



INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA – IFPB
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR
COORDENAÇÃO DO CURSO DE BACHARELADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

DAYALLA MARIA DA COSTA FERNANDES

**SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE DE PRESSÃO PARA
ABASTECIMENTO DE VAPOR EM NAVIOS TANQUES DA FROTA
SUEZMAX**

JOÃO PESSOA – PB

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

F363s Fernandes, Dayalla Maria da Costa.

Sistema de otimização de pressão para abastecimento de vapor / Dayalla Maria da Costa Fernandes. – 2023.

61 f. : il.

TCC (Graduação – Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Processos Industriais, 2023.

Orientação : Prof^o. D.r Luís Romeu Nunes.

1. Engenharia elétrica - Sistema de controle. 2. Caldeiras.
3. Navio tanque. 4. Controle Pid. 5. Válvulas pneumáticas. I. Título.

CDU 621.3(043)

DAYALLA MARIA DA COSTA FERNANDES

**SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE DE PRESSÃO PARA
ABASTECIMENTO DE VAPOR EM NAVIOS TANQUES DA FROTA
SUEZMAX**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, no Instituto Federal da Paraíba – IFPB, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

JOÃO PESSOA – PB

2023


DAYALLA MARIA DA COSTA FERNANDES

**SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE DE PRESSÃO PARA
ABASTECIMENTO DE VAPOR EM NAVIOS TANQUES DA FROTA
SUEZMAX**


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, no Instituto Federal da Paraíba – IFPB, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho Aprovado em: 01 de Agosto de 2023.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 LUIS ROMEU NUNES
Data: 10/08/2023 10:48:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luís Romeu Nunes (Orientador)
Instituto Federal da Paraíba – IFPB

Documento assinado digitalmente
 Andre Fellipe Cavalcante Silva
Data: 10/08/2023 23:23:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Fellipe Cavalcante Silva
Instituto Federal da Paraíba – IFPB

Documento assinado digitalmente
 MARCEU OLIVEIRA ADISSI
Data: 11/08/2023 00:18:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marceu Oliveira Adissi
Instituto Federal da Paraíba – IFPB

Aos meus pais e meu irmão que me incentivaram todos os dias a nunca desistir dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que iluminou minha caminhada durante a graduação. Aos meus pais por todo amor, cobrança e apoio durante esses anos. Ao meu irmão por ouvir minhas reclamações e sempre me motivar. Ao professor Romeu, por não desistir de mim em meio a tantos impasses sofridos ao longo do desenvolvimento desse trabalho. Aos professores e colegas do Instituto Federal da Paraíba – campus João Pessoa, que participaram de alguma forma da minha formação. A empresa *Same Ship* pela oportunidade que me foi dada.

RESUMO

A automação dos sistemas que são encontrados dentro de um navio tanque é uma medida que garante eficiência para o funcionamento da embarcação. Navios desse tipo, de grandes proporções, necessitam de sistemas capazes de controlar os fluidos que circulam por suas linhas de distribuição, podendo ser líquidos, gasosos ou materiais viscosos. O presente trabalho detalha o aprimoramento de um sistema de controle de pressão para abastecimento de vapor em um navio da classe *Suexmaz*. A utilização de um controlador industrial simples, barato e que desempenhasse um controle PID apropriado foi de grande importância para o desenvolvimento desse sistema. Através de testes preliminares, foram obtidos resultados de um controle PID elaborado para o sistema proposto. A partir de uma verificação dos sistemas existentes e instalados ao longo da embarcação, foi elaborado um projeto que busca uma melhor solução, dando prioridade ao uso de equipamentos que podem ser encontrados no interior do navio. Para a construção do protótipo, foi utilizado um painel em chapa de aço, onde todos os equipamentos utilizados pelo sistema foram instalados, podendo o mesmo ser controlado de forma automática ou manual. O controle final encontrado pelos testes atendem as necessidades do sistema desenvolvido, garantindo um bom funcionamento para o protótipo. Este projeto estimula pesquisas futuras que busquem aprimorar a solução, aumentando ainda mais o uso do sistema desenvolvido, não só no setor marítimo como também industrial.

Palavras-chave: Navio Tanque; Sistemas de controle; Controle PID

ABSTRACT

The automation of the systems that are found inside a tanker is a measure that guarantees efficiency for the operation of the vessel. Ships of this type, of large proportions, need systems capable of controlling the fluids that circulate through their distribution lines, which can be liquids, gases or viscous materials. The present work details the improvement of a pressure control system for steam supply in a Suexmaz class ship. The use of a simple, cheap industrial controller that performed an appropriate PID control was of great importance for the development of this system. Through preliminary tests, results of a PID control designed for the proposed system were obtained. From a verification of the existing systems installed along the vessel, a project was elaborated that seeks a better solution, giving priority to the use of equipment that can be found inside the ship. For the construction of the prototype, a steel plate panel was used, where all the equipment used by the system were installed, which can be controlled automatically or manually. The final control found by the tests meets the needs of the developed system, guaranteeing a good functioning for the prototype. This project encourages future research that seeks to improve the solution, further increasing the use of the developed system, not only in the maritime sector but also in the industry.

Keywords: Tank Ship; Control system; PID control

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Navio Tanque (NT) Henrique Dias, da classe <i>Suezmax</i>	15
Figura 2 – Esquema de funcionamento da caldeira aquatubular com circulação natural.	21
Figura 3 – Representação simples de uma caldeira combinada.	22
Figura 4 – Sensor de pressão <i>strain-gauge</i> SITRANS P220.	25
Figura 5 – Transdutor I/P ABB TEIP11.	26
Figura 6 – Controlador PID Auto-Adaptativo N1200.	28
Figura 7 – Portas de comunicação do Controlador PID N1200.	29
Figura 8 – Representação para o controle automático de uma válvula de controle.	31
Figura 9 – Corte lateral de uma válvula solenoide 2/2 vias.	32
Figura 10 – Fluxograma exemplificando o funcionamento do sistema de controle de pressão para abastecimento de vapor.	33
Figura 11 – Diagrama unifilar elétrico elaborado.	34
Figura 12 – Diagrama de conexão dos equipamentos ao Controlador PID Auto-Adaptativo N1200.	35
Figura 13 – Diagrama mecânico unifilar elaborado.	36
Figura 14 – Simbologia de uma válvula solenoide 3/2 vias NF, com retorno por mola.	36
Figura 15 – Projeto elétrico do sistema simulado pelo <i>software CAdE SIMU</i> ©.	38
Figura 16 – Desempenho do sistema para a seleção do modo de operação automático.	39
Figura 17 – Desempenho do sistema para a seleção do modo de operação manual.	39
Figura 18 – Vista frontal do sistema de controle de pressão elaborada no <i>AutoCad</i> ©.	40
Figura 19 – Disposição dos equipamentos utilizados instalados no interior do painel.	41
Figura 20 – Curva característica obtida a partir dos testes realizados ao transdutor I/P.	43
Figura 21 – Protótipo desenvolvido para o sistema.	43
Figura 22 – Válvulas solenoides utilizadas no sistema de controle de pressão proposto.	44
Figura 23 – Conexões elétricas feitas aos equipamentos do sistema de controle de pressão.	45
Figura 24 – Mangueiras e conexões pneumáticas utilizadas no modelo.	45
Figura 25 – Parâmetros do controle PID, tipo de sinal entrada e saídas do projeto.	47
Figura 26 – <i>Setpoint</i> desejado e lógica de controle.	48

Figura 27 – Configuração para a saída de alarme.	48
Figura 28 – Resposta do controle para os parâmetros iniciais: $K_c = 1$, $\tau_i = 2$ e $\tau_d = 0,5$	49
Figura 29 – Alteração da taxa integrativa do controle PID: $K_c = 1$, $\tau_i = 1$ e $\tau_d = 0,5$	50
Figura 30 – Redução da taxa de integração pela metade: $K_c = 1$, $\tau_i = 0,5$ e $\tau_d = 0,5$	50
Figura 31 – Resultado final para o controle do sistema: $K_c = 1,1$, $\tau_i = 0,65$ e $\tau_d = 0,1$	51
Figura 32 – <i>Aalborg XW - Exhaust gas economizer</i>	58
Figura 33 – Sensor de pressão SITRANS P220.	59
Figura 34 – Transdutor de corrente para pressão ABB TEIP11.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos durante os testes ao transdutor I/P ABB TEIP11. . . 42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NT Navio Tanque

