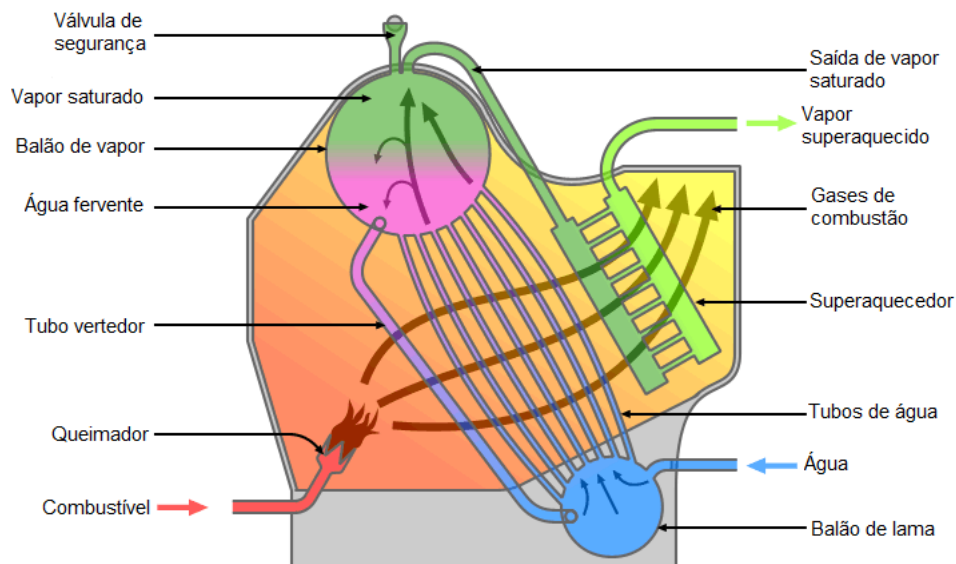
Além de fonte de aquecimento em trocadores de calor (nos quais se utilizam vapor saturado), dependendo da forma construtiva da caldeira e do sistema de utilidades e tratamento de água, conforme definido em Rocco (2011) pode-se produzir vapor superaquecido para movimentação de turbinas, vapor seco saturado para esterilização de equipamentos e vapor úmido para hidratação, como na fabricação de papel, por exemplo.

3.2 Funcionamento de uma caldeira aquatubular

A caldeira aquatubular utiliza, como forma construtiva, longos tubos metálicos pelos quais a água a ser aquecida passa. Estes tubos são envoltos pelos gases de combustão saídos da fornalha e conectam dois reservatórios (também chamados de balões, tubulões ou tambores), sendo que o reservatório superior é o balão de vapor e o reservatório inferior é o balão de lama.

Na Figura 9, observa-se um desenho esquemático de como este modelo de caldeira funciona. O combustível selecionado (podendo ser biomassa, GLP, gás natural, óleo, entre outros) entra na fornalha e o processo de combustão é iniciado (NORONHA et al., 1998).

Figura 9 – Desenho esquemático de uma caldeira aquatubular



Fonte: [Electrical4U](#) (2020)

Os tubos são expostos à radiação da queima do combustível e/ou à temperatura dos gases de combustão e, pela disposição dos tubos de água, alguns dos tubos são mais aquecidos que outros. Assim, o efeito da diferença de densidade entre água mais aquecida e menos aquecida, aliado com o movimento ascendente do vapor formado, faz com que a água circule dentro deste sistema.

A água com maior temperatura e o vapor são direcionados naturalmente até o balão de vapor, na parte superior da caldeira, onde há dispositivos para controle preciso da pressão, nível e temperatura. Enquanto isso, a água de menor temperatura circulando no sistema é direcionada ao balão de lama, onde também se depositam os resíduos sólidos presentes na água, que poderão ser descartados em um procedimento de purga.

Os gases de combustão são direcionados à chaminé por um fluxo natural de ar ou por ventiladores de exaustão forçada. O vapor produzido no processo, saindo do balão de vapor,

pode ser redirecionado ao processo como vapor saturado ou entrar em um superaquecedor que, se utilizando da temperatura dos gases de combustão, obtém vapor superaquecido para uso em máquinas rotativas, geralmente turbinas.

Em comparação com caldeiras flamotubulares (onde os gases de combustão estariam dentro de tubos e os tubos, por sua vez, estariam imersos na água a ser aquecida), [Gonçalves \(2003\)](#) aponta algumas vantagens deste modelo de caldeira:

- Maior volume de produção de vapor;
- Possibilidade de produzir vapor em temperaturas e pressão mais altas;
- Limpeza dos tubos relativamente mais simples, podendo ser feita automaticamente;
- Vida útil elevada.

No entanto, o custo inicial de construção é elevado em comparação com caldeiras flamotubulares. Além disso, é necessário o suporte de um sistema de tratamento mais cuidadoso, assim como um controle operacional mais complexo. Por isso, caldeiras aquatubulares em geral são implementadas em complexos industriais com grande demanda energética de vapor e com alta capacidade de investimento.

3.3 Componentes da caldeira

Os principais elementos que compõem uma caldeira aquatubular são os seguintes:

- Feixe tubular: É um conjunto de tubos que conecta os tubulões da caldeira. Os feixes tubulares recebem calor por convecção, uma vez que estão dispostos fora da zona de radiação do calor da fornalha.
- Parede de água: Tubos dispostos ao longo das paredes da fornalha, que além de permitirem uma maior geração de vapor, também protegem a estrutura da fornalha [\(BARBOSA et al., 2012\)](#), aumentando a vida útil da caldeira.
- Tubulão de vapor: Também chamado de balão de vapor, esse componente é a peça central do controlador a ser estudado neste trabalho. Construtivamente, o tubulão de vapor se trata de um tanque horizontal [\(RODRIGUES, 2016\)](#), cilíndrico, com perfurações na parte superior (conectadas aos tubos de saída de vapor), nas laterais e parte inferior (conectadas à parede de água e ao feixe tubular). Sua função é separar a água aquecida do vapor, e seu controle de nível é preciso para que se mantenha regularmente um nível fixo de água, normalmente 50%. A Figura [10](#) põe em evidência as entradas de água (situadas na lateral do equipamento), que serão conectadas ao feixe tubular, e as saídas de vapor (na parte superior da peça).

Figura 10 – Balão de vapor de 30m a ser instalado em uma fábrica de celulose



Fonte: Eco (2020)

- Tubulão de lama: De construção similar ao balão de vapor, esse equipamento coleta sólidos presentes na água (SILVA; SANTANA; DIAS, 2022) que se assentam no fundo desse reservatório e que podem ser purgados periodicamente. Na Figura 11, é possível observar como os tubulões se conectam entre si através dos feixes tubulares:

Figura 11 – Caminhão transportando balões pré-montados de uma caldeira aquatubular



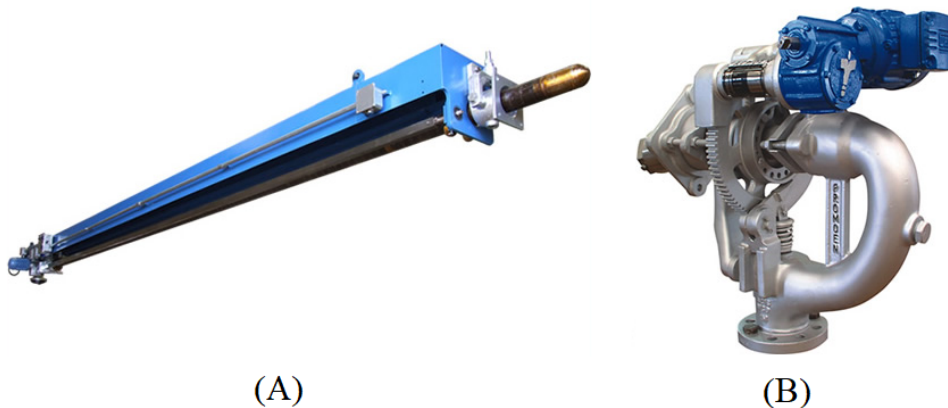
Fonte: CBC (2016)

- Fornalha: Área onde o combustível é queimado. Devido a alta temperatura neste componente, é importante manter o fluxo constante de água nos tubos que cercam a fornalha. Além disso, a fornalha conta com alguns instrumentos para controle de temperatura e

pressão internas. Outra peça importante e parte integrante da fornalha é a grelha, que permite uma liberação de calor mais eficiente para secagem rápida do combustível e retenção temporária de cinzas. Há vários modelos de grelhas, como grelha fixa, móvel, rotativa, entre outras.

- Alimentadores: A principal função dos alimentadores é permitir uma distribuição adequada de combustível sobre a grelha, de forma que a queima seja uniforme e evitar danos por superaquecimento aos componentes da fornalha devido a uma chama irregular.
- Sopradores: A queima do combustível gera particulados que se aderem às paredes externas dos tubos da parede d'água, o que podem ocasionar problemas futuros de corrosão nestas estruturas e diminuição da eficiência térmica da caldeira. Os sopradores são instalados de forma que, periodicamente, seja realizada a limpeza do interior da caldeira (com água, ar ou vapor), impedindo que incrustações se formem nos tubos de água. Os sopradores do tipo rotativo fixo (Figura 12 (B) abaixo), cuja lança gira no interior da fornalha, soprando ar ou vapor ou lavando os tubos com água. Já os sopradores do tipo retrátil (Figura 12 (A) abaixo) retraem sua lança para o interior da estrutura do soprador após o ciclo de sopragem. Os sopradores retráteis requerem um espaço maior para a instalação e alguns componentes de segurança (como sensores de fim de curso), no entanto apresentam vantagens de durabilidade e facilidade de inspeção.

Figura 12 – Sopradores para caldeira modelo (A) retrátil e (B) fixo



Fonte: [Promoen](#) (2013)

- Superaquecedor: Este componente é essencial na produção de vapor para acionamento de máquinas rotativas ([BIZZO, 2003](#)) Trata-se de um conjunto de serpentinas posicionado de forma estratégica na caldeira (em alguns casos instalado de forma a receber radiação direta da fornalha e, em outros, instalado na saída de gases quentes provenientes da combustão).
- Economizador: Como o nome indica, gera economia de combustível ao melhorar o rendimento da caldeira. Em instalações que possuem esse componente, a água de ingresso no

sistema passa por dentro do economizador antes de serem direcionados aos tubos de água. Uma vez que o economizador está instalado na saída dos gases da fornalha (BOTELHO; BIFANO, 2015), a água é aquecida previamente antes da entrada no sistema, evitando grandes gradientes de temperatura no sistema.

- Pré-aquecedor de ar: Similar ao economizador, este periférico do sistema aquece o ar vindo do ventilador principal antes da entrada do ar na fornalha, gerando assim um melhor rendimento térmico.
- Lavador de gases: Esse equipamento controla a poluição gerada pelos gases de combustão removendo particulados do fluxo de gás. Para isso, o lavador de gases faz a colisão das partículas no gás com um meio de lavagem (geralmente uma mistura específica contendo água e cloro). A Figura 13 mostra o componente montado no sistema exaustor de gases. O motor menor, do lado direito, é uma bomba que encaminha a mistura de limpeza aos bicos aspersores do lavador de gás (tubulação marrom na Figura). Os gases de combustão entram pela parte inferior do lavador de gases, sendo limpos em contracorrente com a mistura de lavagem, e são encaminhados à chaminé pelo exaustor (componente com um motor acoplado, na esquerda da Figura).

Figura 13 – Lavador de gases instalado em conjunto com um exaustor



Fonte: Brasfaiber (2021)

- Ventilador principal: Responsável por garantir a entrada de ar para permitir a reação de combustão no interior da fornalha. O fluxo de ar, em geral, é definido por uma malha de controle que leva em consideração a análise dos gases que saem da chaminé.
- Ventilador secundário: Seguindo o circuito do ventilador principal, que aspira o ar ambiente para o pré-aquecedor de ar, o ventilador secundário retira o ar já aquecido do pré-aquecedor e o envia para as grelhas.
- Exaustor: Também chamado de ventilador de tiragem induzida, este equipamento facilita a movimentação dos gases de combustão para a chaminé.
- Desaerador: Remove gases não condensáveis da água de alimentação da caldeira, protegendo tubulações e bombas de possíveis efeitos corrosivos (NASCIMENTO; JÚNIOR, 2016). A Figura 14 mostra um desaerador tipo *Spray-Tray*, ou bandeja com pulverizador, componente instalado na parte superior de um reservatório de água. A água de alimentação entra no desaerador, sendo pulverizado por bicos injetores, e caem sobre bandejas. Na parte inferior do desaerador é injetado vapor de baixa pressão, que aquece a água e permite que os gases dissolvidos se desprendam e saiam pelo *vent* (respiro). A água desaerada é então encaminhada ao reservatório de água. Em alguns casos nem todo o oxigênio é retirado no desaerador, sendo necessária a adição de um componente sequestrante de oxigênio no reservatório.

Figura 14 – Desaerador tipo *Spray-Tray* e reservatório



Fonte: BME (2019)

- Válvula de partida: Esta válvula, localizada na saída de vapor do balão superior, é responsável por, durante o procedimento de partida da unidade, liberar o vapor produzido à atmosfera. Também pode atuar como uma válvula de alívio, operando antes da abertura da válvula de segurança (RODRIGUES-RHODIA et al., 2017).

3.4 Instrumentação

Alguns conceitos de instrumentação são necessários para entender como é feito o controle e a operação segura de equipamentos e sistemas industriais, principalmente para uma instalação tão complexa e crítica para a operação quanto o sistema de geração de vapor.

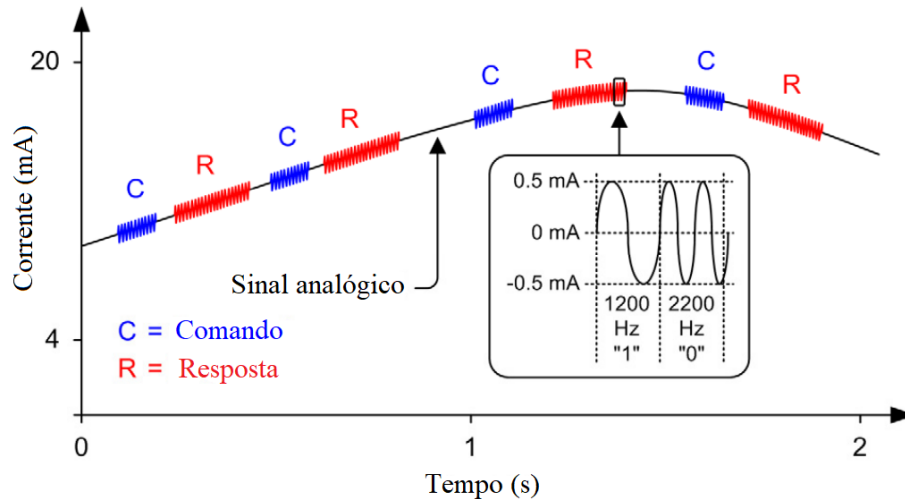
Para sinais analógicos, a instrumentação industrial utiliza por padrão, conforme Dudojć (2004), transmissores que respondem ao sinal de um sensor gerando uma corrente contínua variando de 4 a 20 mA. Isso significa que, para o menor valor possível medido no sensor (calibrado no instrumento), o transmissor enviará ao CLP, através de uma placa de entrada analógica, 4 mA. Para o maior valor de variável de processo medido, o transmissor enviará 20 mA. A faixa de trabalho do instrumento é comumente chamada de *range*, e para qualquer outro valor dentro do *range* do instrumento, a corrente de saída do transmissor estará entre 4 e 20 mA (25% do *range*, por exemplo, implicaria em uma corrente de 8 mA).

A utilização da corrente mínima como 4 mA é uma aplicação chamada de "zero vivo", isto é, embora se tenha uma faixa de operação menor (e portanto, menor precisão) em comparação com uma faixa de 0 a 20 mA, na faixa 4-20 mA é possível detectar falhas no instrumento (como interrupção no cabeamento, mal funcionamento do instrumento ou falta de alimentação) caso a corrente lida no CLP seja de 0 mA (DUNN, 2018). Em um transmissor que utilize a faixa de 0 a 20 mA, essa detecção de falhas não é possível, uma vez que o 0 mA seria lido como o menor valor possível a ser medido da variável de processo. A faixa de 0 a 20 mA era bastante utilizada em fabricantes europeus, no entanto, pela possibilidade de detecção de falhas apontada anteriormente, o mercado no geral optou pela fabricação de componentes que utilizam por padrão 4 a 20 mA. Um outro ponto interessante de ser ressaltado é que sinais transmitidos por um fluxo de corrente elétrica, em comparação com sinais transmitidos por uma tensão elétrica, está menos sujeito a interferências eletromagnéticas (KRISHNASWAMY, 2003; KUPHALDT, 2008) e não sofre com a queda de tensão caso o cabo de sinal esteja percorrendo grandes distâncias até a placa de entrada analógica.

Com o avanço da eletrônica digital, além do sistema elétrico de comunicação através de corrente contínua, desenvolveu-se o protocolo HART, do inglês *Highway Addressable Remote Transducer* (Via de Dados Endereçável por Transdutor Remoto, em tradução livre), que sobrepõe, através de modulação FSK, o sinal de corrente com um sinal de alta frequência e baixa amplitude, permitindo comunicação de duas vias entre CLP e transmissor (FRANTLOVIĆ; JOVANOVIĆ; MILJKOVIĆ, 2009; FILHO, 2007). A Figura 15, a seguir, esquematiza como funciona essa

modulação em conjunto com o sinal analógico.

Figura 15 – Sinal analógico Hart



Fonte: [Frantlović, Jovanov e Miljković \(2009\)](#)

Assim, é possível ajustar alguns parâmetros do transmissor remotamente, via CLP, e também é possível que o transmissor envie mais de um sinal analógico - por exemplo, um transmissor de vazão poderia comunicar a medição da vazão ao CLP via corrente elétrica e comunicar a medição da densidade do produto passando pelo sensor através da palavra HART configurada.

O cartão de entrada analógica possui um resistor de precisão de 250 ohms e converte a tensão contínua variante em um sinal digital capaz de ser interpretado pelo CLP ([KUPHALDT, 2008](#)). Grande parte dos transmissores industriais utiliza um par de fios para essa comunicação, significando que a alimentação do instrumento é feita por um *loop* no sistema, ou seja, a placa de entrada analógica disponibiliza uma tensão contínua de 24 V, e através dos mesmos pinos, recebe a corrente do transmissor. Alguns tipos de instrumentos podem ter a alimentação à parte, com operação a três fios (negativo comum) ou quatro fios (alimentação e sinal completamente separados entre si).

A seguir estão alguns sensores analógicos que utilizam transmissores como o descrito anteriormente para a comunicação correta com o CLP e que são utilizados no sistema de controle do balão de uma caldeira a vapor.

3.4.1 Nível

Existem diversas tecnologias para aplicação em sensores de nível, desde as mais simples (flutuadores, capacitivos) até os mais complexos (ultrassônicos, radioativos, radar). Também é possível utilizar transmissores de pressão para medição do nível (nível por coluna d'água). A

escolha do tipo de instrumento a ser utilizado para medição de nível leva em consideração a distância entre ponto de instalação e produto, meio do produto (líquido ou sólido), abrasividade do produto, turbulência, precisão requerida de medição, entre outros fatores.

- **Flutuadores:** Trata-se de uma tecnologia mais antiga que utiliza um flutuador inserido no processo e um sistema de detecção para determinar o ponto que se encontra o flutuador. Anteriormente equipado com fitas e polias para registro do nível (DIAS et al., 2018), o que traz problemas inerentes do desgaste de componentes mecânicos, atualmente é mais comum encontrar flutuadores e sensores magnéticos, como o da Figura 16.

Figura 16 – Flutuador tipo magnético



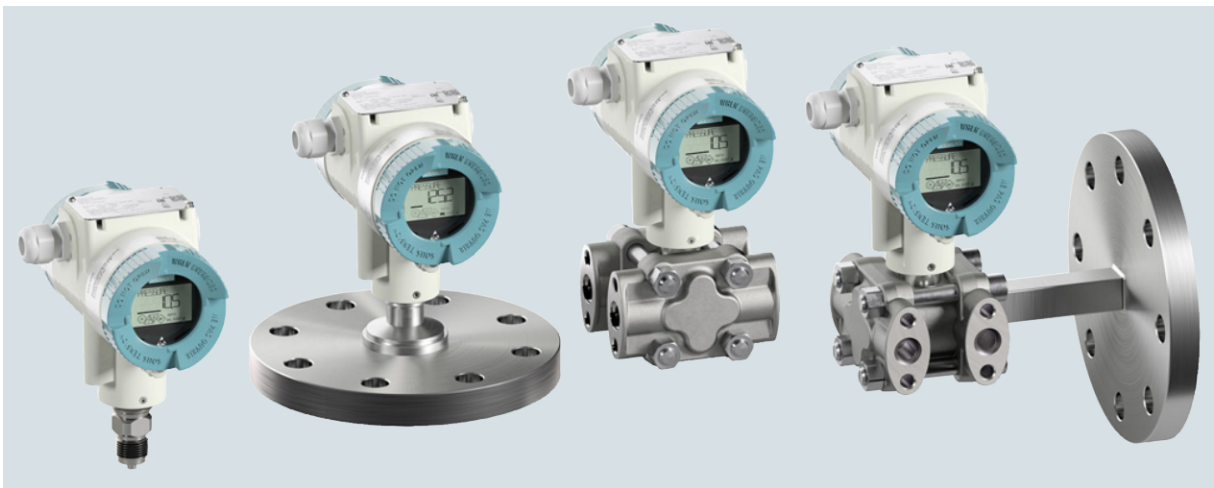
Fonte: Omega (2020)

A principal vantagem deste tipo de sensor é sua simplicidade construtiva, além de terem ótima eficiência em processos contendo espuma. No entanto, este tipo de tecnologia só pode ser aplicado em meios líquidos e não abrasivos. Outros pontos que podem dificultar o uso de transmissores de nível flutuadores são processos que geram muita incrustação ou com grandes variações de temperatura, que diminuem a precisão da medição.

- **Nível por coluna d'água:** Esta aplicação utiliza um sensor de pressão para medir o nível de um produto. O tipo de tecnologia de medição é ampla e será abordado na seção correspondente aos transmissores de pressão. O conceito por trás desta aplicação é que a pressão gerada por uma certa quantidade de líquido está diretamente relacionada à altura

do líquido (do ponto da superfície até o ponto de medição) (KUPHALDT, 2008). Para tanques ou recipientes selados, deverá ser utilizado um transmissor por pressão diferencial, onde a câmara de alta pressão está conectada ao fundo do recipiente ou tanque, e a câmara de baixa, ao topo. Tanques não selados não necessitam da aplicação de um transmissor de pressão diferencial (mas ainda é possível utilizá-lo, desde que a câmara de baixa esteja aberta também para a atmosfera). Na Figura 17 abaixo, podemos observar diferentes modelos de transmissores de pressão que poderiam ser utilizados para medição de nível, onde os dois últimos possuem câmara para medição de pressão diferencial (necessária para aplicação em tanques selados).

Figura 17 – Sensores de pressão da série Siemens SITRANS P320/420



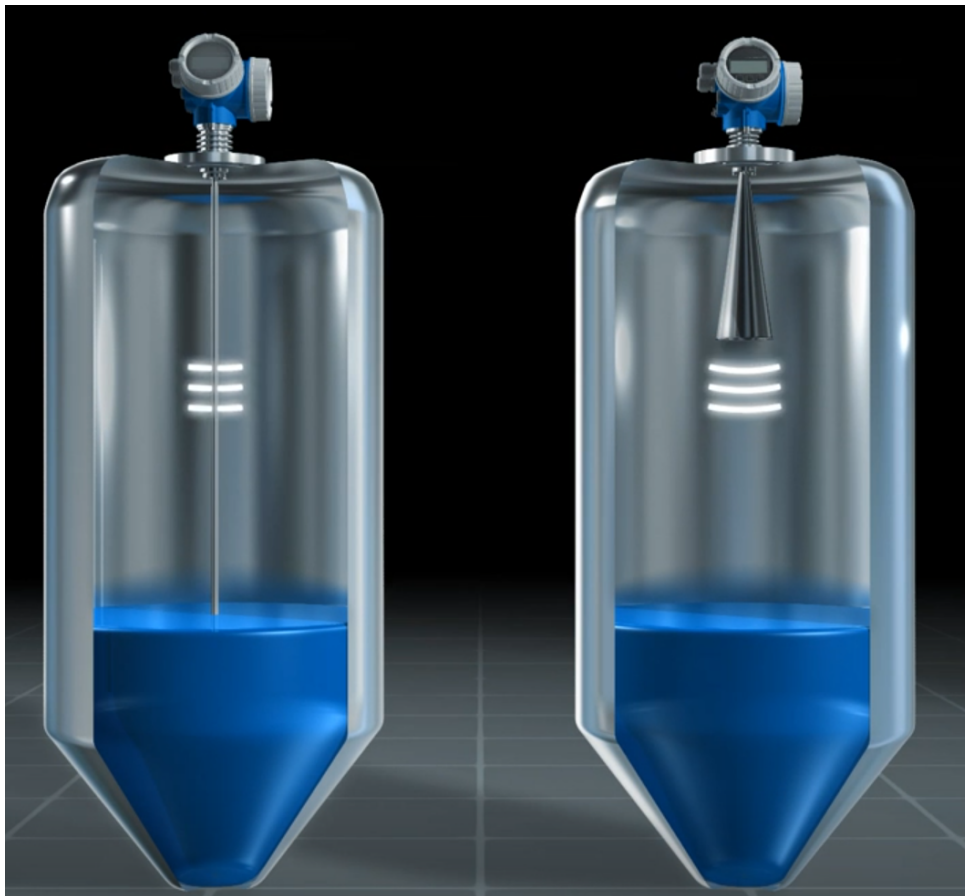
Fonte: Siemens (2023)

Por se tratarem de transmissores de pressão, esta aplicação tem a principal vantagem de ter uma configuração e comissionamento bastante simples, além da metodologia simplificada e barata de calibração. No entanto, o contato com o fluido de processo pode resultar no entupimento da câmara de medição, gerando erros de leitura. A variação na densidade do produto também pode gerar medições imprecisas.

- **Radar:** Esse tipo de tecnologia utiliza ondas eletromagnéticas de frequência entre 5 e 25 GHz como princípio básico de medição. Ao serem refletidas pelo produto, estas ondas são captadas pelo sensor, que pode determinar o nível do produto pelo tempo decorrido para que a onda retornasse ao equipamento ou pela diferença entre a frequência da onda emitida e a onda refletida. Há transmissores de radar tipo onda livre e tipo onda guiada (DEVINE, 2000). O primeiro caso utiliza uma antena cônica sem contato com o produto, sendo que quanto maior a largura da antena, maior a potência recebida no sinal, no entanto, para produtos com baixa constante dielétrica ou recipientes muito profundos, é indicado utilizar antenas mais estreitas e longas, focando a medição no ponto desejado. Para o segundo caso, modelo onda guiada, o sinal ultrassônico é enviado por uma haste ou cabo (a depender da

aplicação), reduzindo a perda do sinal. Sensores de nível tipo radar são pouco influenciados por presença de poeira no meio (embora a poeira possa se acumular na antena e afetar a precisão da medição para modelos tipo onda livre), variações de pressão ou variações de temperatura de processo. Turbulência no produto pode acarretar em falhas de medição para o modelo onda livre, sendo para esse caso indicado a aplicação do modelo onda guiada. A Figura 18 mostra o esquema de instalação dos modelos onda livre (à direita) e onda guiada (à esquerda).

Figura 18 – Representação da instalação de dois transmissores de nível tipo radar



Fonte: [Endress+Hauser](#) (2022a)

O principal problema de aplicação desta tecnologia é a necessidade de saber a constante dielétrica do produto de medição para configuração do instrumento, além de funcionarem melhor em tanques metálicos, podendo gerar erros de medida se aplicado em recipientes construídos com outros materiais. No caso da necessidade de aplicação da onda guiada, produtos agressivos aos componentes também podem inviabilizar o uso deste modelo.

- **Ultrassônicos:** Utiliza por princípio ondas de som de alta frequência (acima de 20 KHz), medindo o tempo entre a saída da onda emitida e a detecção da onda refletida pelo sensor. Sua principal vantagem é sua simplicidade de configuração, não dependendo do conheci-

mento de parâmetros do produto (como a constante dielétrica utilizada em modelos tipo radar), e não entrar em contato com o meio de medição. No entanto, esta tecnologia traz algumas dificuldades de aplicação, sendo uma delas a espuma. A presença de espuma no produto a ser medido torna a utilização desta tecnologia inviável, uma vez que o comportamento da onda na espuma é imprevisível (a onda pode ser refletida no topo da espuma, em algum ponto ao longo da espuma ou ser completamente absorvida) (HERNÁNDEZ et al., 2007). Outro problema é a dificuldade de alinhamento perpendicular com a superfície do produto, principalmente para produtos sólidos. Dispositivos ultrassônicos também são bastante afetados caso sejam instalados perto de grandes campos elétricos, como próximo a geradores. A Figura 19 mostra um transmissor tipo ultrassônico da série Prosonic M da fabricante Endress+Hauser.

Figura 19 – Representação da instalação de dois transmissores de nível tipo ultrassônico

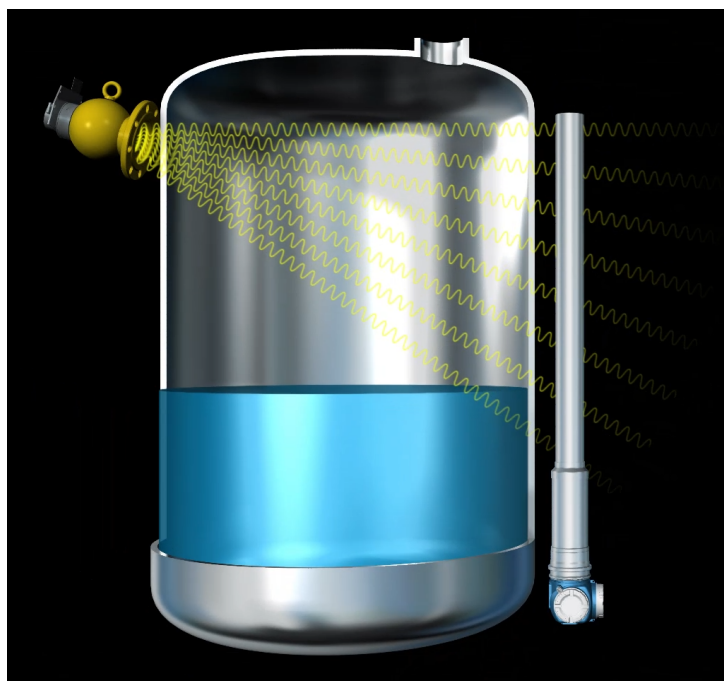


Fonte: Endress+Hauser (2023c)

- **Radioativos:** É um sistema composto de duas partes, meio emissor (que contém material radioativo como, por exemplo, Césio) e meio receptor. Baseia-se no princípio de que a capacidade de transmissão da radiação gama é muito menor no material de medição do que no ar (KUPHALDT, 2008), sendo assim, a significativa perda de potência de sinal detectado pelo meio receptor é utilizado para identificar o nível do produto. É uma tecnologia bastante precisa e deve ser aplicada principalmente em ambientes altamente agressivos, envolvendo substâncias corrosivas e/ou tóxicas, onde é desejado que haja menor contato com o produto o possível. Na Figura 20, que contém um esquema de instalação

para esse modelo de sensor, pode-se notar claramente que não há qualquer contato com produto e conjunto fonte/sensor/transmissor, assim como não são necessárias perfurações no recipiente do produto, tornando viável a medição de nível em alguns tipos de processos críticos.

Figura 20 – Representação da instalação de um transmissor radioativo



Fonte: [Endress+Hauser](#) (2022b)

No entanto, essa é uma aplicação com altos custos, uma vez que há processos legais bastante burocráticos para obtenção da licença ao se utilizar materiais radioativos. O descarte desse material, após o esgotamento, é um processo também caro e rigoroso. Além disso, requer capacitação específica para os colaboradores que estiverem envolvidos com este equipamento, exigindo também exames específicos para garantir que não estejam recebendo cargas radioativas além dos limites seguros à saúde.

3.4.2 Pressão

Os sensores de pressão podem ser divididos em três principais categorias: medição por pressão diferencial, medição por pressão absoluta e medição por pressão manométrica.

- **Pressão diferencial:** Possui duas câmaras, uma de alta (conectada ao processo no ponto de maior pressão) e uma de baixa (conectada ao processo no ponto de menor pressão), calculando a diferença de pressão detectada entre os dois pontos. Este modelo tem ampla aplicabilidade em medição de outras grandezas, como vazão e nível.

- **Pressão por pressão absoluta:** Aplicados em áreas onde se exige alto nível de precisão, este modelo de sensor mede a pressão de processo com referência ao vácuo, também chamado de zero absoluto.
- **Pressão por pressão manométrica:** Também conhecido como pressão relativa, estes transmissores medem a pressão do processo com referência à pressão atmosférica.

Quanto à tecnologia de medição, a maior parte das aplicações industriais utilizam sensores piezoresistivos (KUMAR; PANT, 2014), elementos que variam sua resistência com a variação da aplicação de um esforço mecânico. Essa resistência é convertida em um sinal de corrente que é amplificado e linearizado. Esta tecnologia de medição apresenta diversas vantagens, como sua maior resistência à fadiga (comum em componentes mecânicos), alta sensibilidade e linearidade e resposta rápida.

3.4.3 Temperatura

As tecnologias de medição mais utilizadas na indústria são os sensores tipo RTD e os termopares. Os sensores RTDs, também chamados de termorresistências, utilizam por princípio a variação da resistência de acordo com a temperatura. São modelos bastante utilizados por sua simplicidade e precisão, sendo construídos de metais como platina (PT100, PT1000, etc) ou níquel (Ni500, por exemplo) (WITT; MENA; CORNELI, 2014). Já os termopares se baseiam no Efeito Seebeck, onde há uma diferença de potencial gerada na junção entre dois materiais condutores (ou semicondutores) diferentes quando expostos a uma determinada temperatura.

Em linhas gerais, o sensor RTD tem maior precisão e durabilidade, enquanto termopares são mais baratos e possuem melhor tempo de resposta. A aplicação de um ou outro sensor depende, portanto, de condições de processo, sendo que muitas fabricantes de instrumentos produzem modelos de transmissores com compatibilidade para ambos os tipos de sensores.

Normalmente, devido aos pontos de medição não serem convenientes para acesso, transmissores de temperatura são montados à parte dos seus sensores, em uma configuração chamada de transmissor remoto. A Figura 21 mostra sensores da série Rosemount 214C, da fabricante Emerson-Rosemount, cuja leitura não é um sinal 4-20 mA, mas sim uma resistência. Para instalação em um CLP, estes sensores podem ser instalados diretamente em uma entrada do tipo RTD (que faz leitura de variações de resistência) ou com o intermédio de um transmissor que faria a conversão para corrente 4-20 mA.

3.4.4 Vazão

Em indústrias com geração de vapor, os transmissores de vazão desempenham um papel essencial tanto no controle de alimentação da caldeira, detectando variações na demanda, quanto na gestão de consumo de vapor. Os sensores de vazão podem medir vazão mássica (utilizando

Figura 21 – Sensores tipo RTD da Emerson-Rosemount



Fonte: Isaac (2020)

como unidade quilogramas por hora, por exemplo) ou vazão volumétrica (como metros cúbicos por hora).

Devido ao seu elemento sensor estar necessariamente diretamente conectado ao processo e em contato com o produto, as características do objeto a ser medido tem grande influência sobre a escolha do instrumento (KUPHALDT, 2008), tais como viscosidade do produto, condutividade, densidade, presença de impurezas no processo, entre outros. Além disso, frequentemente não é economicamente viável construir um bypass para a linha onde o instrumento está instalado (o que é possível, barato e até mesmo recomendado para a maior parte dos sensores abordados neste capítulo), inviabilizando a retirada, substituição e aferição do instrumento sem o interrompimento da linha. Por isso, a escolha correta do sensor de vazão é extremamente crítica.

- **Vazão por pressão diferencial:** Baseados no princípio de Bernoulli, esses instrumentos constroem o fluxo de produto, medindo a diferença de pressão antes e depois do ponto de restrição (LIPTAK, 1993). A forma mais comum de medir a vazão por este método é utilizando uma placa de orifícios, como o modelo da Figura 22, mas também podem ser utilizados tubos de pitot ou venturi. Medidores de vazão por pressão diferencial são robustos, requerendo pouca manutenção por não possuir partes móveis e boa aplicabilidade para fluxos turbulentos. No entanto, tem baixa precisão em tubulações com baixa vazão, e a restrição do fluxo induz uma perda de pressão que, a depender do processo, precisa ser compensada com a inserção de uma bomba na linha.