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Corrente
bar	Pressão
Hz	Frequência
K_c	Banda proporcional
kg/h	Vazão em massa
PV	Variável de processo
SP	Valor desejado
V_{ac}	Tensão alternada
V_{dc}	Tensão contínua
τ_d	Taxa derivativa
τ_i	Taxa integrativa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	CALDEIRAS	19
2.1.1	Caldeiras Aquatubulares	19
2.1.1.1	Geração de vapor nas caldeiras aquatubulares	20
2.1.2	Caldeiras combinadas	21
2.1.3	Distribuição de vapor em um navio tanque	23
2.2	INSTRUMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS	23
2.2.1	Sensores de pressão piezoresistivos	24
2.2.2	Transdutor de corrente para pressão	25
2.3	CONTROLE DE PROCESSOS	26
2.3.1	Controladores industriais	27
2.3.1.1	Controlador PID Auto-Adaptativo N1200	28
2.4	VÁLVULAS PNEUMÁTICAS	29
2.4.1	Válvulas de Controle	30
2.4.2	Válvulas Solenoides	31
3	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PROPOSTO	33
3.1	PROJETO ELÉTRICO	34
3.2	PROJETO MECÂNICO	35
3.3	SIMULAÇÕES	37
3.4	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	40
3.4.1	Conexões elétricas e mecânicas	44
4	RESULTADOS	46
4.1	DESEMPENHO DO SISTEMA DE CONTROLE DE PRESSÃO	46
4.1.1	Configurações do controle PID	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52

REFERÊNCIAS	54
ANEXOS	57
ANEXO A Informações técnicas sobre a caldeira de recuperação de gases. . . .	58
ANEXO B Informações técnicas dos equipamentos utilizados pelo sistema. . . .	59

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as principais fontes de energia aplicadas às indústrias são eletricidade, queima de combustíveis e vapor. A eletricidade pode ser utilizada para o aquecimento e acionamento mecânico. O combustível fornece energia através do calor da sua combustão. Já o vapor inclui diversos benefícios aos processos industriais, transformando essa fonte energética em um meio importante de transferência de energia (BABCOCK; WILCOX, 2005). Entre os principais benefícios, pode-se mencionar: facilidade de transporte, rápido aquecimento com controle de pressão e temperatura, altos coeficientes de transferência térmica, seguro e baixo custo.

Os geradores de vapor comumente empregados nas indústrias são conhecidos como caldeiras. Esse tipo de gerador pode ser compreendido como um trocador de calor que gera vapor com alta pressão e temperaturas elevadas através da transferência de energia térmica fornecida por uma fonte, que pode ser eletricidade ou combustível. À medida que a água é aquecida, sua energia interna e temperatura tendem a aumentar até que a temperatura de saturação seja atingida. A partir desse ponto, qualquer calor acrescentado a água fará com que ela seja evaporada e, a alta pressão gerada durante esse processo, fará com que o vapor produzido pela caldeira flua pelas linhas de distribuição sem grandes esforços (BOTELHO; BIFANO, 2015; INCROPERA *et al.*, 2008).

Da mesma forma que estão presentes em ambientes industriais, as caldeiras também podem ser encontradas em navios. Os navios tanques são um tipo de embarcação projetado para transportar grandes quantidades de petróleo e seus derivados em ambiente nacional (cabotagem) e internacional (longo-custo). No Brasil, a empresa responsável por esse transporte é a Transpetro ©, que foi criada em 1998 como uma auxiliar de logística da Petrobras ©. Os navios dessa empresa são classificados de acordo com a quantidade de produto que transportam. Dentre as frotas mais conhecidas estão os navios da classe *Suezmax*, navios de grandes dimensões que possuem uma capacidade de carga na faixa de 140 mil a 175 mil toneladas de petróleo bruto; a classe *Aframax* transportam entre 80 mil e 120 mil toneladas de petróleo; a classe *Panamax*, a menor classe dentre as duas citadas, possui uma capacidade de transporte na faixa de 65 mil a 80 mil toneladas (LIMA, 2021).

Um navio desse tipo encontra-se equipado com tubos, válvulas, bombas e sistemas de controle que são utilizadas durante a transferência da carga, a exemplo do navio tanque Henrique Dias, da classe Suemax, que pode ser observado na Figura 1.

Com isso, sua construção torna-se diferente dos demais navios de carga sólida, como os graneleiros ou os navios porta-contêineres (FERREIRA, 2016).

Figura 1 – NT Henrique Dias, da classe *Suezmax*.



Fonte: (TRANSPETRO, 2019).

Dentro das indústrias, a utilização do vapor abrange diversas aplicações, tais como: cozimento de alimentos, aquecimento ou resfriamento de ambientes, esterilização de alimentos ou produtos, fundição e soldas de peças, dentre outros (BOTELHO; BIFANO, 2015). Nos navios tanques, além dos consumidores típicos, parte dos processos que são realizados também utilizam o vapor gerado pela água do mar em suas próprias caldeiras para o seu funcionamento. Entre as finalidades específicas para o uso do vapor nesse tipo de embarcação pode-se destacar (ZIGMANTES, 2011):

- Fornecimento de vapor para os queimadores da caldeira;
- Aquecimento do óleo pesado no interior dos tanques de armazenamento de combustível;
- Fornecimento de vapor para os turbos geradores e turbinas de propulsão;
- Redução do consumo elétrico da embarcação;
- Fornecimento de vapor para o convés.

Outros consumidores típicos de vapor em um navio tanque são os tanques de óleo combustível, tanques de água de esgoto, aquecedores de água salgada, tanques laterais de óleo pesado, tanque de limpeza de produtos químicos, purificadores de óleo lubrificante e óleo pesado, entre outros (ZIGMANTES, 2011).

Nesse tipo de embarcação, as caldeiras produzem vapor com uma pressão elevada e, para chegar aos seus diversos consumidores, é necessário que esse fluido passe por processos que auxiliem na sua limpeza e, principalmente, no controle de sua pressão. Os métodos mais utilizados para o controle da pressão do vapor nos navios tanques são os conjuntos de válvulas pneumáticas de médio ou grande porte e os sistemas construídos por controladores de processos PID que são programados para regular automaticamente a pressão do vapor.

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Os sistemas de controle de pressão são encontrados por toda extensão do navio, desde o convés até à casa de máquinas, local onde estão todas as máquinas de propulsão da embarcação, caldeiras, sistemas de tratamento de água, dentre outros.

Sistemas localizados na casa de máquina estão sujeitos a péssimas condições de funcionamento, visto que nesse ambiente existem altas temperaturas, por causa dos queimadores utilizados nos geradores de vapor da embarcação. Essa temperatura elevada pode afetar o funcionamento do controlador industrial usado pelo sistema, causar ressecamento das mangueiras utilizadas nas conexões das válvulas solenoides ou derreter os fios condutores das conexões elétricas. Além disso, alguns sistemas não possuem meios necessários para realizar uma ventilação interna dos seus componentes, uma vez que os mesmos aquecem durante o funcionamento ou devido a temperatura do ambiente.

Durante as operações de manobras realizadas pelo navio tanque, é comum que a rede elétrica da embarcação tenha pequenos surtos de energia, afetando equipamentos que possuem um certo grau de sensibilidade. Também existem sistemas que são alimentados por tensão contínua, sendo necessário o uso de baterias ou fontes de energia externas, capazes de realizar uma conversão da rede elétrica alternada de $220 V_{ac}$ ($60 Hz$) da embarcação. Desse modo, os sistemas que não possuem um dimensionamento elétrico de acordo com as condições da rede elétrica dos navios podem ser danificados, prejudicando o funcionamento da embarcação.

Nos navios tanques também é comum encontrar sistemas de controle, fabricados para diversas funções, aplicados de forma adapta para o controle de pressão da embarcação. Por esse motivo surgem inúmeras falhas, uma vez que o equipamento não foi fabricado para aquele uso específico.