Figura 22 – Transmissores de vazão por pressão diferencial da ABB



Fonte: [ABB \(2023\)](#)

- **Magnético:** Levam em consideração a Lei de Faraday, que define que um meio condutor, imerso em um campo magnético, gera um potencial elétrico. Assim, estes sensores são equipados com bobinas para geração do campo magnético e eletrodos para medir a tensão gerada pelo fluido de processo, que é proporcional à velocidade do fluxo ([LIPTAK, 1993](#); [KRISHNASWAMY, 2003](#)). Para aplicação deste modelo, é necessário que o fluido a ser medido tenha boa condutividade, descartando a aplicação em diversas linhas de produção. No entanto, este modelo apresenta diversas vantagens, como não possuir partes internas, sendo excelentes opções para fluidos corrosivos, boa acurácia, e não reduzir a pressão da linha, fator que pode ser crítico para aplicações em linhas de baixa vazão. A Figura [23](#) exibe um transmissor de vazão magnético da linha Promag, da fabricante Endress+Hauser.
- **Coriolis:** É constituído de um tubo reto ou dois tubos curvos, utilizados para medir vazão mássica. Os dois tubos, imersos em um forte campo magnético, são oscilados em uma determinada frequência de ressonância. A passagem do fluido de processo gera uma força Coriolis nos tubos, que fazem um movimento de torção. Este movimento gera uma defasagem na oscilação dos tubos, e esta defasagem é captada por dois sensores (um na entrada de fluxo, um na saída de fluxo), sendo uma medição direta da vazão mássica da linha ([ANKLIN; DRAHM; RIEDER, 2006](#)). A Figura [24](#) abaixo mostra o modelo Micro Motion 4200 da fabricante Emerson, um transmissor de vazão do tipo Coriolis:

Figura 23 – Transmissor de vazão magnético da fabricante Endress+Hauser



Fonte: [Endress+Hauser](#) (2023a)

Figura 24 – Transmissor de vazão tipo Coriolis da fabricante Emerson



Fonte: [Boulder](#) (2019)

Por ser uma medição direta, os impactos relacionados ao perfil de vazão, temperatura e pressão podem ser descartados. Sensores tipo Coriolis também, em geral, permitem a leitura da densidade do produto. No entanto, não são indicados para medir linhas de produto que possam possuir partículas (como líquidos com partículas sólidas, por exemplo) pois estas afetam a oscilação dos tubos e geram medições imprecisas.

- **Vórtice:** O sensor tipo vórtice (ou *vortex*) introduz um obstáculo na linha de passagem de produto, gerando um rastro de vórtices alternadas em cada lateral do obstáculo. Um sensor, situado à jusante do obstáculo, detecta a diferença de pressão causada pela passagem

dos vórtices. A distância entre dois vórtices alternados está associada com o volume de fluido passando pelo sensor, e com essa relação, é possível obter a vazão volumétrica indiretamente (VENUGOPAL; AGRAWAL; PRABHU, 2011). Alguns modelos de sensor tipo *vortex* podem medir temperatura e pressão da linha e, com estes dados, calcular a vazão mássica da linha. Uma vez que a frequência a ser medida é muito alta, os sensores utilizados em um transmissor tipo vórtex geralmente são elementos piezoelétricos, que não precisam ser calibrados uma vez que deseja-se medir a frequência dos vórtices e não sua amplitude. Não possuindo partes móveis, estes instrumentos possuem ótima durabilidade, mas sofrem em linhas com baixa vazão, uma vez que em baixas vazões, a viscosidade supera o momento do fluido, impedindo a geração dos vórtices, fazendo o instrumento ler uma vazão nula. Estes instrumentos, devido às suas características construtivas, não funcionam caso sejam instalados no sentido contrário ao fluxo. A Figura 25 exibe o modelo Proline Prowirl R 200 da fabricante Endress+Hauser.

Figura 25 – Transmissor de vazão tipo *Vortex* da fabricante Endress+Hauser



Fonte: Endress+Hauser (2023b)

Existem diversas outras soluções no mercado, como sensores tipo turbina, ultrassônicos e sensores ópticos.

3.4.5 Chaves de nível

As chaves de nível, ao contrário dos demais instrumentos abordados neste capítulo, envia um sinal digital ao CLP, sendo o bit indicando ou não a atuação do instrumento definido por uma

variação de tensão em vez de corrente (em geral, o sinal "0" é lido caso a entrada digital detecte -30 a 5 V (corrente contínua) e o sinal "1" é lido em uma tensão de 15 a 30 V.

Enquanto transmissores de nível são utilizados em malhas de controle e gestão de insumos, inventário, entre outros, as chaves de nível são aplicadas como dispositivos de segurança - por exemplo, o transmissor de nível de um tanque poderia controlar a abertura de uma válvula controladora de alimentação do tanque, enquanto a chave de nível alto faria um intertravamento da uma válvula tipo ON/OFF na mesma linha, cortando completamente a alimentação do tanque e evitando transbordos (KRISHNASWAMY, 2003). O motivo pelo qual se usaria a chave de nível no lugar de um transmissor para definir o intertravamento e interrupção da linha é o seguinte: por serem dispositivos com tecnologia mais simplificada, são mais robustos e de leitura mais confiável, não sofrendo efeitos de falta de calibração ou curva de mapeamento incorreta, sendo uma alternativa mais segura. No entanto, frequentemente são utilizados ambos os instrumentos para o intertravamento, atuando primeiro o transmissor de nível e, em caso de falha neste, atuando a chave.

- **Sensores capacitivos:** Sensores capacitivos acumulam carga entre os dois eletrodos que o compõem (TERZIC et al., 2012). A quantidade de carga acumulada está relacionada à permissividade elétrica do meio entre os dois eletrodos, portanto no momento em que o nível do recipiente variar de forma que o produto de medição toque (ou deixe de tocar) a chave, a carga acumulada sofrerá uma variação, que indicará a atuação da chave. A Figura 26 mostra uma chave do tipo capacitiva da série Rosemount 2555 da fabricante Emerson.

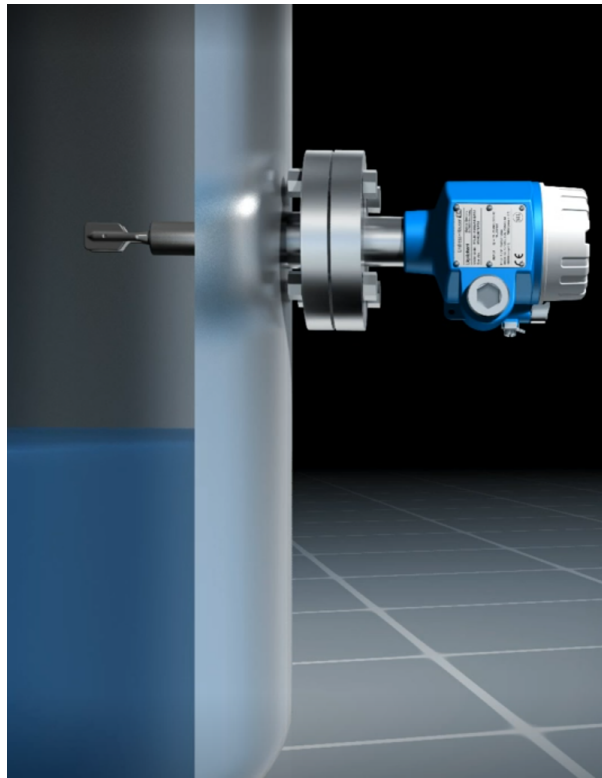
Figura 26 – Chave do tipo capacitiva da fabricante Emerson-Rosemount



Fonte: Emerson (2023)

- **Sensores indutivos:** Estes sensores possuem uma bobina selada dentro de uma haste. A energização do instrumento faz a bobina gerar um campo magnético e o contato do líquido de processo com a haste da chave causa uma variação neste campo, gerando uma corrente parasita (SHOLETTE, 2015) que é detectada pela eletrônica do sensor. Assim a saída de tensão do sensor varia para indicar ao CLP a atuação da chave,
- **Chave vibratória:** O modelo de chave de nível vibratória é aplicado principalmente para medição de sólidos (SHOLETTE, 2015). Após a energização do instrumento, os garfos situados na ponta de sua haste (que está inserida ao processo) vibram na frequência natural do sistema. Em contato com o produto, a vibração é amenizada, e esta variação é detectada pelo componente. A Figura 27 mostra um diagrama de instalação de uma chave de nível vibratória.

Figura 27 – Esquema de instalação de uma chave de nível tipo vibratória



Fonte: Endress+Hauser (2022c)

Diversas tecnologias além das citadas acima estão disponíveis no mercado. A escolha do modelo de chave de nível se dá principalmente pelo tipo de material (sólido ou não), se há possibilidade de acúmulo de produto na haste da chave e quão prejudicial é esse acúmulo para a medição, entre outros fatores.

3.5 Sistemas de aquisição e monitoramento de dados

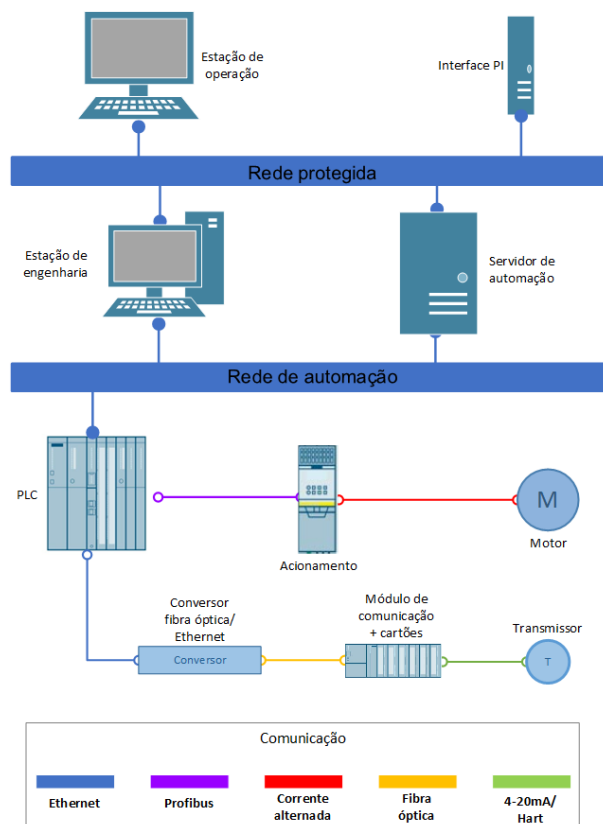
Para que os parâmetros de um processo industrial sejam analisados e controlados, é essencial que os dados apropriados estejam prontamente disponíveis para operadores, manutentores e engenheiros de processo.

3.5.1 SCADA

SCADA, do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*, ou Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados, também chamado de sistema supervisor, é um sistema que integra softwares e hardwares que monitoram parâmetros de processo, disponibilizando-os de forma intuitiva para que o operador possa tomar decisões assertivas para o controle dos processos industriais.

Na Figura 28 abaixo, temos um diagrama simplificado de uma arquitetura de sistema SCADA. Diversos protocolos são utilizados para comunicação, mas a integração vertical do sistema é possível através do OPC, um padrão industrial para disponibilização de dados, permitindo que componentes de diferentes fabricantes possam se comunicar dentro de um mesmo sistema.

Figura 28 – Diagrama de uma conexão de sistema SCADA



Fonte: Elaborado pela autora.

3.5.2 PI System

O PI System é um historiador de dados industriais que coleta, analisa e compartilha grandes cargas de dados para análises de qualidade e confiabilidade de processos. O PI System foi desenvolvido pela empresa OSIsoft e conta com diversas soluções em software para visualização e diagnóstico de dados.

O PI System se integra à arquitetura industrial através de uma interface PI, conectada na mesma rede LAN dos servidores do sistema SCADA. Essa interface é responsável por coletar os valores de um determinado ponto cadastrado (chamados de "tags") e a *timestamp* associada ao valor. Essas informações são então colhidas por um PI Server que armazena os dados por um determinado tempo, a depender das capacidades do sistema. A configuração padrão para a taxa de amostragem de uma *tag* é de 100ms.

3.5.3 Controle de Três Elementos

A malha de controle de um tubulão de vapor é um dos pontos críticos de processo em um complexo de geração de vapor, tanto por questões de eficiência, quanto por questões de segurança. Uma vez que o funcionamento de um balão de vapor depende do nível de água dentro do equipamento, deseja-se a estabilidade de nível de água mesmo durante variações de processo (na temperatura dos gases de combustão ou no consumo de vapor, por exemplo).

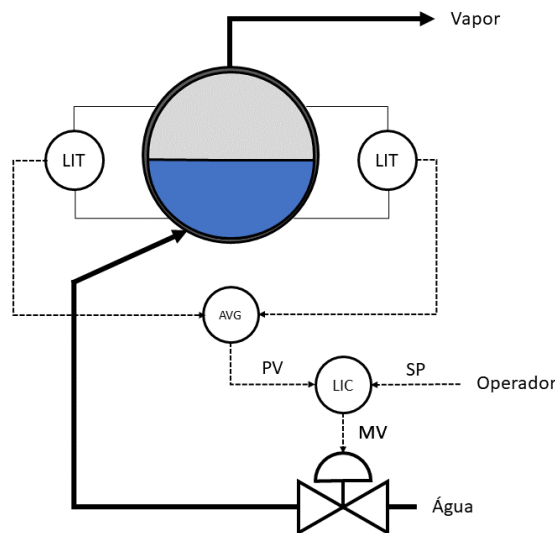
Baixos níveis de água podem acarretar em superaquecimento dos componentes acima da temperatura adequada de trabalho, resultando na explosão do equipamento (EYERS, 1955) - uma consequência catastrófica tanto no quesito financeiro (tempo de parada e custos elevados de manutenção dos equipamentos afetados) quanto para a segurança de pessoas. A níveis menores (caso a caldeira opere com baixo nível de água no tubulão, mas não o suficiente para causar superaquecimento), a falha do controle do nível pode diminuir o efeito de passivação, que é a proteção das paredes internas dos equipamentos e tubulações através de produtos químicos anti-corrosivos adicionados à água de processo.

Caso a malha de controle esteja desregulada de forma que o balão esteja sempre cheio acima do nível ideal de operação, a água de processo pode ser arrastada através da saída de vapor, resultando em um vapor de baixa qualidade (umidade em excesso) e danificando equipamentos à jusante. Este cenário é ainda mais crítico, conforme apontado por Staniša e Ivušić (1995), em caldeiras de alta pressão que estão conectadas à uma unidade de cogeração de energia, uma vez que turbinas devem receber vapor superaquecido e níveis elevados de umidade podem gerar distúrbios na operação desta máquina rotativa, ocasionando, a longo prazo, danos permanentes aos componentes ou, em caso de falha do sistema de proteção da turbina, aumento da vibração da estrutura resultando em falhas catastróficas.

Exceto para casos muito específicos, o nível de um tanque pode ser mantido através de um controle de um elemento (CHAKRABORTY; MANNA; DEY, 2014). Para os tubulões de

vapor, o controle de um elemento se trata de uma malha *feedforward* com um controlador PID, observando o nível como variável de processo (*Process Variable* ou PV) e atuando sobre uma variável manipulada (*Manipulated Variable* ou MV) que pode alterar o *setpoint* da bomba ou de uma válvula controladora de alimentação, conforme Figura 29.

Figura 29 – Diagrama de controle de um elemento



Fonte: Elaborado pela autora.

Na figura, tem-se o balão com dois transmissores de nível (demarcados com "LIT", *Level Indicator Transmitter*). O valor médio é calculado ("AVG", do inglês *average*), e utilizado como a variável de processo da malha de controle (LIC, *Level Indicator Controller*). Esta malha de controle recebe o *setpoint* do operador e estabelece uma porcentagem de abertura para a válvula de controle através da variável manipulada (MV).

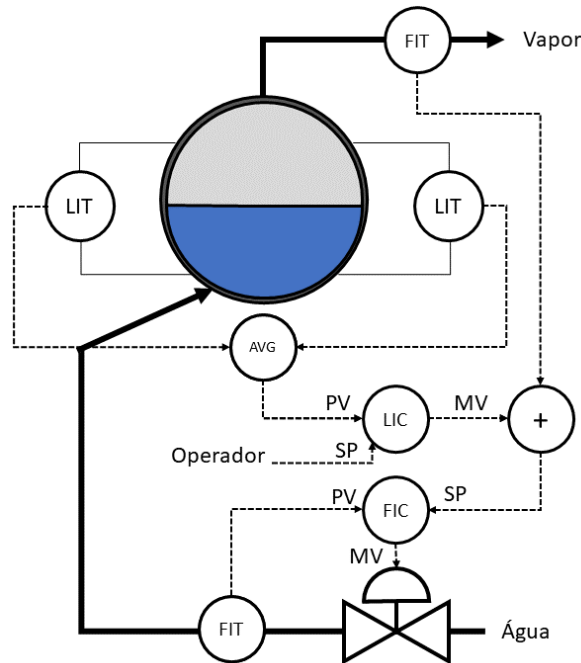
Este modelo funciona bem para cenários de baixa carga (principalmente em partidas de planta). No entanto, o cenário se torna mais complexo à medida que a demanda de vapor aumenta (RAJKUMAR; PRIYAA; GOBI, 2013). Caso a demanda de vapor aumente repentinamente, a pressão do interior do balão diminui, levando à expansão das bolhas que se formam no tubulão, resultando em uma leitura de nível mais elevada.

Respondendo ao controle de um elemento, a válvula (ou bomba) de alimentação diminui a vazão de água para o tubulão para manter o nível no *setpoint* desejado. No entanto, após a normalização da pressão do balão, o nível cairá repentinamente, solicitando uma maior vazão de água por parte do sistema de alimentação (CHAKRABORTY; MANNA; DEY, 2014). Em operação normal, as demandas de vapor são bastante dinâmicas, portanto o controle de um elemento acarretaria em uma operação relativamente instável.

Para solucionar este problema, utiliza-se o controle de três elementos. Representado pelo diagrama da Figura 30, esta abordagem de controle em cascata utiliza a leitura de nível, vazão de

vapor de saída e vazão de vapor de entrada, em dois controladores: um *feedforward*, que visa diminuir os impactos na variação de vapor, e um *feedback*, mantendo o nível estável próximo ao *setpoint* desejado (WU et al., 2010).

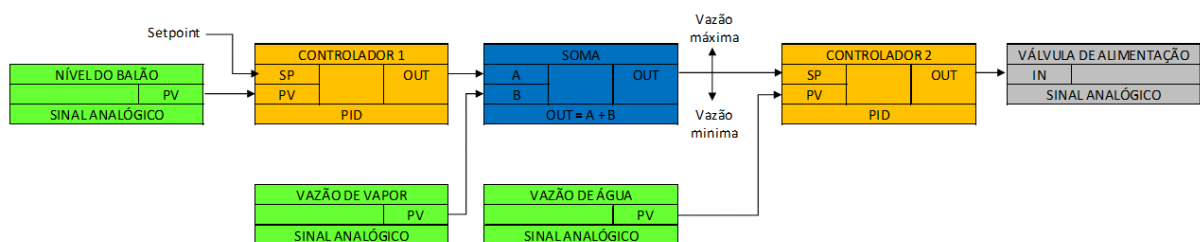
Figura 30 – Diagrama de controle de três elementos



Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, a variável de controle da malha LIC que, anteriormente, fazia a abertura e o fechamento da válvula de alimentação, é somada com uma entrada de distúrbio (FIT, *Flow Level Transmitter*, na saída de vapor). Este valor somado se torna o *setpoint* da segunda malha de controle, FIC, que controlará a válvula ao medir a vazão de água como variável de processo. Similarmente, o modelo de controle de três elementos pode ser representado pelo diagrama da Figura 31, onde se torna mais claro como estes elementos interagem entre si.

Figura 31 – Diagrama de blocos de controle de três elementos



Fonte: Elaborado pela autora.

4 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

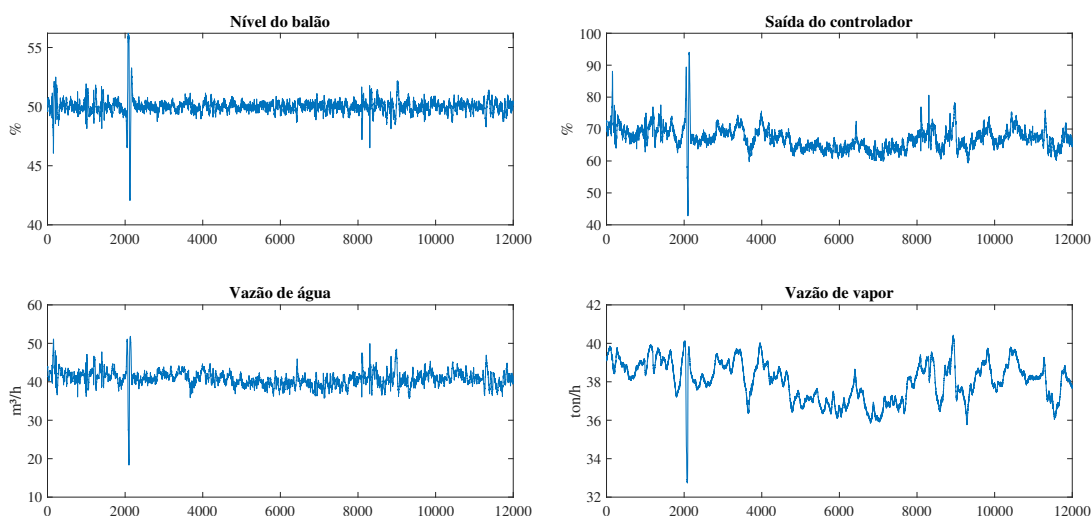
Neste capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada para a identificação do sistema e a comparação do sistema obtido com os dados reais colhidos dos transmissores instalados em uma caldeira aquatubular. A alimentação de água é feita por duas bombas (uma principal, uma *backup* de vazão máxima de $58m^3/h$, acionadas por um motor elétrico de $300cv$. As bombas são acionadas por inversor, mas operam sempre em 100%, sendo o controle de vazão de água feito por uma válvula controladora instalada na linha. O balão de vapor é um tanque cilíndrico de $1,5m$ de diâmetro interno e $5m$ de comprimento, operando com uma pressão de trabalho de $65bar$ e temperatura de $490^{\circ}C$, com capacidade de produção nominal de vapor de $40ton/h$. Os transmissores são utilizados para o sistema de alarme (caso apontem nível baixo ou alto), enquanto a proteção da caldeira (*trip*) é realizada por chaves de nível tipo flutuador magnético instaladas no balão (uma em cada ponta do tubulão). Os transmissores de vazão pertencentes a esta malha de controle (entrada de água e saída de vapor) são medidores de vazão tipo *vortex*, aplicados devido à sua alta durabilidade e precisão. A instalação também conta com dois transmissores de nível por coluna d'água (aplicação comum na indústria por gerarem maior precisão de medição com a presença de bolhas e confiabilidade, uma vez que existem dois sensores em redundância), instalados em lados opostos do tubulão, e a malha de controle utiliza a média simples das duas medições.

4.1 Coleta de dados

Os dados necessários foram coletados a partir do sistema PI utilizando a taxa de amostragem padrão (100 ms). Foram coletadas as medições de vazão de vapor na saída do balão (em ton/h), vazão de água na entrada do balão (em m^3/h), nível do balão (em porcentagem) e abertura da válvula de água (em porcentagem). Também foram colhidos dados de temperatura dos gases e da água do sistema para confirmar os períodos de funcionamento do sistema - estes dados não foram utilizados para análise. Por simplificação visual, não está exibido no gráfico o *setpoint* selecionado pela operação para o nível do balão, sendo fixo em 50%.

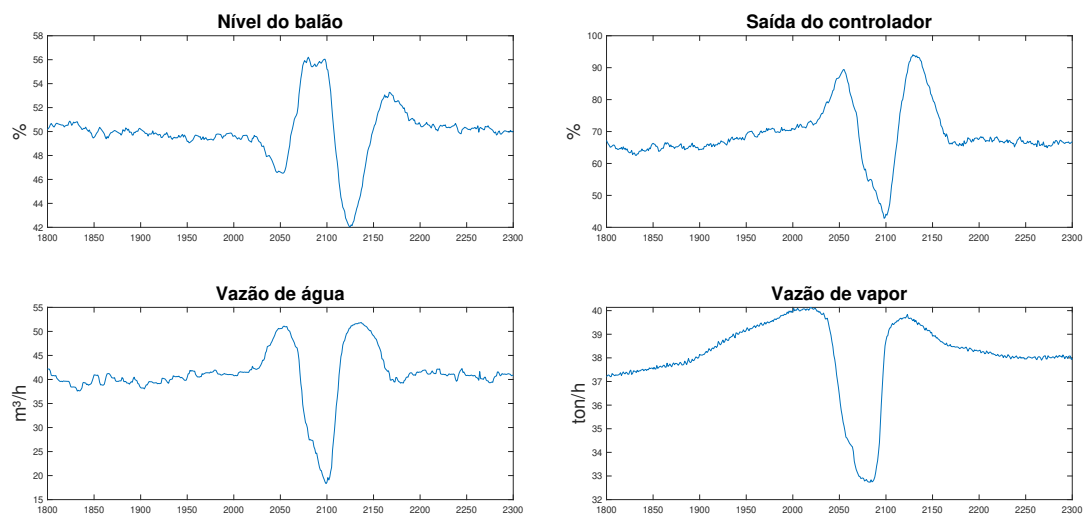
É perceptível que a variação de qualquer uma das grandezas exibidas na Figura 32 influencia a variação das demais grandezas. Caso a variável manipulada (saída do controlador) ficasse muito baixa, por exemplo, a válvula de controle de água iria fechar, diminuindo a vazão de água para o balão e, conseqüentemente, o nível de água dentro deste componente. O nível mais baixo do balão induz uma produção maior de vapor, aumentando a vazão de vapor de saída. O sistema de controle aplicado para o sistema visto na figura é o controle de um elemento, ou seja, somente o nível do balão é analisado em um *loop* de controle que define a variável manipulada.

Figura 32 – Dados reais medidos e coletados utilizando a interface PI



Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando com mais detalhes o período onde há uma variação súbita no sistema (entre $t = 1800s$ e $t = 2300s$), tem-se a Figura 33:

Figura 33 – Análise dos dados para $t = [1800,2300]$ 

Fonte: Elaborado pela autora.

É possível observar que há um aumento na demanda de vapor, iniciando aproximadamente em $t = 1800s$, no entanto essa variação não é sentida pelo sistema de controle uma vez que somente o nível do balão faz parte do laço de controle. O nível se mantém estável com o aumento da demanda de vapor, até que em aproximadamente $t = 2030s$, o nível do balão cai e o

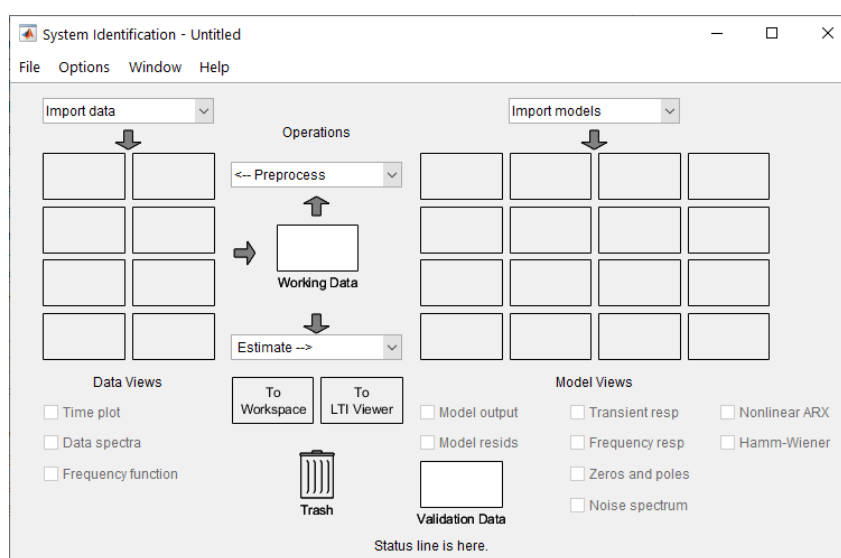
controlador reage, abrindo mais a válvula de controle e aumentando a vazão de água entrando no balão. O súbito aumento de nível faz o controlador reagir novamente, dessa vez fechando a válvula de controle, gerando outro pico de instabilidade no sistema.

Como abordado em capítulos anteriores, estas súbitas variações nas demandas de vapor são um dos principais problemas do controle de um elemento, que reage apenas corretivamente após o nível sair do *setpoint* desejado, em torno de 50%. A implementação de três elementos visa mitigar esse problema ao considerar a vazão de vapor como um distúrbio do sistema.

4.2 Identificação do sistema

Considerando o nível do balão como a entrada do controlador e a variação da abertura da válvula de controle como a saída do controlador, foi utilizado a ferramenta *System Identification* (Figura 34), parte da *System Identification Toolbox*TM do software MATLAB® para identificação da função de transferência do sistema.

Figura 34 – Ferramenta *System Identification*



Fonte: Elaborado pela autora.

Uma vez que a modelagem caixa cinza exige um conhecimento parcial dos parâmetros e equações que regem o sistema e considerando que em uma instalação industrial real que vem sofrendo modificações e melhorias ao longo dos anos a obtenção desses parâmetros é extremamente complexa, foi utilizada a modelagem caixa preta. Identificando um sistema discreto com taxa de amostragem de 100 ms, 11 polos e 10 zeros, obteve-se a função de transferência do sistema $H(z)$:

$$H(z) = \frac{Num(z)}{Den(z)}, \quad (15)$$

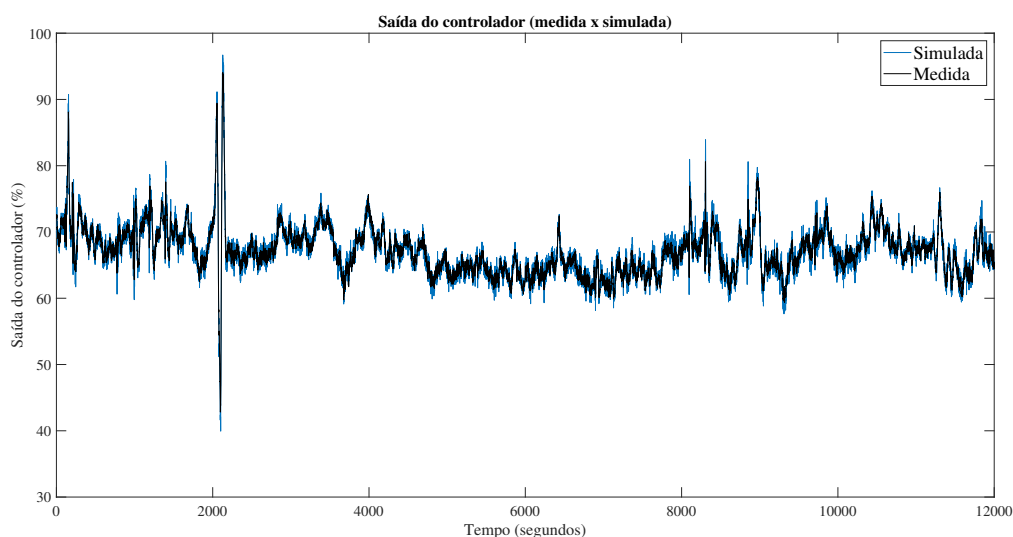
sendo $Num(z)$ e $Den(z)$ dados, respectivamente, pelas equações (16) e (17):

$$Num(z) = -5.3920z^{-1} + 0.9497z^{-2} + 2.9760z^{-3} - 4.6940z^{-4} + 4.5650z^{-5} + 4.4880z^{-6} - 1.8680z^{-8} + 2.8540z^{-9} + 4.0830z^{-10} - 7.9620z^{-11} \quad (16)$$

$$Den(z) = 1 + 0.3950z^{-1} - 0.3049z^{-2} - 0.0880z^{-3} - 0.5390z^{-4} - 1.1070z^{-5} - 0.2425z^{-6} - 0.1674z^{-7} - 0.2511z^{-8} + 0.5027z^{-9} + 0.5418z^{-10} + 0.2601z^{-11} \quad (17)$$

O número de polos e zeros foi selecionado com base em diversos testes, alterando o valor destes parâmetros a cada teste, assim como o número máximo de iterações, obtendo a maior correspondência possível com os dados colhidos do sistema real, de 75,89%. Embora não ideal, a identificação foi considerada suficiente uma vez que é possível observar a proximidade satisfatória entre os dois dados (Figura 35), com o sistema estimado apresentando um maior nível de instabilidade:

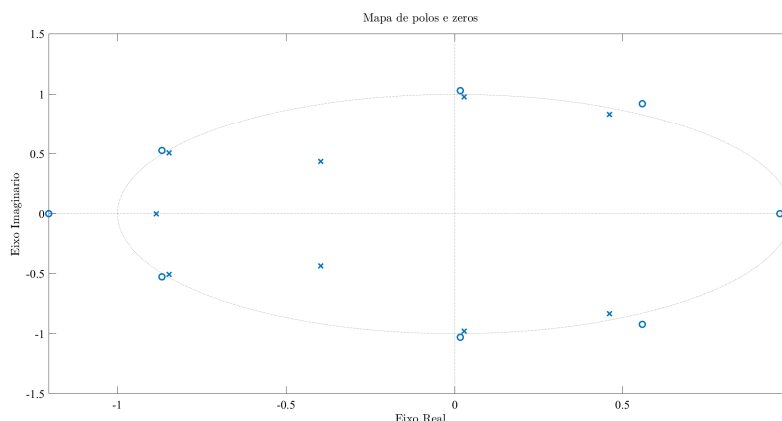
Figura 35 – Comparação entre dados medidos e estimados do sistema



Fonte: Elaborado pela autora.

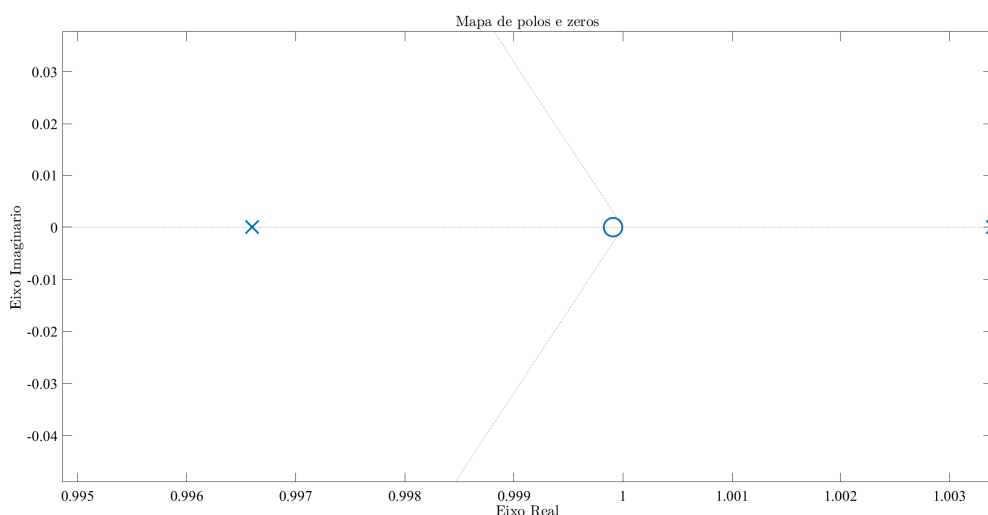
A função de transferência obtida foi analisada com o apoio de diversos diagramas e mapas normalmente utilizados pela área de controle. Inicialmente, foi verificado se o sistema em malha aberta atendia ao critério básico de estabilidade para sistemas discretos, conforme a Figura 36. O mapa de polos e zeros foi analisado em maiores detalhes, obtendo a Figura 37, onde se nota um polo fora do círculo de raio unitário, implicando em um sistema instável.

Figura 36 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado em malha aberta



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 37 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado em malha aberta



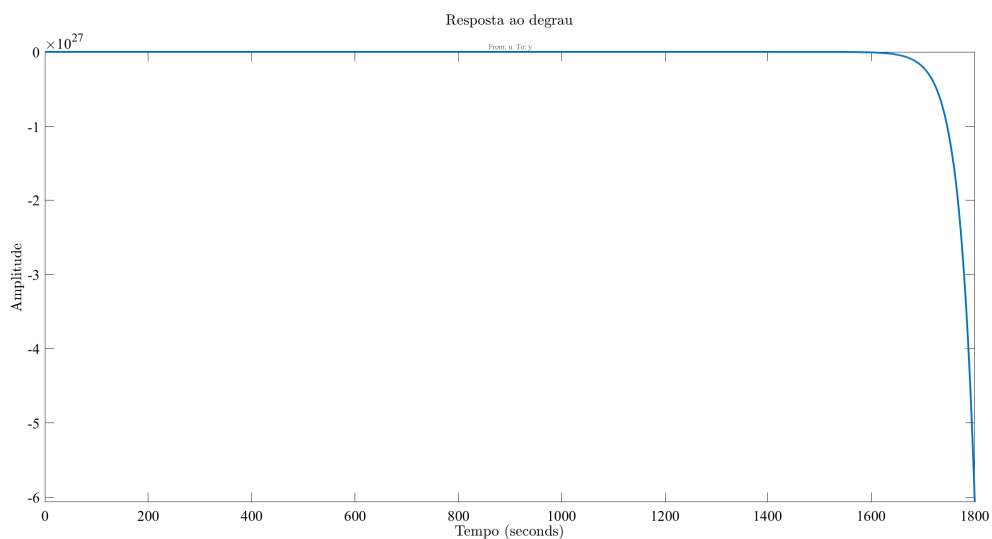
Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, a simulação do comportamento do sistema em resposta ao degrau obviamente resultaria em uma instabilidade, conforme exibido na Figura 38.

Para o sistema em malha fechada, obteve-se o mapa de polos e zeros conforme a Figura 39. Da mesma forma que para o sistema em malha aberta, observando os polos situados mais à direita do mapa, nota-se que o sistema é instável (Figura 40).