Portanto, levando em conta todos os aspectos discutidos, quando o navio está em uma viagem e ocorrem falhas esses sistemas permanecem parados, tornando-se inviável para a embarcação em uma situação de emergência durante o trajeto. Como os navios não possuem um estoque suficientemente grande de peças para reposição e, no caso de sistemas pré-fabricados essas peças são vendidas em conjunto, fica impossível realizar uma manutenção no equipamento durante a viagem gerando um grande transtorno aos maquinistas. Além disso, quando o navio retorna ao porto muitas das vezes as manutenções realizadas por empresas terceirizadas podem demorar dias, o que só aumenta ainda mais as despesas da embarcação.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é detalhar o desenvolvimento de um sistema que controle a pressão do vapor das linhas de distribuição de um navio tanque da classe *Suezmax* para, posteriormente, ser utilizado pelos consumidores da embarcação. No desenvolvimento será aplicado parte do conhecimento adquirido durante o curso de Engenharia Elétrica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Propor um sistema de controle de pressão para controlar válvulas pneumáticas de grande porte;
- Construção de um protótipo visando minimizar os problemas apontados pelos operários de máquina da embarcação;
- Elaboração de um projeto elétrico e mecânico;
- Criação de um controle PID a partir do uso de controladores de processos industriais simples;
- Utilização de componentes e partes que possam ser encontradas em outros sistemas do próprio navio tanque.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A distribuição dos capítulos deste trabalho será realizada de forma a englobar todas as etapas básicas para o desenvolvimento do projeto de um sistema de controle de

pressão para abastecimento de vapor de um navio tanque. Ao todo serão cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução, descrição do problema ao qual foi proposto para a realização deste projeto e objetivos do trabalho. No capítulo 2 é apresentado um referencial teórico em relação ao funcionamento dos equipamentos utilizados no projeto. O capítulo 3 compreende o desenvolvimento do sistema. O capítulo 4 apresenta a construção do modelo e os resultados obtidos durante os testes realizados ao sistema. No capítulo 5 consta a conclusão e considerações finais com relação ao projeto. Os demais capítulos estão destinados as referências e anexos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo do trabalho expõe uma análise sobre como será feito o desenvolvimento do projeto, baseando-se na concepção de um referencial teórico que atende os materiais de pesquisa necessários para a construção de um sistema de controle de pressão para abastecimento de vapor em navios tanques da frota *Suezmax*.

2.1 CALDEIRAS

Os geradores de vapor, ou caldeiras, produzem vapor com alta pressão por meio do aquecimento de um fluido vaporizante, geralmente utiliza-se água (MARTINELLI, 2003). Para os processos industriais, esses equipamentos são de alto custo e necessitam de habilidades específicas durante sua operação e/ou manutenção (SILVA, 2013).

As caldeiras podem ser classificadas de acordo com a sua operação. Com relação ao modo como a água é exposta a fonte de calor do equipamento, as caldeiras podem ser divididas em (RODRIGUES, 2016; ZIGMANTES, 2011):

- Caldeiras aquatubulares: os gases quentes passam por fora dos tubos, vaporizando a água que está no seu interior.
- Caldeiras flamatubulares: os gases quentes passam por dentro de tubos, vaporizando a água que está no seu exterior.

Independente do tipo de caldeira utilizada, os componentes que a constituem são os mesmos. Os principais, que podem ser citados são: fornalha, queimadores, aquecedor de ar, câmara de combustão, tubos de circulação, chaminé, cinzeiro, separador de impurezas, alarmes, sensores de pressão, válvulas de segurança e economizador (SÁNCHEZ *et al.*, 2010; ZIGMANTES, 2011).

2.1.1 Caldeiras Aquatubulares

A principal característica de uma caldeira aquatubular é o modo como o vapor é produzido. Diferente das caldeiras flamatubulares, a geração de vapor de uma caldeira aquatubular ocorre dentro dos tubos que estão interligados a dois ou mais reservatórios (OLIVEIRA; RODRIGUES; GONÇALVES, 2019). Os gases de combustão fornecidos pela fornalha circulam pelo equipamento fazendo com que a água presente no interior dos tubos seja aquecida e, conseqüentemente, vaporizada (SILVA, 2013).

Caldeiras desse tipo produzem vapor de alta pressão, atingindo até 120 *bars*, e alta temperatura, cerca de 510 °C. A sua capacidade de produção de vapor varia entre 15.000 *kg/h* e 100.000 *kg/h*. Dessa forma, por apresentarem boas condições de geração, os navios mercantes a vapor utilizam as caldeiras aquatubulares para sua propulsão (ZIGMANTES, 2011).

Além da elevada pressão e capacidade de produção, essas caldeiras possuem rapidez em seu funcionamento e se adaptam a qualquer combustível utilizado durante a queima. Dentre as desvantagens para esse tipo de caldeira estão a manutenção complexa, as grandes proporções do equipamento e sensibilidade a variação de carga (MARTINS, 2015; ZIGMANTES, 2011).

2.1.1.1 Geração de vapor nas caldeiras aquatubulares

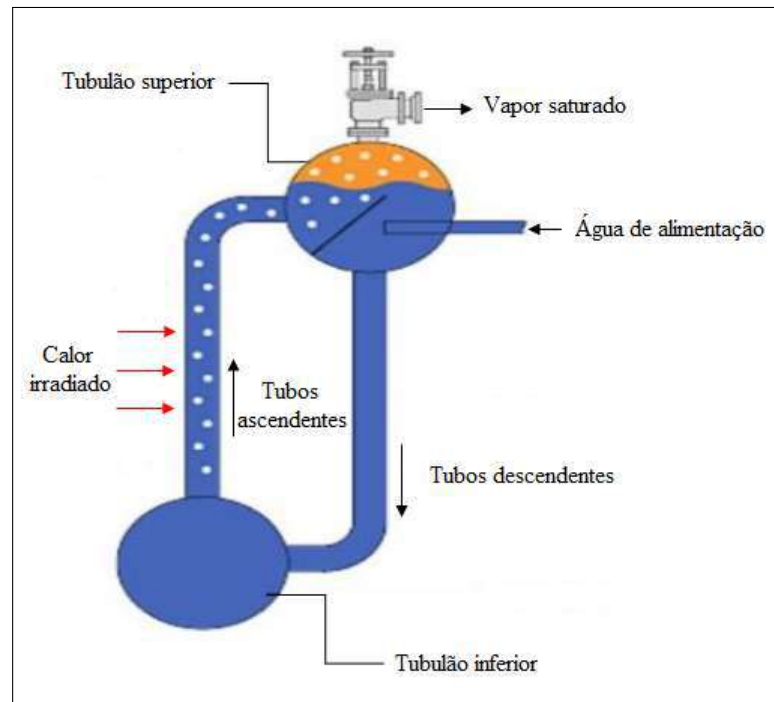
As caldeiras aquatubulares possuem componentes específicos que são utilizados na geração do vapor durante seu funcionamento, além dos já mencionados. A funcionalidade de cada um desses componentes são (OLIVEIRA; RODRIGUES; GONÇALVES, 2019):

- Tubulão superior: receber a água de alimentação da caldeira e acumular o vapor que foi gerado;
- Tubulão inferior: acumular água que será aquecida pela fornalha da caldeira;
- Tubos ascendentes: conduzir a mistura água-vapor para o tubulão superior;
- Tubos descendentes: conduzir a água do tubulão superior para o inferior.

Nas caldeiras do tipo aquatubular a água de alimentação, com uma temperatura inferior à de saturação, entra no equipamento pelo tubulão superior e desloca-se para o tubulão inferior pelos tubos descendentes. Esses tubos estão mais afastados da fornalha, logo essa água não irá passar pelo processo de vaporização. No tubulão inferior a água é aquecida, gerando o vapor, e retorna para o tubulão superior pelos tubos ascendentes, ou tubos geradores. Os tubos geradores estão mais próximos da fornalha, fazendo com que a água do seu interior ainda seja aquecida pelo calor irradiado. Essa circulação da água pelos tubos dentro do equipamento é um aspecto das caldeiras aquatubular com circulação natural (NOGUEIRA; ROCHA; NOGUEIRA, 2005).

A Figura 2 apresenta um esquema típico do funcionamento desse tipo de caldeira. Nela o vapor é produzido pela diferença do peso específico entre a água mais fria e a água mais quente, que circulam pelos tubos de forma acelerada.

Figura 2 – Esquema de funcionamento da caldeira aquatubular com circulação natural.