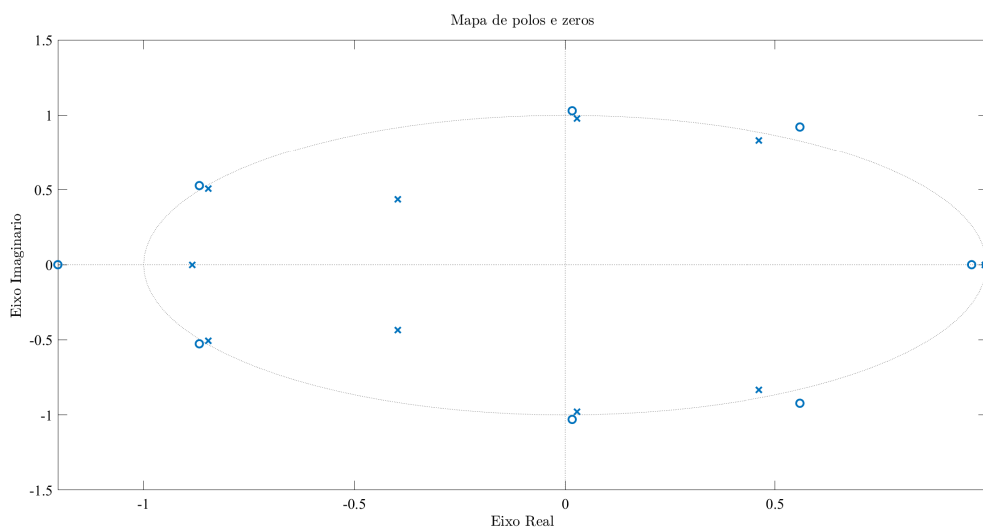
A existência do polo fora do círculo de raio unitário torna a seleção do controlador mais complexa, uma vez que os critérios precisam ser selecionados cuidadosamente para garantir a estabilidade. Além disso, analisando os diagramas de Bode do sistema em malha fechada, temos a Figura 41, onde nota-se uma grande atenuação para qualquer frequência acima de 0,001 rad/s.

Figura 38 – Resposta ao degrau do sistema identificado em malha aberta



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado em malha fechada



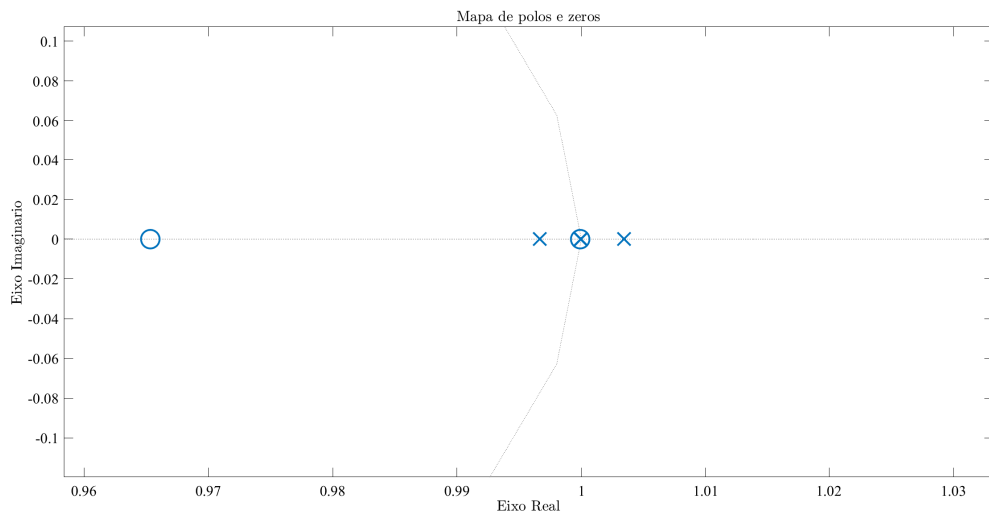
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 Primeiro critério: Ganhos de margem e fase

O primeiro critério foi selecionado visando a garantia da estabilidade do sistema. Utilizando o software MATLAB®, foi definido o sistema utilizando o seguinte código:

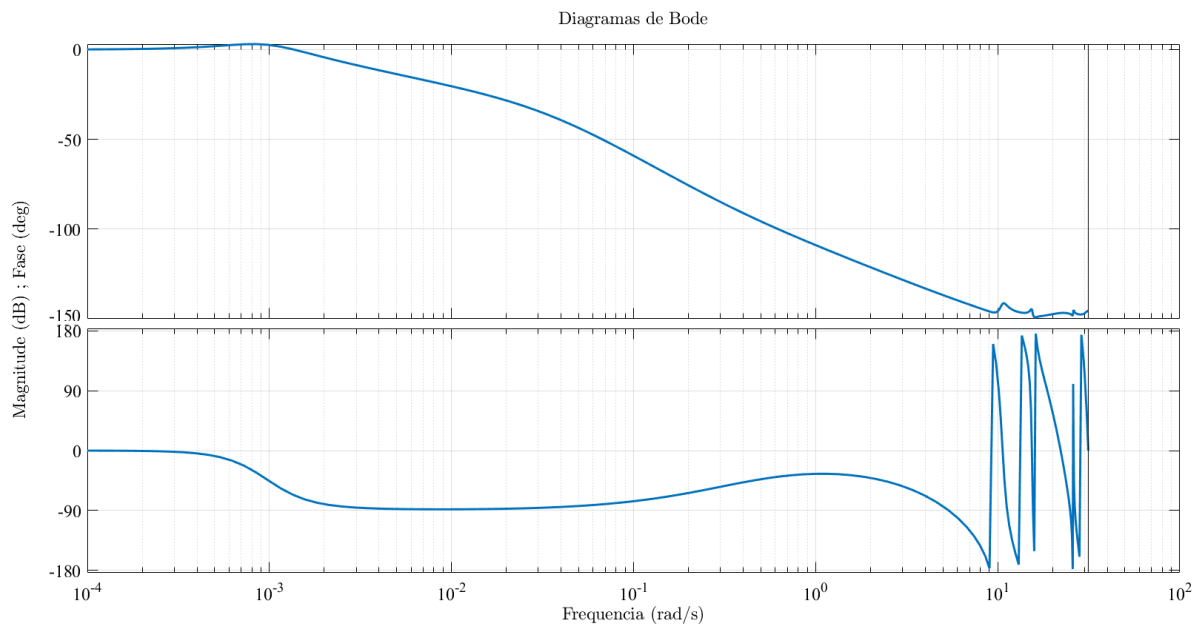
```
1 %Carregando dados identificados e taxa de amostragem
2 load('den.mat')
3 load('num.mat')
```

Figura 40 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado em malha fechada



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 41 – Diagramas de Bode do sistema identificado em malha fechada



Fonte: Elaborado pela autora.

```

4 time = 0.1;
5 %Definindo a variavel do sistema , saidas e entradas .
6 sistema = zpk(tf(num,den , time));
7 sistema.InputName = 'u';
8 sistema.OutputName = 'y';

```

```
9 %Definindo o primeiro controlador
10 C1 = tunablePID('C1','PI',time);
11 C1.Kp.Maximum = 50; C1.Kp.Minimum = 10;
12 %Definindo o segundo controlador
13 C2 = tunablePID('C2','PID',time);
14 %Definindo variaveis de entrada e saida do controlador 1
15 C1.InputName = 'u_c1';
16 C1.OutputName = 'y_c1';
17 %Definindo variaveis de entrada e saida do controlador 2
18 C2.InputName = 'u_c2';
19 C2.OutputName = 'u';
20 %Definindo o sistema em malha fechada
21 soma1 = sumblk('u_c1 = sp - y');
22 soma2 = sumblk('u_c2 = y_c1 + vaz_vap - vaz_ag');
23 ClosedLoop = connect(sistema,C2,soma2,C1,soma1,{'sp','vaz_vap',
    'vaz_ag'},'y','y');
24 %Definindo o ponto de analise onde os criterios serao
    analisados e
25 %garantidos
26 AP = getPoints(ClosedLoop);
```

O comando $tf(num, den, time)$ cria uma função de transferência a partir de um conjunto de polinômios (numerador, denominador e taxa de amostragem para sistemas discretos). A utilização do comando zpk é necessária para converter a transformada em um conjunto de zeros, polos e ganhos. Essa conversão é necessária para utilizar o comando *connect*, que estabelece o sistema completo em malha fechada.

Os controladores são definidos através do comando *tunablePID*, onde é atribuído um nome ao controlador, sua característica (proporcional-integral, proporcional, proporcional-derivativo, etc) e sua taxa de amostragem. É possível definir limites para os ganhos do controlador, conforme definido na linha 11 - esses limites foram escolhidos com base em conhecimento empírico. O comando *sumblk* estabelece as junções de soma utilizadas no diagrama de blocos.

Para uso do comando *connect*, que define o sistema em malha fechada, todos os controladores, sistema e junções do diagrama de blocos precisam ter suas saídas e entradas nomeadas. É importante manter uma consistência ao definir estes nomes, ou seja, se a entrada de um controlador é a saída de um sistema, ambas as variáveis precisam ter o mesmo nome. O comando também impõe qual variável será a saída do diagrama ("y", no caso do presente trabalho, o nível do balão) e o ponto de análise ("y").

A partir deste ponto são definidos os critérios desejados utilizando a *Control System*

*Toolbox*TM. Foi definido ganho de margem de 9 dB e ganho de fase de 45°, garantidos pelo controlador dentro de uma faixa de 1 a 20 rad/s.

```
1 %Definindo os criterios de ganho de margem e de fase para uma
   faixa de
2 %trabalho especifica (1 a 20 rad/s)
3 Req_Margem = TuningGoal.Margins(AP,9,45);
4 Req_Margem.Focus = [1 20];
5 %Definindo os criterios de ganho como "hard"
6 Req_Hard = [Req_Margem];
7 %Define opcoes de configuracao da ferramenta systune
8 opt = systuneOptions('RandomStart',10,'MaxIter',1000,'SoftTol',
   ,0.00001);
9 %Iniciando a ferramenta de tuning para obter os controladores
10 [CL,fSoft,gHard] = systune(ClosedLoop,[],Req_Hard,opt)
11 %Salvando o valor dos ganhos de cada controlador em variaveis
   para uso no
12 %Simulink
13 C1P = CL.Blocks.C1.Kp.Value;
14 C1I = CL.Blocks.C1.Ki.Value;
15 C1D = CL.Blocks.C1.Kd.Value;
16 C2P = CL.Blocks.C2.Kp.Value;
17 C2I = CL.Blocks.C2.Ki.Value;
18 C2D = CL.Blocks.C2.Kd.Value;
19 %Salva em vetores os dados obtidos de vazao de vapor e de agua
   para uso no
20 %Simulink
21 vapor = xlsread('Dados','B2:B12000');
22 agua = xlsread('Dados','D2:D12000');
```

Crítérios definidos como "*hard*" precisam, obrigatoriamente, ser atendidos para que o *solver* defina um conjunto de controladores como uma solução possível. Algumas opções da ferramenta *systune* foram ajustadas, como o número de condições iniciais aleatórias (por padrão, o *solver* executa somente uma otimização a partir das condições iniciais do sistema. No caso do código acima, linha 8, 10 condições iniciais foram definidas para otimizar a solução obtida. Além disso, o número máximo de iterações foi aumentado (de 300 para 1000) e as condições de tolerância também foram tornadas mais rígidas (definindo a função *SoftTol* para 0,00001 em comparação com o padrão de 0.001), resultando em um processo de *tuning* mais lento, porém mais otimizado.

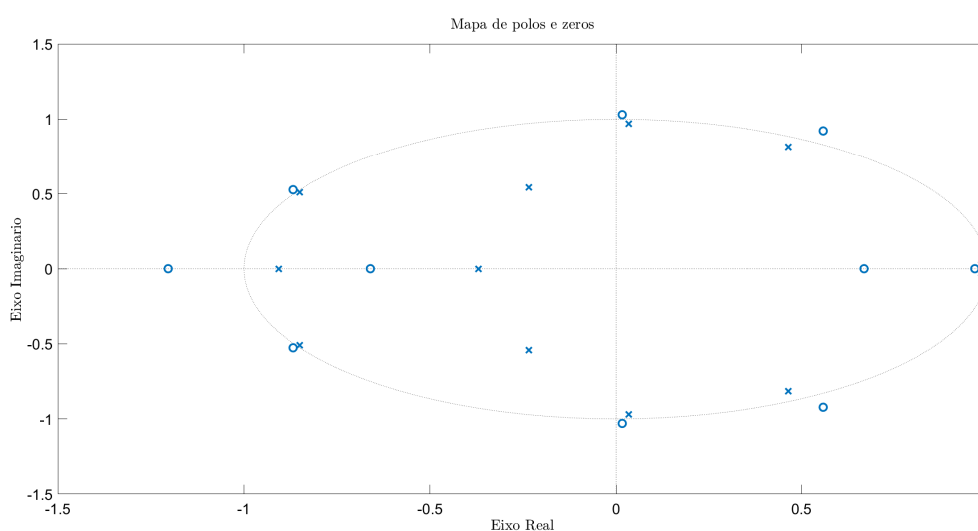
As linhas de código ao final definem as variáveis que serão utilizadas no software

*Simulink*TM para simulação dos resultados do sistema. Os seguintes controladores foram obtidos para este critério:

$$\begin{aligned} C1(z) &= 14,8411 + 2,68 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{0,1}{z-1} \right) \\ C2(z) &= -0,0018 + -6,69 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0,1}{z-1} \right) + 4,44 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{z-1}{0,1 \cdot z} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

Para este controlador, foi obtido o mapa de polos e zeros da Figura 42, onde observa-se, pela Figura 43, que foi possível ajustar o sistema de forma que o polo mais próximo da instabilidade ainda se situasse na região interna do círculo de raio unitário.

Figura 42 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado para o primeiro controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

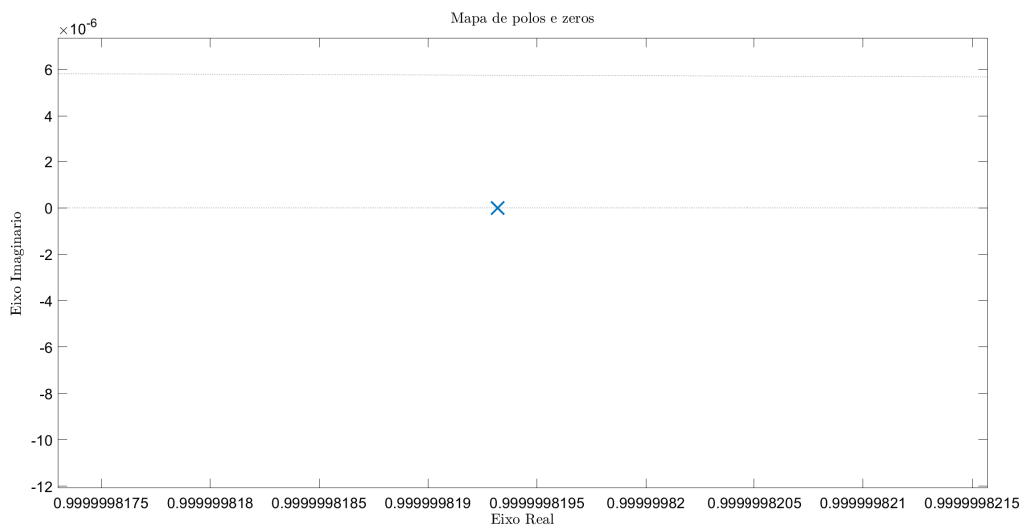
Tendo, assim, um sistema estável, como também é possível observar pela resposta ao degrau deste sistema em malha fechada, conforme Figura 44.

Embora o sistema não estabilize rapidamente para os distúrbios presentes (variações na vazão de vapor e de água), estes distúrbios são transitórios, de forma que isso não apresenta uma dificuldade para o controle do conjunto.

Para comparação, também foram gerados os diagramas de Bode deste sistema (Figura 45). Nota-se que a atenuação do sinal começa a surgir em frequências muito maiores em comparação com o sistema mostrado na Figura 41, além de apresentar valores menores de atenuação.

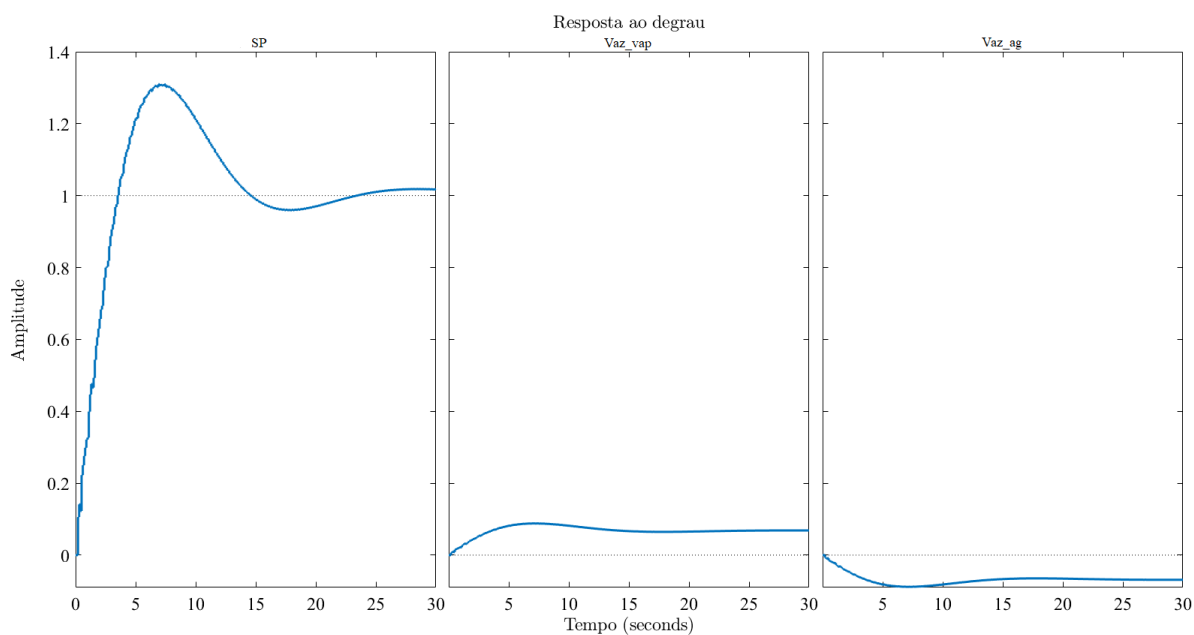
Para teste do desempenho do controlador, acompanhando como os distúrbios afetam o sistema, um modelo de simulações foi desenvolvido na plataforma *Simulink*TM, conforme Figura 46.

Figura 43 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado para o primeiro controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 44 – Resposta ao degrau do sistema identificado para o primeiro controlador

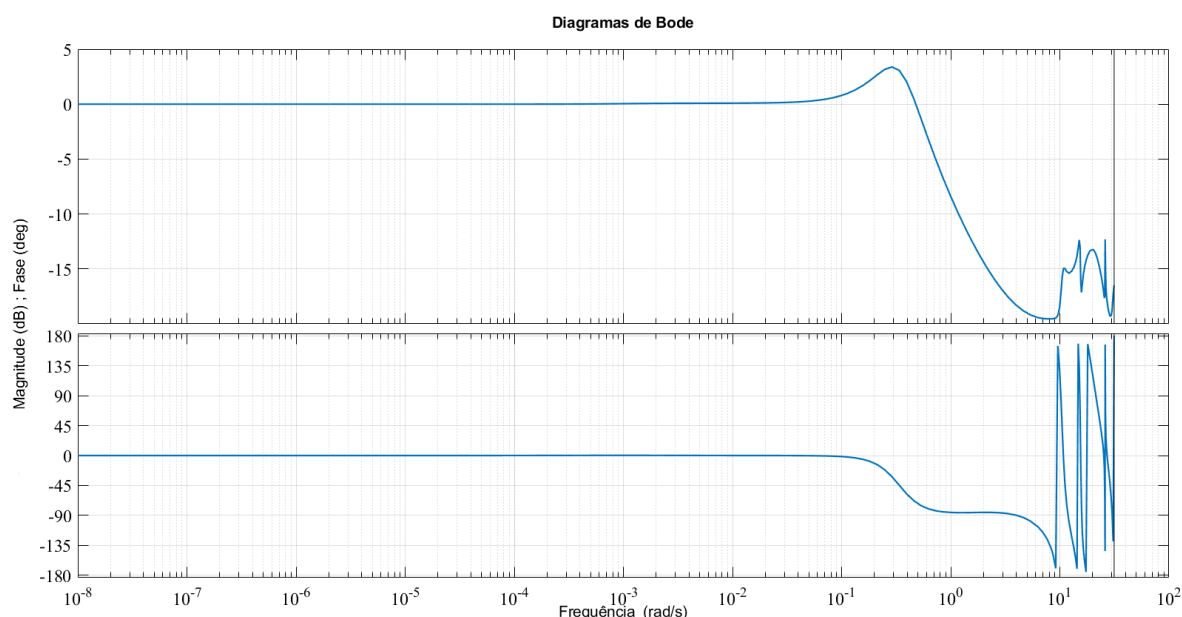


Fonte: Elaborado pela autora.

O *setpoint* foi inserido como uma rampa suavizada de forma a simular, aproximadamente, o procedimento de partida suave da unidade de geração de vapor. A simulação gerou o resultado exibido na Figura 47.

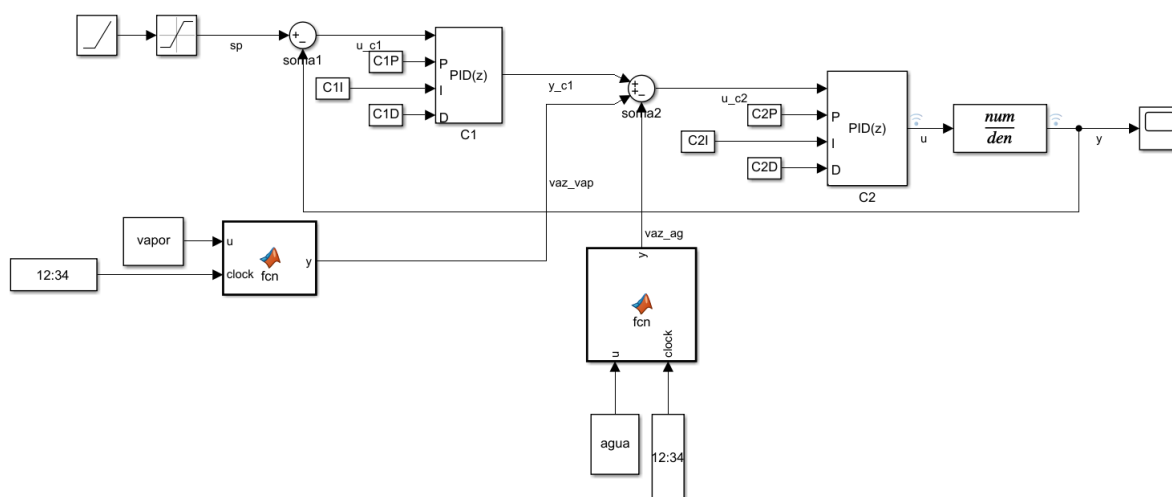
Nota-se que o controlador se manteve estável ao longo do período de simulação, mesmo sob influência das variáveis de distúrbio. A Figura 48 exibe a comparação entre o resultado

Figura 45 – Diagramas de Bode do sistema identificado para o primeiro controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 46 – Diagrama de blocos desenvolvido na plataforma *Simulink*TM

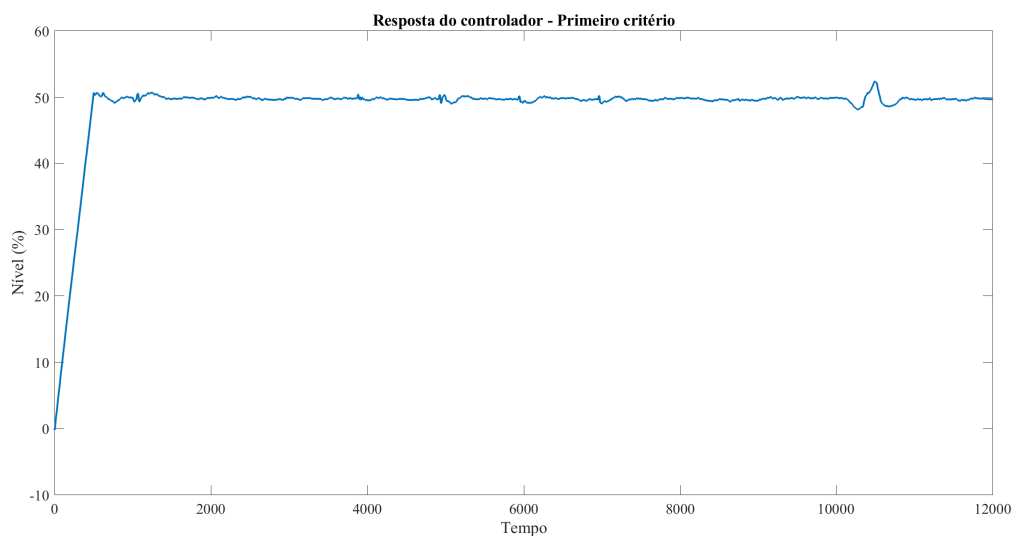


Fonte: Elaborado pela autora.

obtido em simulação e o nível real medido no sistema.

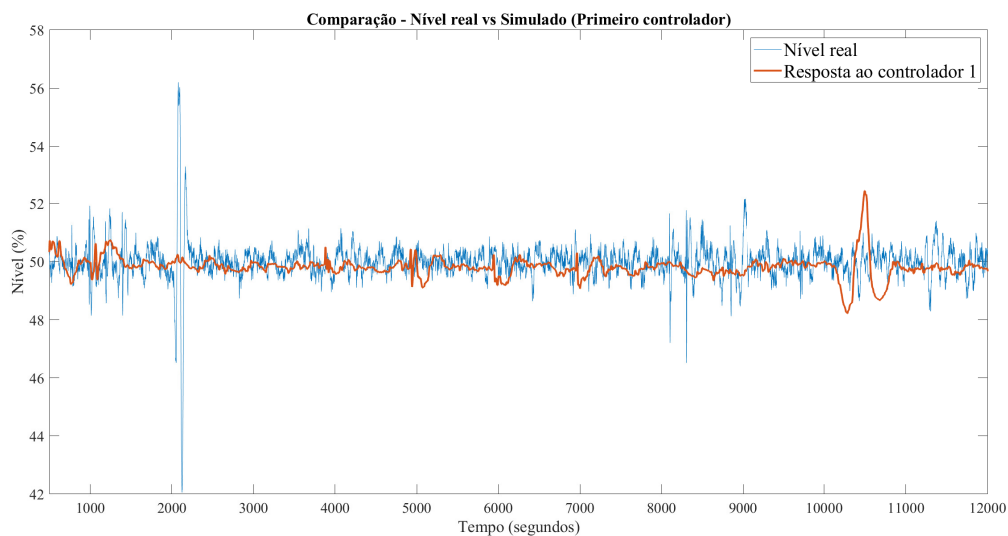
O controlador simulado apresenta uma resposta mais suavizada em comparação com o nível medido no sistema real, principalmente no ponto de instabilidade analisado anteriormente (Figura 33). No entanto, há um outro momento de variação súbita na variável de processo entre os pontos $t = 10100s$ e $t = 10800s$. Assim, outros critérios foram selecionados para mitigar esta variação.

Figura 47 – Resposta do primeiro controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 48 – Comparação entre sistema real e simulado - Primeiro controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

4.4 Segundo critério: Taxa de amortecimento

Desejando diminuir os períodos de variação após um distúrbio, foi definido o critério da taxa de amortecimento da seguinte maneira:

- 1 %Definindo a taxa de amortecimento
- 2 Req_Poles = TuningGoal.Poles(AP,0,0.5,Inf);
- 3 %Estabelecendo a taxa de amortecimento como um critério soft

```

4 Req_Soft = [ Req_Poles ];
5 %Iniciando o systune com criterios hard e soft
6 [CL, fSoft , gHard] = systune ( ClosedLoop , Req_Soft , Req_Hard , opt ) ;

```

A importação de variáveis, definição do sistema e dos critérios "hard" foram mantidos idênticos ao controlador anterior e foram omitidos desta seção. Critérios "soft" são aqueles que o *solver* deve almejar, mas não necessariamente atender, para definir um conjunto de controladores como uma solução possível.

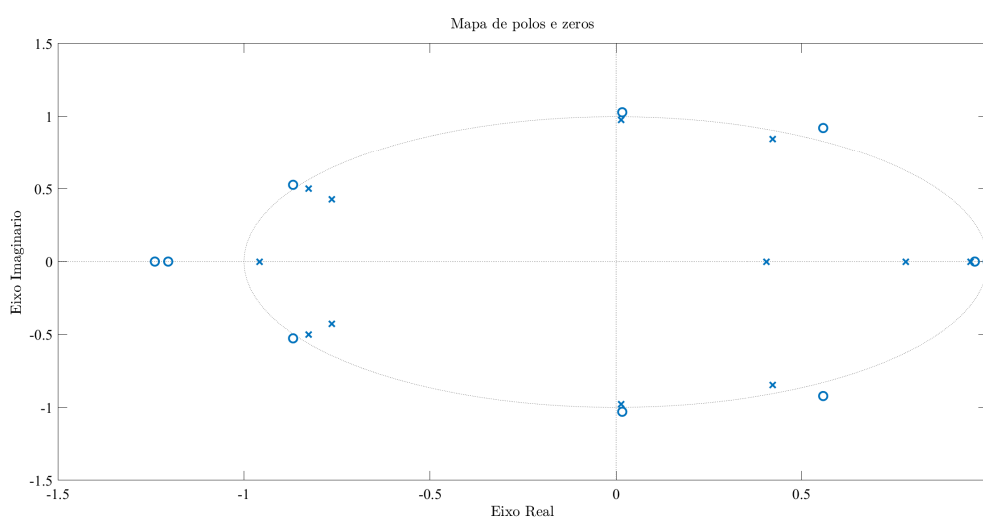
A sintaxe de *TuningGoal.Poles* pode definir requisitos de taxa de decaimento (0 para o critério utilizado neste trabalho), taxa de amortecimento (configurado em 0,5) e máxima frequência natural dos polos em malha fechada (o uso de *inf* neste requisito significa que não há restrições de frequência). Estes critérios são garantidos para o ponto de análise AP que, para o presente projeto, trata-se da saída de sistema *y*, ou seja, a variável de processo.

O *solver* obteve os controladores definidos em (19) como uma solução válida:

$$\begin{aligned}
 C1(z) &= 30,0021 + 3,00 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{0,1}{z-1} \right) \\
 C2(z) &= 1,68 \cdot 10^{-4} - 0,02 \cdot \left(\frac{0,1}{z-1} \right) - 1,20 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{z-1}{0,1 \cdot z} \right)
 \end{aligned} \tag{19}$$

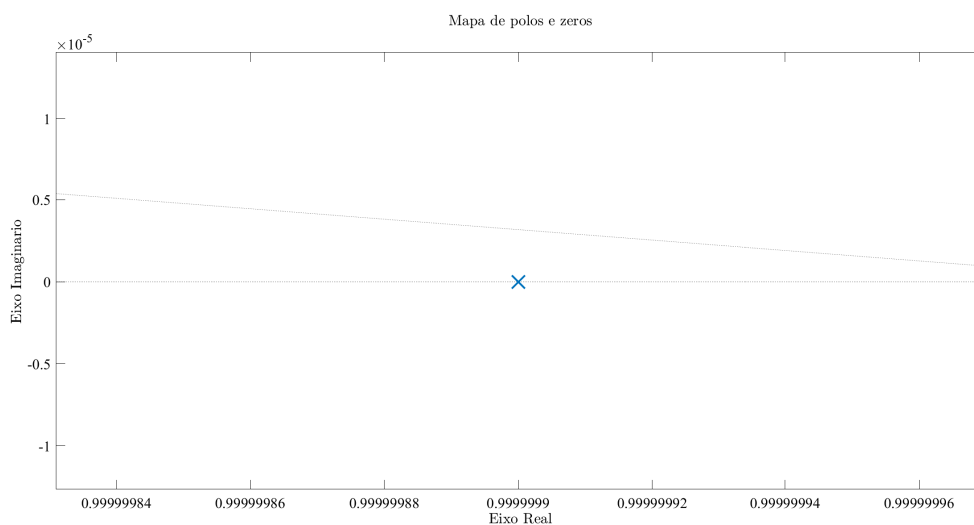
Como o critério de margem de ganho e fase se manteve como um requisito do tipo "hard", espera-se que o controlador se mantenha estável, uma vez que a margem de ganho e fase são garantidas enquanto a taxa de amortecimento é uma condição desejada. As Figuras 49 e 50 mostram que todos os polos mantiveram-se dentro do círculo de raio unitário.

Figura 49 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado para o segundo controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

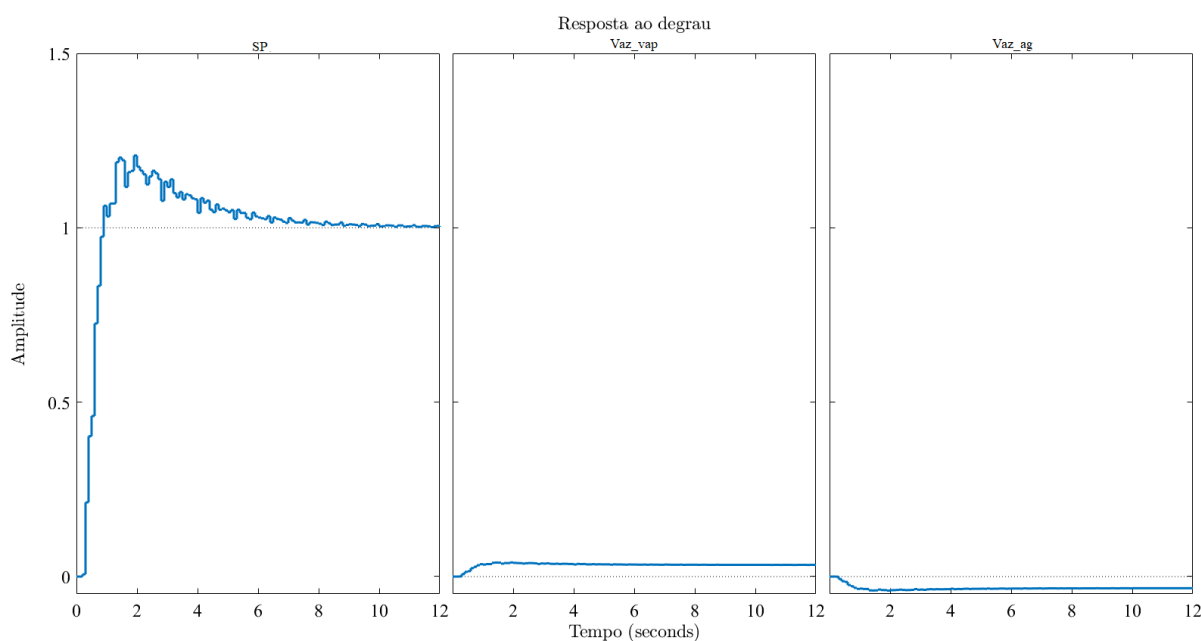
Figura 50 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado para o segundo controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

Os controladores definidos em (19) resultaram na resposta ao degrau presente na Figura 51, onde há uma menor variação no sistema após aplicação do degrau, como desejado e definido pelo critério da taxa de amortecimento. Também obteve-se a estabilidade do sistema mais rapidamente (menos da metade do tempo anterior).

Figura 51 – Resposta ao degrau do sistema identificado para o segundo controlador

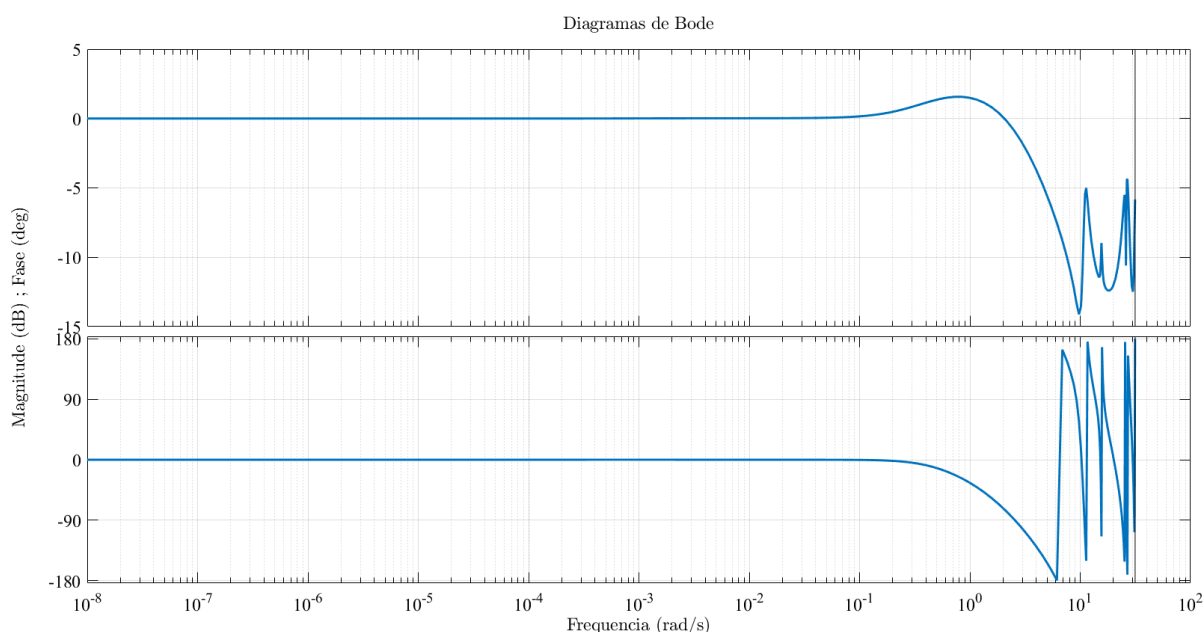


Fonte: Elaborado pela autora.