Fonte: (NANDWANA; PERIASWAMY, 2010)

A água de alimentação que entra no tubulão superior da caldeira contém sais e impurezas provenientes do mar, tornando necessário realizar um tratamento químico nessa água a fim de retirar tais impurezas para que sua concentração seja aceitável. Caso esse tratamento não tenha sido feito, nos tubos da caldeira irão surgir incrustações que provocarão um aumento da resistência térmica à troca do calor, uma diminuição do fluxo de calor entre os tubos e, conseqüentemente, uma redução no rendimento térmico da caldeira (CIBO, 1997; ZIGMANTES, 2011).

2.1.2 Caldeiras combinadas

Nos navios mercantes, frequentemente são encontrados uma combinação de duas caldeiras para a geração de vapor da embarcação. Essa combinação é utilizada quando se busca economia de espaço na casa de máquina e, de acordo com o regime de operação do navio, cada caldeira funciona de forma diferente.

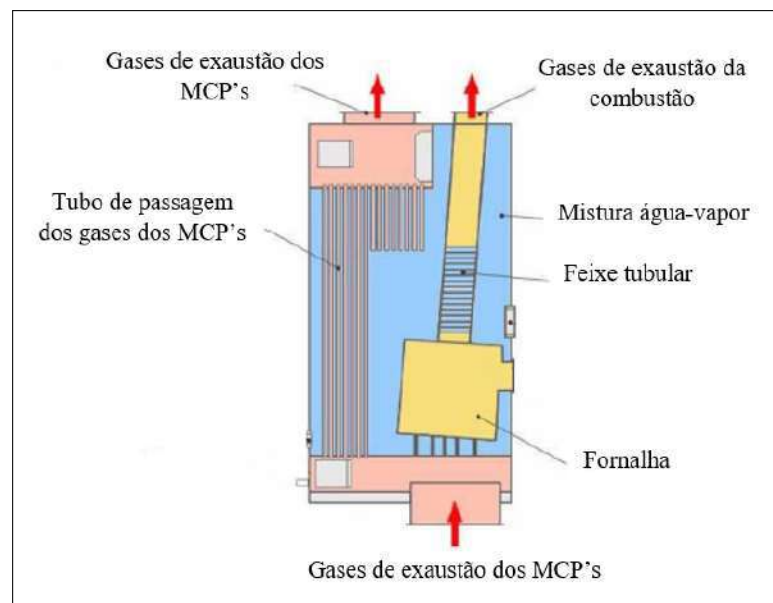
Durante as operações de porto, quando o navio está atracado ou fundeado, os motores de combustão principal (MCP's) do navio estão desligados e a fonte de calor necessária para a geração do vapor na caldeira é fornecida por sua própria fornalha. Sendo assim, esse equipamento funcionará como uma caldeira aquatubular (ZIGMANTES, 2011).

Já quando o navio está em regime de viagem, os MCP's enviam os gases provenientes da sua combustão para a caldeira. Esses gases de combustão realizam o mesmo papel desempenhado pela fornalha, uma vez que a mesma está apagada, aquecendo a água no interior dos tubos produzindo o vapor necessário para os pontos consumidores da embarcação. Quando uma caldeira produz vapor através dos gases de descarga dos MCP's ela é denominada caldeira de recuperação de gases de descarga (ZIGMANTES, 2011).

As caldeiras de recuperação de gases funcionam como um economizador e podem ser encontrados nos navios tanques. Esse componente é responsável por melhorar o rendimento da caldeira e reduzir o choque térmico causado entre a água de alimentação com a água aquecida existente no tubulão superior. Além disso, o economizador tem a função de pré-aquecer a água antes que ela seja injetada na caldeira (OLIVEIRA, 2014; MARTINS, 2015). A Figura 32 do Anexo A apresenta as especificações técnicas da caldeira utilizada pelo NT Henrique Dias.

Essa combinação de duas caldeiras, observado na representação da Figura 3, torna-se importante na produção de vapor de uma embarcação, uma vez que durante uma viagem a fornalha da caldeira principal deve estar apagada e o vapor necessárias para o funcionamento da embarcação deve ser gerado pelos gases de descarga dos motores de combustão principal.

Figura 3 – Representação simples de uma caldeira combinada.



Fonte: (ZIGMANTES, 2011)

2.1.3 Distribuição de vapor em um navio tanque

Após sua geração, o vapor é direcionado até os pontos de utilização por meio de tubulações que possuem características específicas e variam de acordo com o seu uso. Essas tubulações podem ser compreendidas como um conjunto de tubos fechados destinados a transportar diferentes tipos de fluidos (VALIAS, 2021).

Nos navios tanques essas tubulações estão localizadas acima das caldeiras. O vapor saturado produzido nas caldeiras estão misturado com gotículas de água, assim ao longo das tubulações existem mecanismos que separam o vapor da água. A separação desses dois fluidos ocorre graças a diferença de densidade de ambos (ZIGMANTES, 2011).

A caldeira de recuperação de gases utilizadas nos navios tanques produzem vapor entre 18 e 24 *bars* e, antes de chegar aos pontos consumidores, esse vapor passa por diversas válvulas e controladores industriais capazes de direcioná-lo corretamente. Equipamentos de medições instalados ao longo das tubulações detectam a quantidade de vapor existente e, com isso, é possível identificar seu consumo. Quando seu consumo é aumentado, há uma queda na pressão do vapor gerado e, para corrigir tal ato, é necessário aumentar o calor de combustão responsável pelo aquecimento da água no interior da caldeira. Esse procedimento pode ser realizado dentro do Centro de Controle de Máquinas (CCM) da embarcação, onde são encontrados monitores conectados ao sistema supervisório da caldeira capazes de acompanhar o seu desempenho.

2.2 INSTRUMENTAÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Na engenharia, a expressão instrumentação está associada ao processo de conversão de dados de um certo dispositivo em uma variável de processo adequada para ser apresentada ao usuário, auxiliando no acompanhamento dos processos industriais (FIALHO, 2002). Além do uso da programação, a automação de sistemas industriais necessita que exista uma comunicação entre o meio físico e o virtual. Para isso, existem os *hardwares*, que são dispositivos físicos que coletam os dados, realizam a comparação de um sinal e atuam como uma conexão entre o computador e os sinais; e os *softwares*, que podem ser compreendido como um programa de computador que recebe os dados, realiza o processamento do sinal e os envia para uma saída. Além disso, os *softwares* permitem uma visualização e manipulação das informações obtidas pelo sinal (MARTINS; SCHURT; RAMOS, 2018).

O processamento da informação recebida pelo *hardware* é conhecido como aquisição de dados. Este processo realiza a leitura de um determinado fenômeno físico e o transforma em um sinal elétrico que, logo após, é interpretado, processado e armazenado em um equipamento. Os dispositivos capazes de analisar tais fenômenos físicos são os sensores e transdutores. Eles realizam a análise de fenômenos como pressão, temperatura, vazão, entre outros; convertem essas informações obtidas em grandezas elétricas, como tensões e correntes, de forma que seja possível a verificação destas informações pelo sistema (GRANDO, 2013).

2.2.1 Sensores de pressão piezoresistivos

Os sensores de pressão são dispositivos que enviam um sinal de pressão a um controlador de processo ou indica o seu valor em um *display*. Através desses sensores são permitidos, por exemplo, controlar a pressão de um sistema, localizar falhas e evitar problemas graves nas linhas de distribuição de vapor (ZIGMANTES, 2011). Geralmente os sensores encontrados ao longo das tubulações de vapor dos navios tanques são do tipo piezelétrico, capacitivo e piezoresistivos (*strain-gauge*).

Os materiais piezoresistivos estabelecem uma mudança na resistência elétrica quando submetidos a um determinado esforço mecânico (PATSKO, 2006). Nos sensores de pressão esse esforço é causado pela ação da pressão sobre o sensor e, quando identificado, ocorre um alongamento no elemento de detecção causando modificações nas características elétricas do mesmo, gerando uma variação de resistência diretamente proporcional à pressão aplicada (GHOSH; ROY; SARKAR, 2013). Esses sensores possuem uma faixa de operação que respondem corretamente às variações de pressão impostas, porém se a pressão aplicada não estiver nos valores limites não haverá resposta do sensor ou, em outros casos, eles podem ser danificados.

O sensor de pressão da Figura 4 é um dos modelos encontrados nos navios tanques da frota *Suezmax*, produzindo um sinal de saída com baixa intensidade. As características de funcionamento desse componente pode ser visto na Figura 33 do Anexo B.