Pelos diagramas de Bode do sistema, dado pela Figura 52, é perceptível que a atenuação

é ainda menor se comparado com o primeiro controlador, que atendia somente ao requisito de margens de ganho e fase. Também há uma diminuição do efeito de amplificação do sinal nas frequências próximas a 1 rad/s se comparado ao diagrama da Figura 45.

Figura 52 – Diagramas de Bode do sistema identificado para o segundo controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

Simulando o sistema utilizando o diagrama de blocos da Figura 46, foi obtido o resultado da Figura 53, com comportamento bastante similar ao primeiro controlador simulado. Para comparação desta implementação com a anterior, foi gerada a Figura 54, onde é perceptível que, no ponto de maior variação, o controlador sem a taxa de amortecimento implementada sofreu uma variação de aproximadamente 3,5%, enquanto para o segundo controlador, a variação foi de 2%.

4.5 Terceiro critério: Porcentagem de *Overshoot*

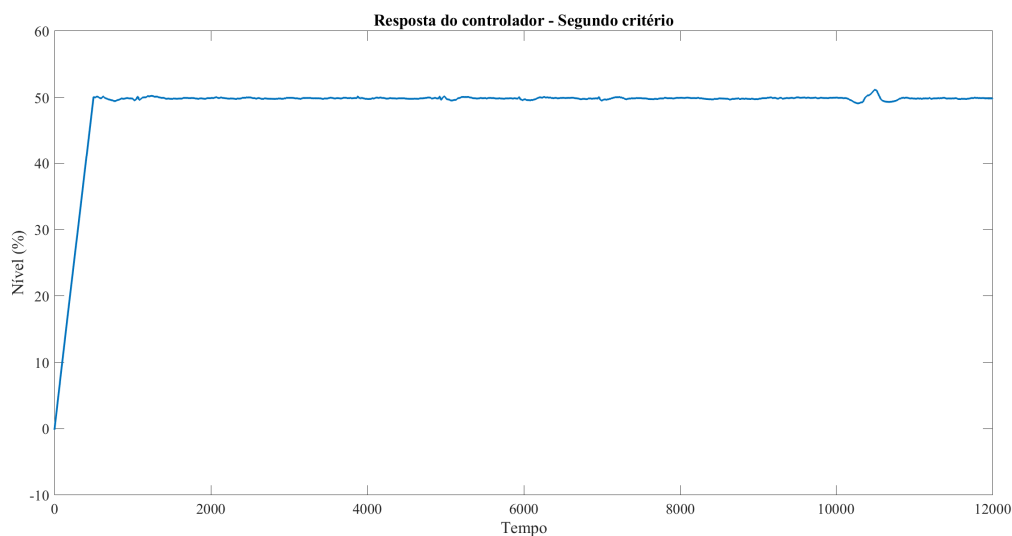
De forma similar aos demais controladores, o terceiro critério foi inserido em ambiente MATLAB® mantendo a configuração para o sistema e critérios já abordados anteriormente, com o acréscimo de um terceiro critério:

```

1 %Limitando porcentagem maxima de overshoot para a entrada sp e
  %disturbios
2 Req_Over_SP = TuningGoal.Overshoot('sp','y',0.05);
3 Req_Over_Agua = TuningGoal.Overshoot('vaz_ag','y',0.1);
4 Req_Over_Vapor = TuningGoal.Overshoot('vaz_vap','y',0.1);
5 %Definindo novos criterios soft

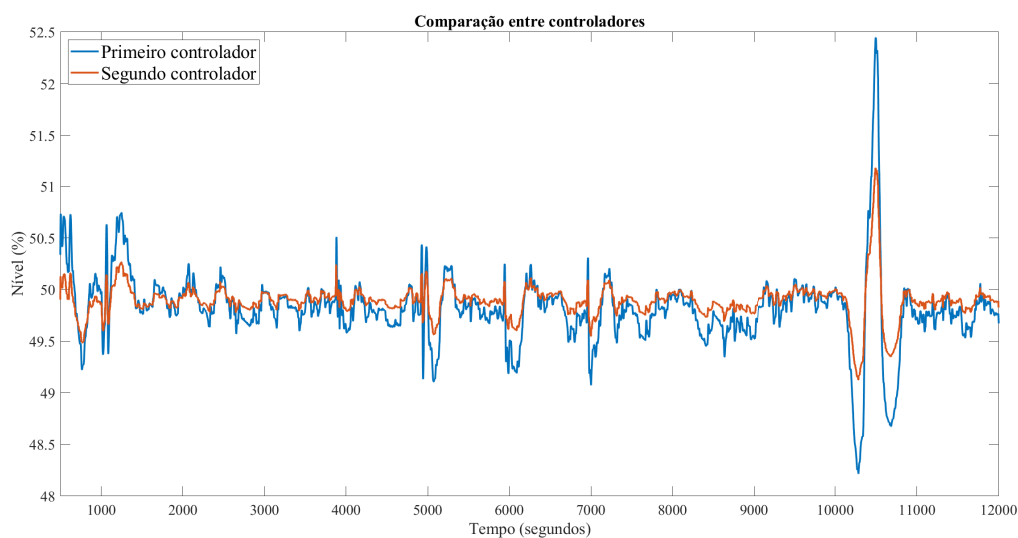
```

Figura 53 – Resposta do segundo controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 54 – Comparação da resposta entre o primeiro e segundo controladores



Fonte: Elaborado pela autora.

```
6 Req_Soft = [ Req_Poles , Req_Over_Agua , Req_Over_SP , Req_Over_Vapor  
];
```

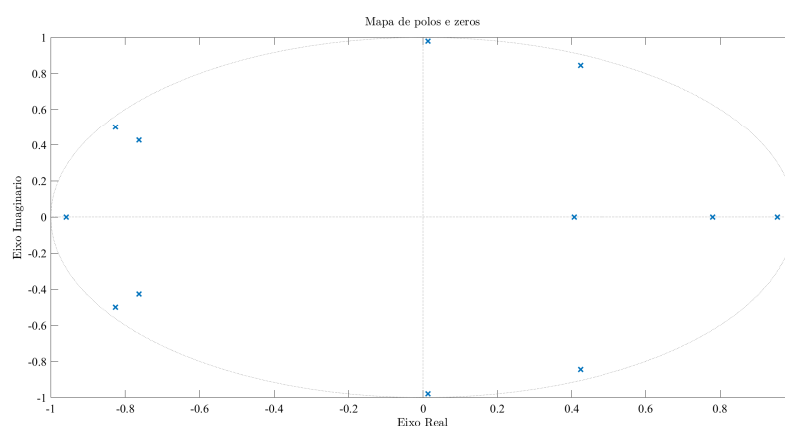
A sintaxe de *TuningGoal.Overshoot* permite que um limite de *overshoot* seja aplicado para uma determinada entrada com respeito a uma determinada saída. No caso do código acima, a entrada *sp* e os distúrbios *vaz_{ag}* e *vaz_{vap}* foram limitados com respeito à saída *y* do sistema, com um valor máximo de 0,05% para a entrada e 0,1% para os distúrbios. Este é um requisito

"soft", assim como o requisito de taxa de amortecimento, significando que o *solver* tentará atingir essa restrição o máximo possível, mas poderá encontrar uma solução que não garanta completamente a satisfação do critério. O critério "hard" se mantém como margens de ganho e de fase, obtendo-se o par de controladores da equação (20):

$$\begin{aligned} C1(z) &= 49.8777 + 4.99 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{0,1}{z-1} \right) \\ C2(z) &= -7.24 \cdot 10^{-6} - 0.01 \cdot \left(\frac{0,1}{z-1} \right) + -7.24 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{z-1}{0,1 \cdot z} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

Obteve-se um sistema estável, como indicado pelas Figuras 55, 56 e 57. Há uma pequena diferença na amplitude da resposta ao degrau dos distúrbios se comparados com o controlador anterior devido à limitação do *overshoot*.

Figura 55 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado para o terceiro controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

Assim como as análises apresentadas acima, os diagramas de Bode para este controlador (Figura 58) também apresentaram comportamento muito similar ao segundo controlador.

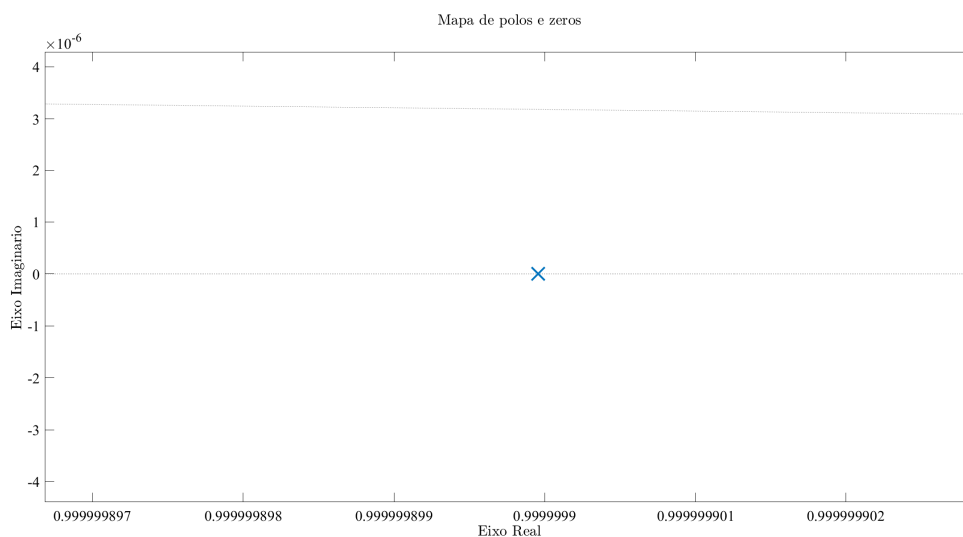
Para validação do critério, o sistema em malha fechada foi simulado e obteve os resultados expostos nas Figuras 59 e 60.

Novamente, foi possível diminuir a variação no ponto de maior instabilidade (entre $t = 10100s$ e $t = 10800s$), de 2% para 1%. Para validação final, este sistema foi comparado com o comportamento do sistema real, conforme Figura 61.

Portanto, a utilização dos três critérios (margens de ganho e fase, taxa de amortecimento e limitação do *overshoot*) garantiu um sistema com maior estabilidade em torno do ponto desejado de operação do balão.

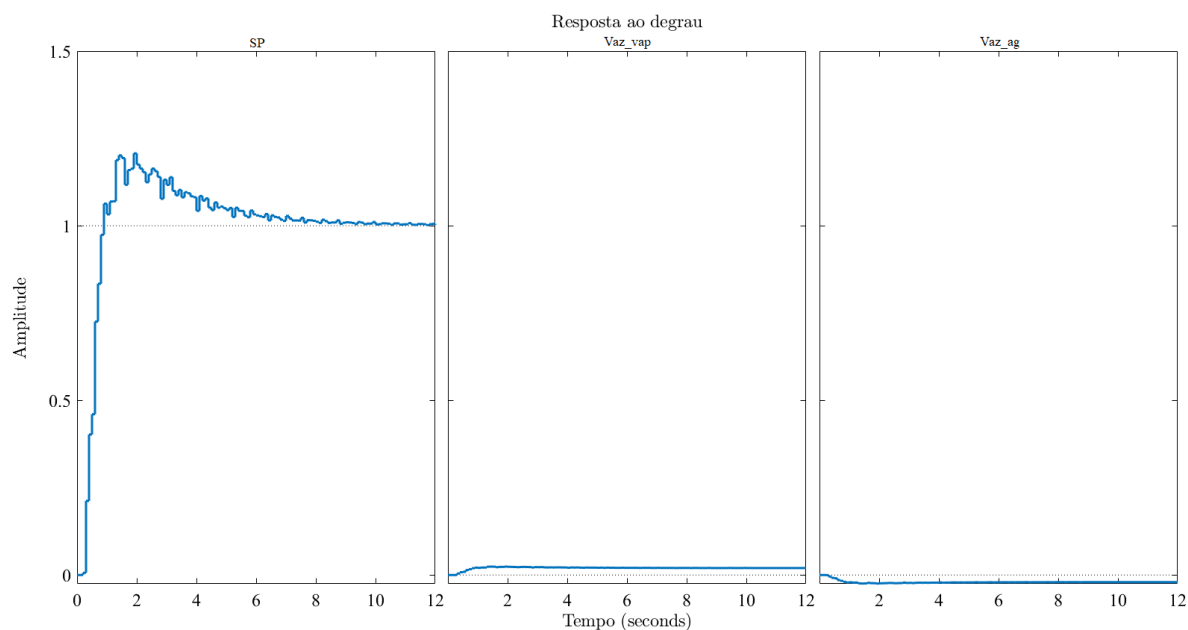
A estabilidade se manteve mesmo durante períodos de maior variação no sistema, com aumento da demanda de vapor. Este comportamento é esperado por se tratar exatamente da

Figura 56 – Mapa de polos e zeros do sistema identificado para o terceiro controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

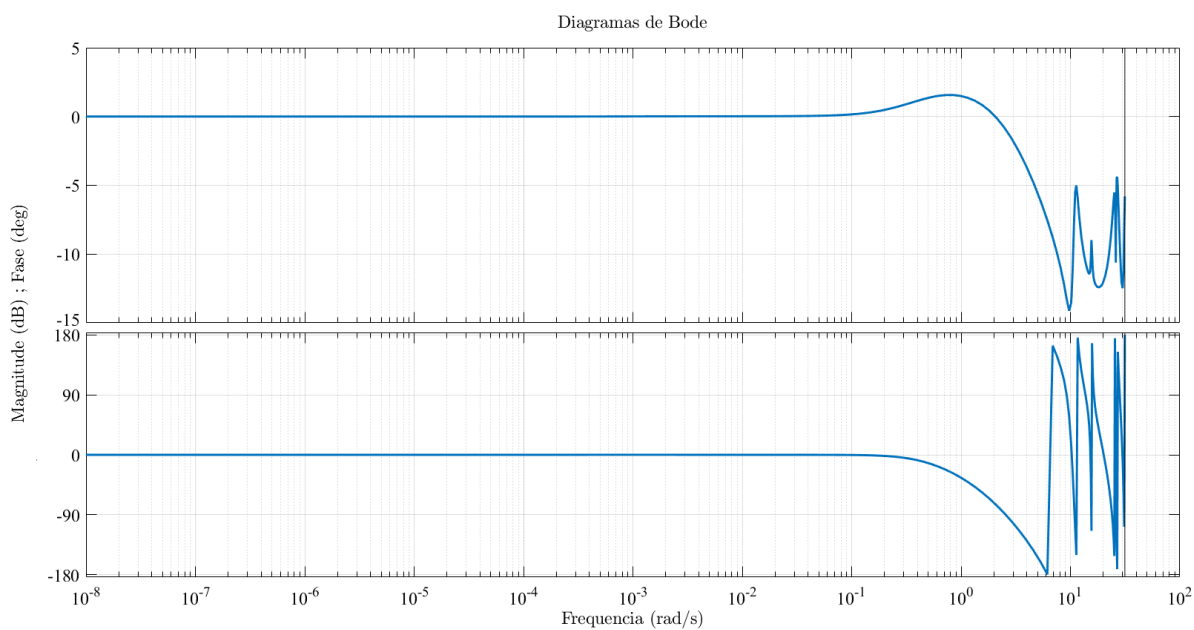
Figura 57 – Resposta ao degrau do sistema identificado para o terceiro controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

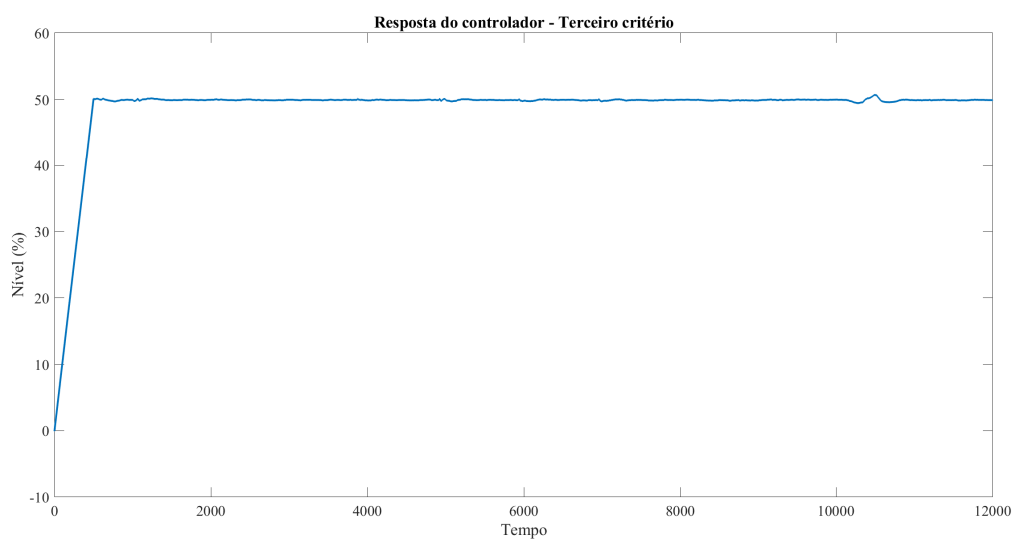
proposta do controle em três elementos, onde a malha em *feedforward* busca prever distúrbios - neste caso, comportamentos dinâmicos na vazão de vapor de saída - e ajustar o comportamento da variável manipulada de acordo.

Figura 58 – Diagramas de Bode do sistema identificado para o terceiro controlador



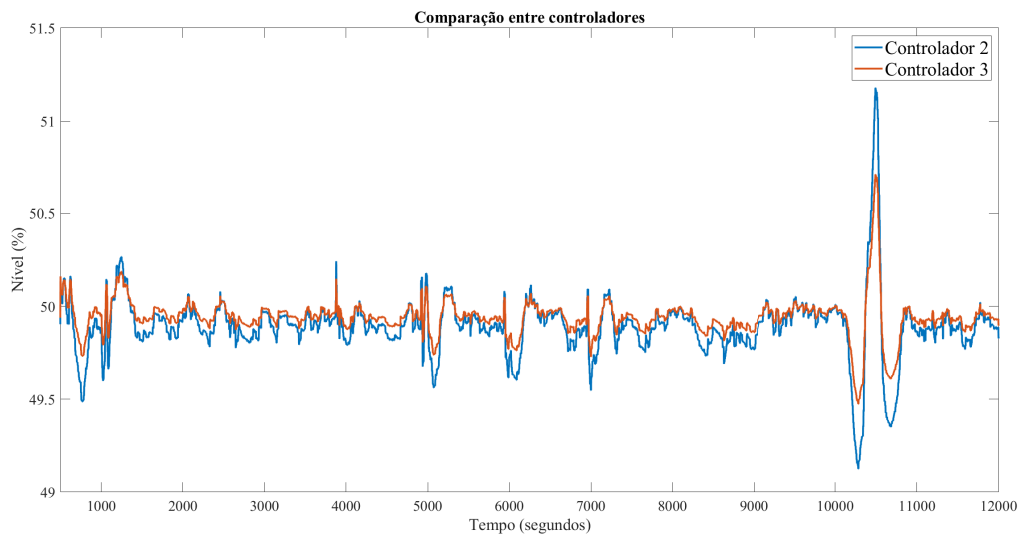
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 59 – Resposta do terceiro controlador



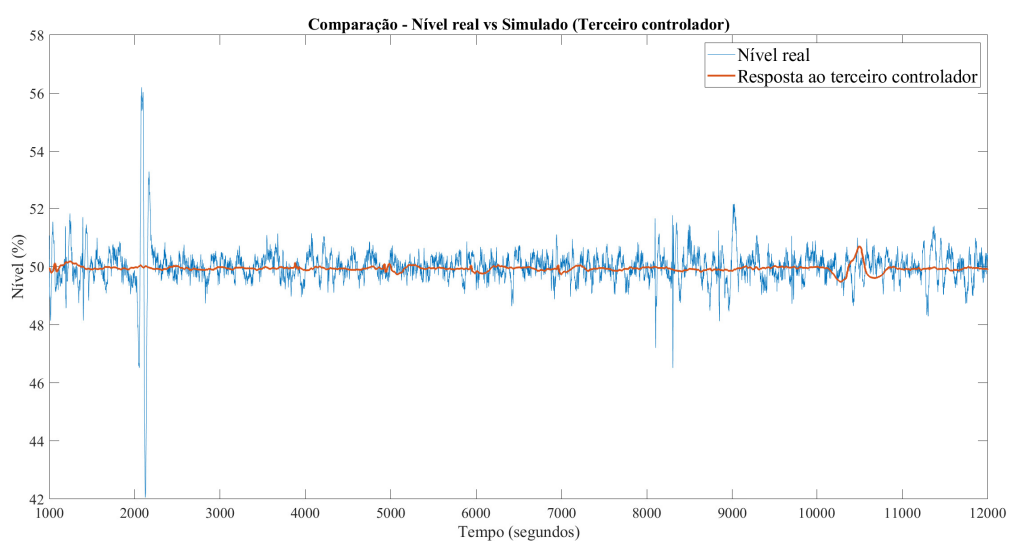
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 60 – Comparação da resposta entre o segundo e terceiro controladores



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 61 – Comparação entre sistema real e simulado - Terceiro controlador



Fonte: Elaborado pela autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou a identificação de um sistema real de controle de nível de tubulão de vapor de uma caldeira aquatubular, com o projeto de uma modelagem de controle muito aplicada para este sistema, o controle de três elementos.

Os dados necessários foram coletados de um sistema supervisorio através da interface *PI System*, utilizando o suplemento para Excel *PI Datalink*. Os dados coletados apontam oscilações e distúrbios no sistema, conforme visto na Figura 32. Esta malha utiliza controle de um elemento, que conforme visto na Figura 33, acarreta em variações indesejadas no nível do balão durante aumento da demanda de vapor, que ocorrem frequentemente ao longo da operação da planta (CHAKRABORTY; MANNA; DEY, 2014).

Para a solução do problema, frequentemente é aplicada uma malha de controle de três elementos (RAJKUMAR; PRIYAA; GOBI, 2013), que utiliza dois controladores tipo PID em cascata, um *feedback* e um *feedforward*, buscando manter o nível próximo ao *setpoint* enquanto prevê mudanças no nível causadas por variações na vazão de vapor.

Para o projeto dos controladores, os dados coletados foram utilizados para identificação do sistema pelo software MATLAB®, obtendo um sistema discreto de 11 polos e 10 zeros, mantendo a taxa de amostragem da coleta dos dados (100ms), definido pelas equações (15), (16) e (17). Utilizando a modelagem caixa preta, a correspondência com os dados do sistema foi de 75,89%.

Desenvolvendo, na plataforma MATLAB®, o sistema demonstrado pelo diagrama da Figura 30, o projeto dos controladores utilizando diferentes critérios (margens de ganho e fase, taxa de amortecimento e porcentagem de *overshoot*), e simulando os controladores obtidos no MATLAB® *Simulink*™, obteve-se um controlador com resposta ao degrau bastante satisfatória, mitigando oscilações de sistema, conforme Figura 57. Em comparação com o sistema real (Figura 61), nota-se que a oscilação do sistema diminuiu, principalmente no ponto de maior variação onde anteriormente foi identificado uma maior demanda de vapor impactando no nível do balão.

Dado que a variação do nível do tubulão de vapor, descrita por (CHEW et al., 2017), é uma forte preocupação de processo em unidades de geração de vapor devido à criticalidade do componente (por sua importância para o sistema e por suas características de operação que podem gerar falhas, com risco de fatalidade, caso não bem controladas (EYERS, 1955)), aponta-se a aplicabilidade, em relação à facilidade e eficiência, do controlador de três elementos.

Ressalta-se que o presente trabalho buscou apresentar ferramentas práticas para aplicação em controle de processos industriais, com foco na compreensão dos componentes que fazem parte da unidade de geração de vapor e em como utilizar as ferramentas de identificação e projeto.

5.1 Perspectivas futuras e contribuições

Possíveis trabalhos futuros incluem:

- Aplicação das ferramentas de identificação de sistemas e projeto de controladores em outros processos, validando a eficácia das ferramentas apresentadas.
- Projeto, em sistema supervisório de bancada, do sistema e controlador obtidos neste trabalho, aprofundando a conexão entre indústria e aprendizados da graduação.
- Aperfeiçoar a identificação do sistema utilizando modelagem caixa cinza, onde se conhece parcialmente algumas equações ou parâmetros do sistema.
- Aplicar outros critérios de restrição de controladores disponíveis na ferramenta *Control System Tuner Toolbox* para comparação dos resultados de diferentes controladores.

REFERÊNCIAS

- ABB. *Compact orifice flowmeter OriMaster FPD500*. 2023. Disponível em: <https://new.abb.com/products/measurement-products/flow/differential-pressure-flowmeters/compact-dp-flowmeters/fpd500-compact-orifice-flowmeter>. Citado na página 38.
- AGUIRRE, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas–Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. [S.l.]: Editora UFMG, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 14.
- ANKLIN, M.; DRAHM, W.; RIEDER, A. Coriolis mass flowmeters: Overview of the current state of the art and latest research. *Flow Measurement and Instrumentation*, Elsevier, v. 17, n. 6, p. 317–323, 2006. Citado na página 38.
- ASSUNÇÃO, E. *Controle Linear: Controle discreto*. Ilha Solteira: Edvaldo Assunção, 2020. v. 3. Citado na página 16.
- ASSUNÇÃO, E.; TEIXEIRA, M. *Controle Linear II*. Ilha Solteira: Edvaldo Assunção and Marcelo Teixeira, 2016. v. 1. Citado na página 18.
- ASSUNÇÃO, E.; TEIXEIRA, M. *Controle Linear: Sistemas contínuos e discretos no tempo*. Ilha Solteira: Edvaldo Assunção, and Marcelo Teixeira, 2018. v. 1. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 20.
- BARBOSA, C. et al. Failure analysis of an aqua tubular boiler tube. *Journal of failure analysis and prevention*, Springer, v. 12, p. 654–659, 2012. Citado na página 24.
- BENNETT, S. A brief history of automatic control. *IEEE Control Systems Magazine*, IEEE, v. 16, n. 3, p. 17–25, 1996. Citado na página 11.
- BENNETT, S. The past of pid controllers. *Annual Reviews in Control*, Elsevier, v. 25, p. 43–53, 2001. Citado na página 11.
- BIZZO, W. A. *Geração, distribuição e utilização de vapor*. Campinas: FEM/Unicamp, 2003. Citado na página 26.
- BME. *Desaeradores*. 2019. Disponível em: <https://bmese.com.br/produtos/desaeradores-termicos/>. Citado na página 28.
- BOTELHO, M. H. C.; BIFANO, H. M. *Operação de caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção*. Rio de Janeiro: Editora Blucher, 2015. Citado na página 27.
- BOULDER, C. *Emerson Introduces New 2-Wire Coriolis Flow Meter*. 2019. Disponível em: <https://www.emerson.com/en-us/news/automation/1905-coriolis-meter-micro-motion-4200>. Citado na página 39.
- BRASFAIBER. *Lavador de Gases para Caldeira: Como Funciona? Onde Comprar?* 2021. Disponível em: <https://www.brasfaiber.com.br/lavador-de-gases-para-caldeira-como-funciona-onde-comprar/>. Citado na página 27.

- CBC. *Package Boiler*. 2016. Disponível em: <<https://www.cbcsa.com.br/en/products/20-boiler/68-package-boiler>>. Citado na página 25.
- CHAKRABORTY, S. K.; MANNA, N.; DEY, S. Importance of three-elements boiler drum level control and its installation in power plant. *International Journal of Instrumentation and Control Systems*, v. 4, n. 2, p. 1–12, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 44, 45 e 68.
- CHEW, I. et al. Three-element control system manipulation in steam generation for palm oil industry. *Advanced Science Letters*, American Scientific Publishers, v. 23, n. 11, p. 11475–11478, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 68.
- DANPOWER. *Caldeira para Processamento de Milho*. 2013. Disponível em: <<https://danpower.com.br/projetos/caldeira-para-processamento-de-milho/>>. Citado na página 22.
- DANTAS, A. A. M. *Modelagem e Análise de Sistemas Dinâmicos*: Material didático. Natal: DCA/UFRN, 2003. Citado na página 21.
- DEVINE, P. *Radar level measurement: the user's guide*. Uckfield: Vega Controls Burgess Hill, UK, 2000. Citado na página 32.
- DIAS, Á. C. et al. Construção de um sistema de medição de nível em tanque aberto. 2018. Citado na página 31.
- DUDOJĆ, B. Transient states of the transmitters in the 4-20 ma measurement lines. *IMEKO TC-4, Ateny*, p. 3–7, 2004. Citado na página 29.
- DUNN, W. C. *Fundamentals of industrial instrumentation and process control*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2018. Citado na página 29.
- ECO. *Maior peça da Caldeira chaga a Bracell neste final de semana*. 2020. Disponível em: <<https://jornaloeco.com.br/cotidiano/maior-peca-da-caldeira-chega-a-bracell-neste-final-de-semana/>>. Citado na página 25.
- ELECTRICAL4U. *Water tube boiler operation and types of water tube boiler*. 2020. Disponível em: <<https://www.electrical4u.com/water-tube-boiler-operation-and-types-of-water-tube-boiler/>>. Citado na página 23.
- EMERSON. *Rosemount 2555 Solids Level Switch - Capacitance Probe*. 2023. Disponível em: <<https://www.emerson.com/en-us/catalog/rosemount-sku-2555-solids-level-switch-capacitance-probe>>. Citado na página 41.
- ENDRESS+HAUSER. *Radar level measurement*. 2022. Disponível em: <<https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/level-measurement/Radar-level-measurement>>. Citado na página 33.
- ENDRESS+HAUSER. *Radiometric level measurement*. 2022. Disponível em: <<https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/level-measurement/Radiometric-level-measurement>>. Citado na página 35.
- ENDRESS+HAUSER. *Vibronic point level detection*. 2022. Disponível em: <<https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/level-measurement/Vibronic-point-level-detection>>. Citado na página 42.

- ENDRESS+HAUSER. *Technical Information Proline Promag W300*. Reinach: Endress+Hauser, 2023. Citado na página [39](#).
- ENDRESS+HAUSER. *Technical Information Proline Prowirl R200*. Reinach: Endress+Hauser, 2023. Citado na página [40](#).
- ENDRESS+HAUSER. *Technical Information Prosonic M FMU40*. Reinach: Endress+Hauser, 2023. Citado na página [34](#).
- EYERS, J. Inspection, explosion and breakdown of boilers and pressure vessels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 169, n. 1, p. 181–203, 1955. Citado 2 vezes nas páginas [44](#) e [68](#).
- FILHO, C. S. *Introdução ao Protocolo HART*. 2007. Citado na página [29](#).
- FRANKLIN, G. F. et al. *Feedback control of dynamic systems*. Upper Saddle River: Prentice hall, 2002. v. 4. Citado na página [11](#).
- FRANTLOVIĆ, M.; JOVANOVIĆ, V.; MILJKOVIĆ, B. Intelligent industrial transmitters of pressure and other process parameters. *Telfor Journal*, v. 1, n. 2, p. 65–8, 2009. Citado 2 vezes nas páginas [29](#) e [30](#).
- GONÇALVES, M. G. Caldeiras. *Monitoramento e Controle de Processos*, SENAI, v. 1, p. 17–25, 2003. Citado na página [24](#).
- GUTIERREZ, R. M. V.; PAN, S. S. K. Complexo eletrônico: automação do controle industrial. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2008. Citado na página [11](#).
- HERNÁNDEZ, A. et al. Reduction of blind zone in ultrasonic transmitter/receiver transducers. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 133, n. 1, p. 96–103, 2007. Citado na página [34](#).
- ISAAC, T. *Rosemount 214C RTD temperature Elements & Calibration By Callendar-Van Dusen constants*. 2020. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/rosemount-214c-rtd-temperature-elements-calibration-dusen-tzvi-isaac>. Citado na página [37](#).
- JOHNSON, M. A.; MORADI, M. H. *PID control*. London: Springer, 2005. Citado 2 vezes nas páginas [11](#) e [12](#).
- KNOSPE, C. Pid control. *IEEE Control Systems Magazine*, IEEE, v. 26, n. 1, p. 30–31, 2006. Citado na página [11](#).
- KRISHNASWAMY, K. *Industrial Instrumentation Vol. I*. New Delhi: New Age International, 2003. Citado 3 vezes nas páginas [29](#), [38](#) e [41](#).
- KUMAR, S. S.; PANT, B. Design principles and considerations for the ‘ideal’ silicon piezoresistive pressure sensor: a focused review. *Microsystem technologies*, Springer, v. 20, p. 1213–1247, 2014. Citado na página [36](#).
- KUPHALDT, T. R. *Lessons in industrial instrumentation*. California: Creative Commons Attribution/PAControl.com, 2008. Citado 5 vezes nas páginas [29](#), [30](#), [32](#), [34](#) e [37](#).
- LIPTAK, B. G. *Flow measurement*. Boca Raton: CRC Press, 1993. Citado 2 vezes nas páginas [37](#) e [38](#).

- NASCIMENTO, A. M. M. do; JÚNIOR, A. I. J. Dimensionamento de placa de orifício para desaerador horizontal para substituição de uma válvula de controle. 2016. Citado na página 28.
- NORONHA, S. M. D. et al. Um modelo multicritérios para apoiar a decisão da escolha do combustível para alimentação de caldeiras usadas na indústria têxtil. Florianópolis, SC, 1998. Citado na página 23.
- OGATA, K. *Engenharia de controle Moderno*. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 14, 16, 18, 20 e 21.
- OMEGA. *Float Level Transmitter*. 2020. Disponível em: <<https://www.omega.com/en-us/level-measurement/contact-level-sensors/float-sensors/p/LVR500-Series>>. Citado na página 31.
- PROMOEN. *Produtos*. 2013. Disponível em: <https://www.promoen.com.br/produtos_modelo-rfpe.html>. Citado na página 26.
- RAJKUMAR, T.; PRIYAA, V.; GOBI, K. Boiler drum level control by using wide open control with three element control system. *International Monthly Refereed Journal of Research In Management & Technology*, v. 2, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 11, 12, 45 e 68.
- ROCCO, C. D. Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais: um estudo de caso na indústria de alimentos. Universidade Federal de São Carlos, 2011. Citado na página 22.
- RODRIGUES, N. R. d. S. *Estudo da eficiência energética de uma caldeira aquatubular*. Tese (Doutorado), 2016. Citado na página 24.
- RODRIGUES-RHODIA, A. et al. Guia de inspeção de válvula de segurança e alívio. 2017. Citado na página 29.
- SHOLETTE, B. Point-level switches for safety systems. *Chemical Engineering*, Chemical Week Associates, New York, USA, v. 122, n. 12, p. 43–47, 2015. Citado na página 42.
- SIEMENS. *Pressure Transmitters SITRANS P320/420*. Munique: Siemens, 2023. Citado na página 32.
- SILVA, D. G. da; SANTANA, J. H. V.; DIAS, G. C. M. Caldeira de ensino: desenvolvimento da modelagem tridimensional de uma gaveta para coleta de fuligem teaching boiler: development of three-dimensional modeling of a drawer for soot collection. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 3, p. 21999–22011, 2022. Citado na página 25.
- STANIŠA, B.; IVUŠIĆ, V. Erosion behaviour and mechanisms for steam turbine rotor blades. *Wear*, Elsevier, v. 186, p. 395–400, 1995. Citado na página 44.
- TERZIC, E. et al. Capacitive sensing technology. *A Neural Network Approach to Fluid Quantity Measurement in Dynamic Environments*, Springer, p. 11–37, 2012. Citado na página 41.
- VENUGOPAL, A.; AGRAWAL, A.; PRABHU, S. Review on vortex flowmeter—designer perspective. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 170, n. 1-2, p. 8–23, 2011. Citado na página 40.
- WITT, T.; MENA, R.; CORNELL, E. Single chip, 2-wire, 4–20ma current loop rtd temperature transmitter design. In: IEEE. *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Brussels, 2014. p. 2380–2383. Citado na página 36.

WU, M. L. et al. The cascade three-elements fuzzy auto-adapted pid control system for boiler. In: *Advanced Materials Research*. Lanzhou: [s.n.], 2010. v. 139, p. 1919–1923. Citado 2 vezes nas páginas [12](#) e [46](#).

ZHANG, P. *Advanced industrial control technology*. Norwich: William Andrew, 2010. Citado na página [11](#).

ZHOU, L.; SUN, X. The study of boiler control system of water level of steam drum based on new immune pid controller. In: IEEE. *2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation*. Zhangjiajie, 2011. p. 1336–1339. Citado na página [11](#).