Figura 4 – Sensor de pressão *strain-gauge* SITRANS P220.



Fonte: (SIEMENS, 2011)

2.2.2 Transdutor de corrente para pressão

Os transdutores são dispositivos capazes de converter um sinal de entrada com uma grandeza física conhecida em um sinal de saída que seja de fácil identificação, podendo ser elétrico, mecânico ou óptico (PERILLO, 1994; SILVA, 2005). São dispositivos que incluem o elemento sensor e todos os equipamentos necessários para a conversão do sinal (WENDLING, 2010).

Existem dispositivos transdutores que convertem um sinal elétrico em um sinal pneumático através do princípio de equilíbrio de forças eletromagnéticas, se tornando uma conexão entre os sistemas elétricos/eletrônicos e pneumáticos. Os transdutores I/P, assim chamados, recebem um sinal de corrente contínua na sua entrada e oferecem um sinal pneumático proporcional na saída (ANALYTICS, 2018). Esse equipamento é composto por um circuito eletrônico, responsável pela recepção do sinal de entrada, e um atuador pneumático encarregado de realizar sua saída.

Quando o transdutor I/P da Figura 5 recebe o sinal de entrada, o circuito eletrônico realiza a conversão desse sinal através de um sensor de pressão existente no próprio módulo do equipamento. A medida que o sinal de entrada aumenta, o sistema de controle do dispositivo faz com que o atuador pneumático opere de modo que a pressão de saída aumente. O mesmo ocorre quando o sinal de entrada diminui, fazendo o atuador operar até que a pressão de saída seja proporcional ao sinal de entrada.

Figura 5 – Transdutor I/P ABB TEIP11.



Fonte: (ANALYTICS, 2018)

Por apresentarem valores de pressão precisos, nos navios tanques é possível encontrar esse dispositivo atuando no controle de operadores pneumáticos, amortecedores, válvulas pneumáticas direcionais e reguladoras, dentre outros. Na Figura 34 do Anexo B é possível observar as informações técnicas sobre o funcionamento desse dispositivo. .

2.3 CONTROLE DE PROCESSOS

Controle de processo refere-se aos sistemas que são destinados a manter as variáveis de uma planta industrial dentro dos limites operacionais desejáveis. Esses sistemas possuem grandes vantagens para o setor industrial, tais como: aumento da qualidade do produto, aumento da confiabilidade do sistema, aumento de segurança do sistema, processos automáticos, entre outros (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010).

A entrada para um sistema de controle é uma excitação por meio de uma fonte elétrica, produzindo na saída uma resposta com a mesma natureza, ou não, do sinal de entrada (SHIRAHIGE, 2007). Esses sistemas podem ser classificados em malha aberta ou malha fechada.

Um sistema de controle em malha aberta é caracterizado por ser simples e pouco confiável, pois ocorrem perturbações ao longo do sistema uma vez que não há nenhuma comparação da resposta de saída com o sinal de entrada. Entretanto, os sistemas em malha fechada são capazes de eliminar os problemas encontrados nos sistema em malha aberta através da implementação de um controle automático. Os equipamentos aptos a

realizar esse procedimento são os controladores industriais, que manipulam a saída dos sistemas eliminando os possíveis erros e perturbações, mantendo as variáveis de processo no valor desejado (RIBEIRO, 2001).

2.3.1 Controladores industriais

Os controladores industriais, componentes essenciais em um sistema de controle em malha fechada, são os equipamentos responsáveis pela atuação de um processo industrial. Seu funcionamento é baseado na detecção do erro entre o valor de uma variável de processo com o valor que é desejado para o sistema (RIBEIRO, 2001). Esses equipamentos são classificados de acordo com suas respectivas ações de controle, podendo ser: de duas posições (*on-off*), proporcional (P), proporcional integral (PI), proporcional derivativo (PD), e proporcional integral derivativo (PID) (OGATA, 2011).

Para a escolha do tipo de controlador é preciso considerar as necessidades do processo produtivo. Por essa razão, o controlador PID é o tipo mais empregado nas indústrias devido a sua grande aplicabilidade em sistemas controlados e sua simplicidade nos ajustes dos parâmetros.

O erro no controlador PID é gerado quando o valor da variável de processo (PV) é diferente do valor desejado (SP). No momento em que é identificado, o controlador executa uma de suas ações de controle para ajustar a variável de processo. O controle proporcional (P) irá oferecer uma resposta rápida a esse erro, enquanto o controle integral (I) elimina os erros estacionários e o derivativo (D) elimina as oscilações do controlador melhorando a estabilidade do sistema (JÚNIOR, 2006).

Os modelos de controladores industriais encontrados nos sistemas presentes no navio tanque não admitem que determinadas modificações sejam realizadas durante os processos, impedindo que o operador da própria embarcação realize qualquer ajuste ou manutenção. O modelo utilizado pelo protótipo, Controlador PID Auto-Adaptado N1200, permite que o operador possa executar os ajustes necessários no sistema durante qualquer falha. Essa vantagem trás benefícios para a embarcação, uma vez que seu próprio operador pode realizar as manutenções durante uma viagem, impedindo que o sistema fique parado.

2.3.1.1 Controlador PID Auto-Adaptativo N1200

Comparado aos controladores industriais existentes no mercado atual, o Controlador PID Auto-Adaptativo N1200 difere dos demais por possuir uma rápida taxa de amostragem permitindo que o controle PID alcance uma resposta rápida, proporcionando o funcionamento correto do processo. A configuração dos parâmetros de controle podem ser realizadas diretamente no equipamento pelos botões do painel frontal mostrado na Figura 6, ou por meio da porta USB (*Universal Serial Bus*) utilizando o *software* de configuração disponibilizado pela *NOVUS* ©.

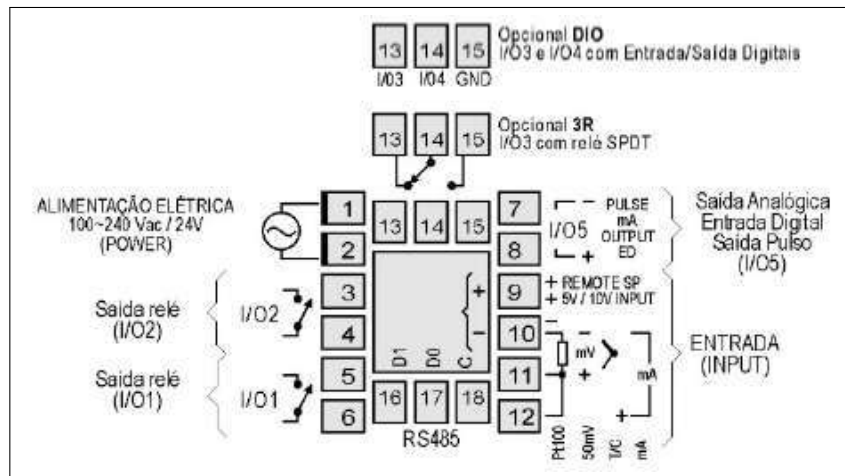
Figura 6 – Controlador PID Auto-Adaptativo N1200.



Fonte: (NOVUS, 2022)

A distribuição das portas de comunicação do controlador pode ser observado na Figura 7. As portas 1 e 2 são utilizadas para a alimentação do controlador, podendo ser contínua ou alternada. As portas 3, 4, 5 e 6 são saídas relés, enquanto as portas 7, 8 e 9 são para as saídas analógicas ou entrada digital. As portas 10, 11 e 12 são empregadas para entrada de sinal analógico. As portas 16, 17 e 18 são utilizadas para a comunicação serial RS485.

Figura 7 – Portas de comunicação do Controlador PID N1200.



Fonte: (NOVUS, 2022)

O próprio fabricante fornece informações de como devem ser realizados os ajustes das variáveis de controle, programação dos parâmetros PID e calibração do equipamento. Além disso, a *NOVUS* © também oferece exemplos de algumas aplicações do Controlador PID Auto-Adaptativo N1200.

2.4 VÁLVULAS PNEUMÁTICAS

Válvulas pneumáticas são equipamentos mecânicos que controlam o escoamento de fluidos em tubulações e tanques, com diferentes aplicações. Além do fluido aplicado, as válvulas são classificadas de acordo com a temperatura e a pressão ao qual são empregadas (FORSMAN; MORIN, 2005). Quando são instaladas nas tubulações, esses equipamentos podem executar diversas funções, dentre elas (RIBEIRO, 2003):

- Regular a vazão do fluido, adequando-a para o tipo de aplicação ao qual está sendo empregada no processo;
- Permitir que o fluido tenha apenas um único sentido de escoamento, impedindo que o mesmo retorne a tubulação e provoque danos ao processo;
- Responder ao sinal de atuação do controlador, alterando sua abertura para atender as necessidades do processo;
- Compensar as variações de pressão da linha de distribuição;
- Controlar fluidos gasosos, materiais viscosos, corrosivos e radioativos.

2.4.1 Válvulas de Controle

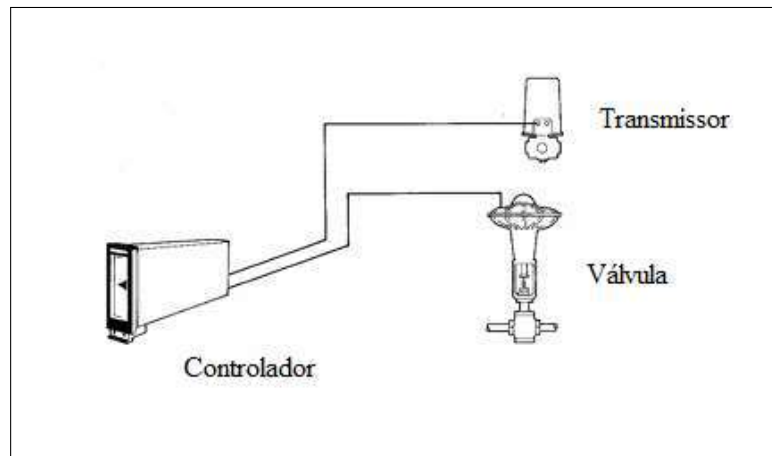
As válvulas pneumáticas podem ser divididas em duas categorias, que são: válvulas de bloqueio e de controle. As válvulas de bloqueio são destinadas a estabelecer ou interromper o fluxo de um fluido. Já as válvulas de controle permitem uma redução variável da pressão do fluido de acordo com o processo ao qual está sendo empregada. Em geral, esse tipo de válvula é utilizado para o controle de água, de temperatura, de pressão e de vazão (ZIGMANTES, 2011).

Nos navios tanques, alguns equipamentos necessitam que o vapor possua uma determinada faixa de pressão. Geralmente, essa faixa encontra-se abaixo da pressão do vapor gerado nas caldeiras da embarcação, sendo necessário o uso das válvulas de controle capazes de reduzir a pressão do vapor antes dos pontos consumidores. O vapor em baixa pressão proporciona vantagens econômicas para os navios pois, quanto menor a pressão de uso, menor será a quantidade de combustível consumido durante o processo de evaporação da água nas caldeiras (RODRIGUES, 2012; DIAZ; ENCALADA; PEÑA, 2015).

No que diz respeito ao controle desse tipo de válvula pode-se citar o modo manual ou automático. Quando o sinal de controle é produzido pelo operador por meio de uma estação de controle ou no local onde a válvula está instalada, tem-se um controle manual. Caso o sinal de controle seja gerado por um controlador industrial de processo, considera-se uma válvula de controle automático (AMARAL, 2013).

Assim como todo sistema de controle automático, o sinal de controle que chega ao atuador da válvula é produzido por um controlador. Um sensor envia um sinal ao controlador, como pode ser observado pelo esquema da Figura 8, que recebe e o compara com o valor que deseja-se obter no sistema. O controlador produz o sinal de saída, que é enviado ao atuador fazendo com que a válvula opere, alterando a área de passagem do fluido até que o valor desejado seja obtido (RIBEIRO, 2003).

Figura 8 – Representação para o controle automático de uma válvula de controle.



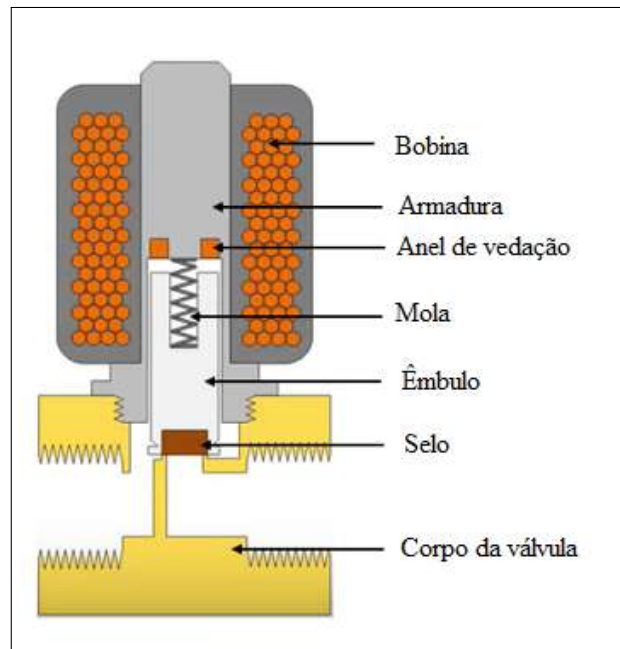
Fonte: (RIBEIRO, 2003)

2.4.2 Válvulas Solenoides

Além das válvulas de controle de grande porte, existem outro grupo de válvulas pneumáticas que possuem a mesma função, porém com acionamento elétrico. Esse conjunto, conhecido como válvulas solenoides, são equipamentos eletromecânicos controlados que operam a partir do deslocamento de um núcleo móvel causado pela ação de um campo magnético gerado por uma bobina elétrica (MARTINS; SCHURT; RAMOS, 2018; SILVA; LAGO, 2002).

O acionamento de uma válvula solenoide consiste na aplicação de uma tensão específica sobre a bobina que a compõe, causando uma alteração do estado da válvula a partir do deslocamento do núcleo magnético. Quando a válvula é desenergizada, o êmbolo do núcleo retorna a posição original devido a força da mola que há no interior da válvula. A Figura 9 apresenta a vista de um corte lateral para esse tipo de válvula, bem como seus elementos constituintes, que são: bobina, armadura, anel de vedação, mola, êmbolo, selo e o próprio corpo da válvula.

Figura 9 – Corte lateral de uma válvula solenoide 2/2 vias.



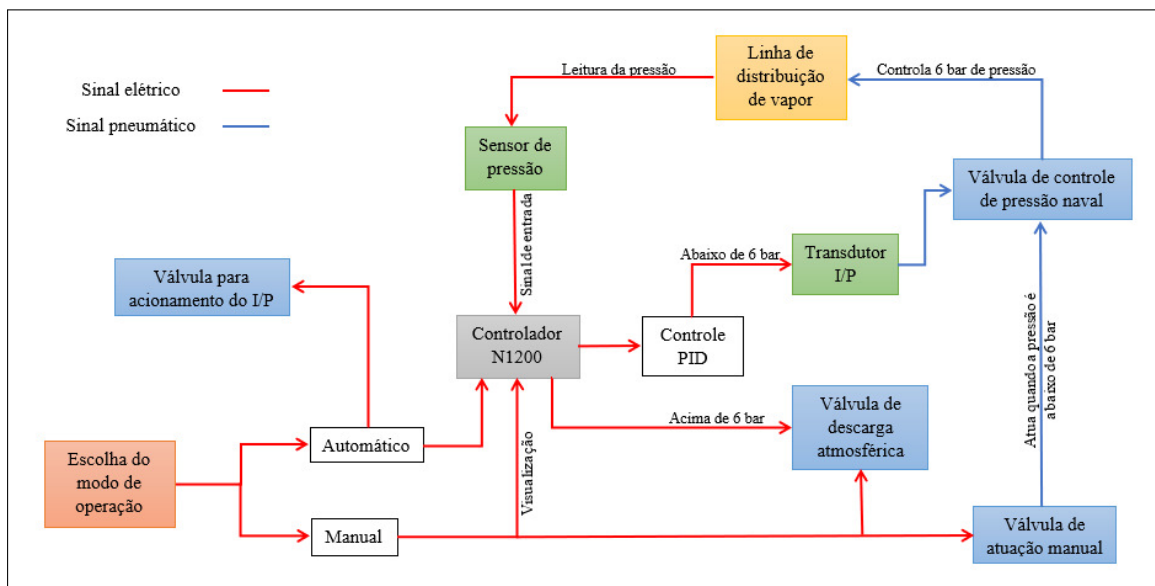
Fonte: (TAMESON, 2017)

As aplicações para esse tipo de válvula incluem diversos sistemas industriais mas sendo geralmente utilizadas em processos de automação industrial. Além disso, é possível encontrar válvulas solenoides em sistema de aquecimento, sistema de aspersão, tecnologia de ar comprimido, dentre outros.

3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PROPOSTO

O sistema de controle de pressão para o abastecimento de vapor em navios tanques foi elaborado com o objetivo de reduzir os impactos causados pelos sistemas de controle que estão disponíveis no mercado e que possuem falhas em sua construção, causando problemas na embarcação durante o seu uso. O projeto desenvolvido é composto por equipamentos que auxiliam no controle do sistema, permitindo que as falhas que ocorrem durante sua operação sejam reduzidas. O fluxograma apresentado na Figura 10 tem o intuito de demonstrar como o sistema para o controle da pressão deve funcionar nas linhas de distribuição de vapor de um navio tanque.

Figura 10 – Fluxograma exemplificando o funcionamento do sistema de controle de pressão para abastecimento de vapor.



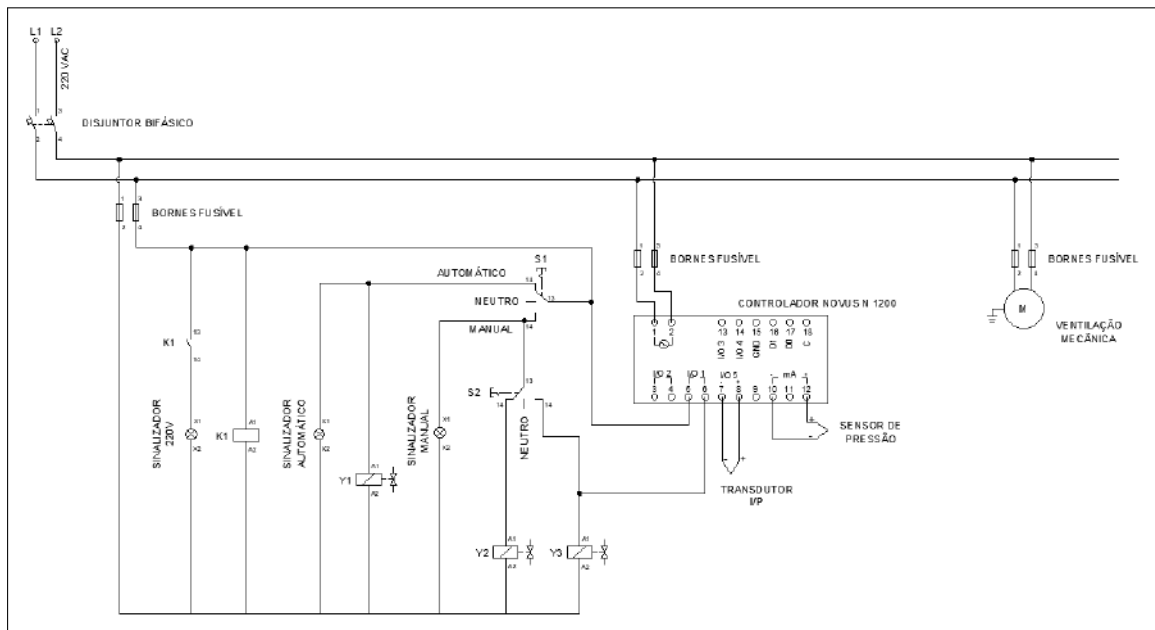
Fonte: Elaboração própria (2023).

O protótipo desenvolvido possui dois modos de operações, que devem ser escolhidos pelo operador que está a serviço da embarcação. No primeiro modo o sistema funciona de forma automática, onde o controlador industrial recebe o sinal elétrico oriundo do sensor de pressão e atua na regulação da pressão da linha de distribuição do navio através do transdutor de corrente para pressão e da válvula de descarga atmosférica. No segundo modo de operação, o sistema necessita da interferência humana para a regulação da pressão nas tubulações da embarcação. No capítulo 4 deste trabalho, item 4.1, encontra-se em detalhes como ocorre o funcionamento do protótipo desenvolvido.

3.1 PROJETO ELÉTRICO

O diagrama unifilar elétrico da Figura 11 foi elaborado após a compreensão do funcionamento do sistema. A intenção dessa representação é simular a implementação do sistema de controle de pressão para abastecimento de vapor nas linhas de distribuição dos navios tanques da frota *Suezmax*.

Figura 11 – Diagrama unifilar elétrico elaborado.

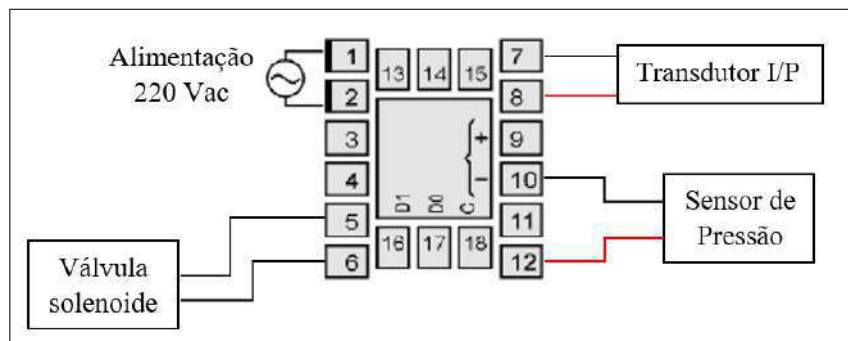


Fonte: Elaboração própria (2023).

O Controlador PID Auto-Adaptativo N1200 permite os dois tipos de alimentação, contínua e alternada. Para evitar o uso de fontes externas na alimentação do sistema, optou-se por utilizar uma tensão alternada de $220 V_{ac}$ ($60 Hz$), podendo a mesma ser fornecida pela própria rede elétrica da embarcação quando o sistema for instalado. O controlador permanecerá ligado independente do modo de operação escolhido, informando ao operador a quantidade de pressão existente nas linhas de distribuição de vapor do navio. Um disjuntor bipolar de $20 A$ foi utilizado na entrada do sistema de controle de pressão.

A Figura 12 mostra como devem ser realizadas as conexões dos equipamentos ao controlador PID N1200. Durante o desenvolvimento do sistema foi observado que seria necessário utilizar duas saídas do controlador. A primeira saída será responsável pela resposta do controle PID, pinos 7 e 8; a segunda pelo acionamento da válvula de descarga atmosférica, pinos 5 e 6.

Figura 12 – Diagrama de conexão dos equipamentos ao Controlador PID Auto-Adaptativo N1200.



Fonte: Elaboração própria (2023).

A válvula solenoide Y1, vista no diagrama elétrico da Figura 11, foi utilizada para o acionamento do transdutor I/P. O transdutor fornecerá uma variação de pressão de acordo com o sinal de entrada, apenas quando o sistema de controle de pressão estiver operando no modo automático. Quando o sistema passa para o modo manual, a válvula solenoide Y1 tem a sua alimentação interrompida fazendo com que o transdutor seja desativado e não realize nenhuma função.

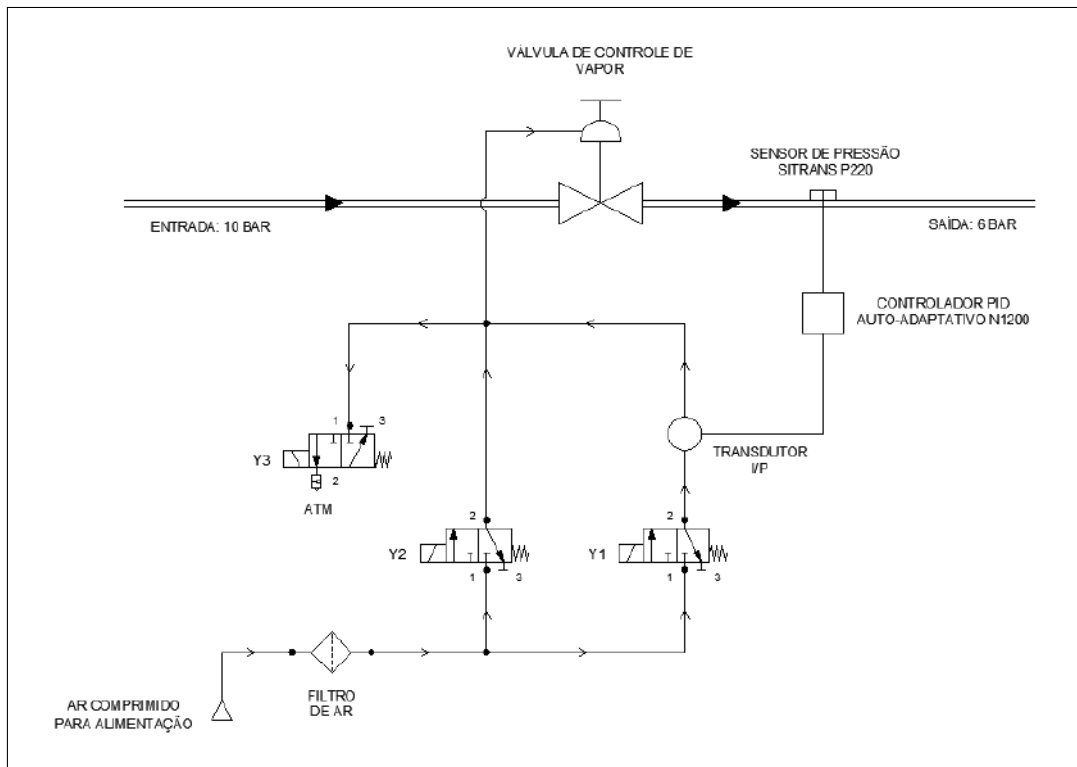
No que se refere ao funcionamento do sistema, são utilizadas outras duas válvulas solenoides, também vistas na Figura 11. A válvula solenoide Y2 é acionada somente no modo manual através da chave seletora S2 e tem como objetivo atuar sobre a válvula de controle naval. Em contrapartida, a válvula Y3 é acionada nos dois modos de operação, manual ou automático.

A ventilação mecânica do sistema é formada por um exaustor bifásico e duas venezianas. Assim como no controlador, também foi utilizado uma tensão de 220 V_{ac} no acionamento do exaustor para evitar o uso de fonte externas. O conjunto formado por esses dois dispositivos tem como finalidade fazer com que o ar circule no interior do sistema, retirando o calor gerado durante o funcionamento dos equipamentos.

3.2 PROJETO MECÂNICO

O projeto mecânico foi desenvolvido em conjunto com o projeto elétrico. O diagrama unifilar mecânico da Figura 13 mostra como o sistema de controle pressão deverá ser conectado nas tubulações de vapor do navio.

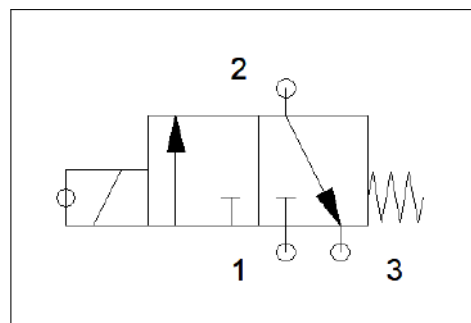
Figura 13 – Diagrama mecânico unifilar elaborado.



Fonte: Elaboração própria (2023).

Como mencionado no projeto elétrico, o sistema é composto por três válvulas solenoides. O tipo de válvula utilizado no sistema foi a 3/2 vias normalmente fechada (NF), acionadas com uma tensão de 220 V_{ac} e retorno por mola. Essa válvula possui três portas e duas posições, onde uma das portas sempre estará fechada independente da posição que a válvula se encontra. A simbologia apresentada na Figura 14 mostra que para esse tipo de válvula há uma de entrada e duas de saídas, fazendo com que exista dois circuitos para a passagem da ar.

Figura 14 – Simbologia de uma válvula solenoide 3/2 vias NF, com retorno por mola.



Fonte: Elaboração própria (2023).

A porta 3 das válvulas utilizadas no sistema tiveram que ser fechadas. Nas válvulas Y1 e Y2 isso foi necessário para evitar que o ar comprimido, que seria injetado no atuador da válvula de controle naval, retornasse e fosse descarregado quando as válvulas voltassem para sua posição inicial. Já a válvula Y3 teve que ser instalada de modo contrário as demais válvulas, como é mostrado na Figura 13, funcionando como uma válvula solenoide 2/2 vias normalmente fechada (NF). Essa instalação foi necessária para fazer com que a válvula cumprisse com sua função, retirar o excesso de pressão da linha de distribuição.

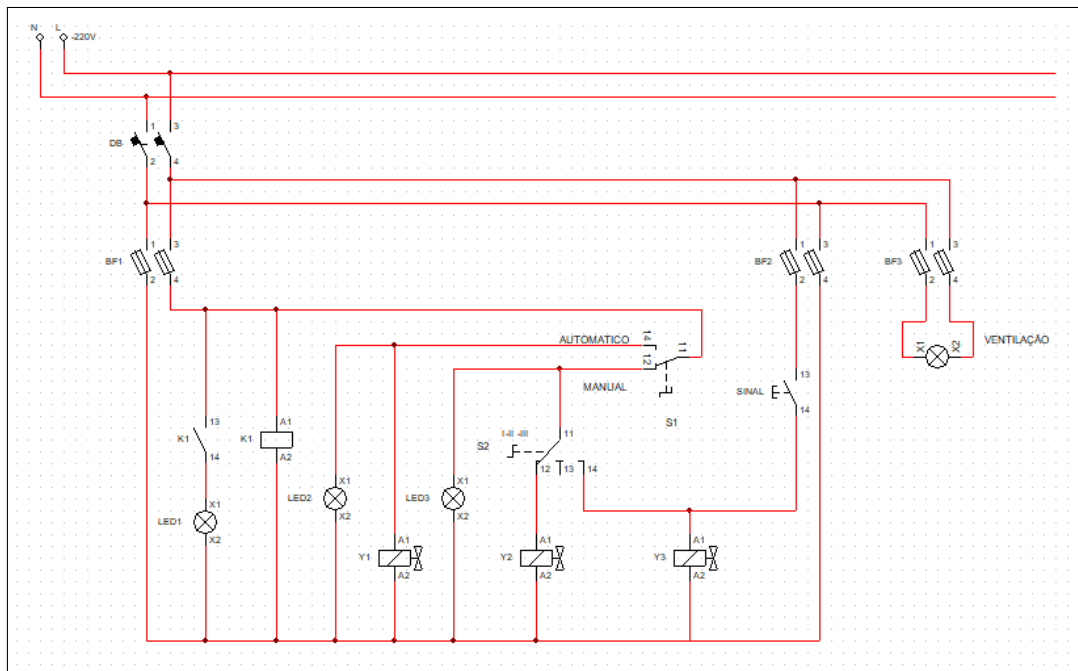
O funcionamento de uma válvula solenoide é bem simples. Quando uma válvula recebe um sinal elétrico na sua bobina, o êmbolo muda de posição permitindo que o ar comprimido flua em um dos circuitos de passagem. Esse ar é capaz de movimentar o atuador da válvula do navio e assim ajustar a passagem do vapor na linha de distribuição. Quando o sinal elétrico é retirado, a válvula retorna a sua posição inicial pela ação da mola interrompendo a passagem do ar.

Um filtro de metal poroso, conhecido como silenciador, foi instalado na válvula solenoide Y3 para reduzir o ruído do ar que está sendo descarregado na atmosfera.

3.3 SIMULAÇÕES

O sistema de controle de pressão do vapor foi simulado no *CADe SIMU* ©, um programa utilizado para representar circuitos de comandos elétricos. Nesse *software* não há o controlador PID N1200, então foi utilizada uma chave de contato normalmente aberta (NA) para simular o sinal gerado pelo equipamento. Essa chave representa a saída de alarme e foi nomeada de "SINAL", como pode ser visto na Figura 15. O seu funcionamento ocorre apenas quando o sistema está operando em modo automático, devido a interação do controlador com o sistema. Não houve necessidade de utilizar chaves para simular a saída de controle analógico, já que ela é controlada pelo algoritmo PID do controlador.

Figura 15 – Projeto elétrico do sistema simulado pelo *software* *CADe SIMU* ©.

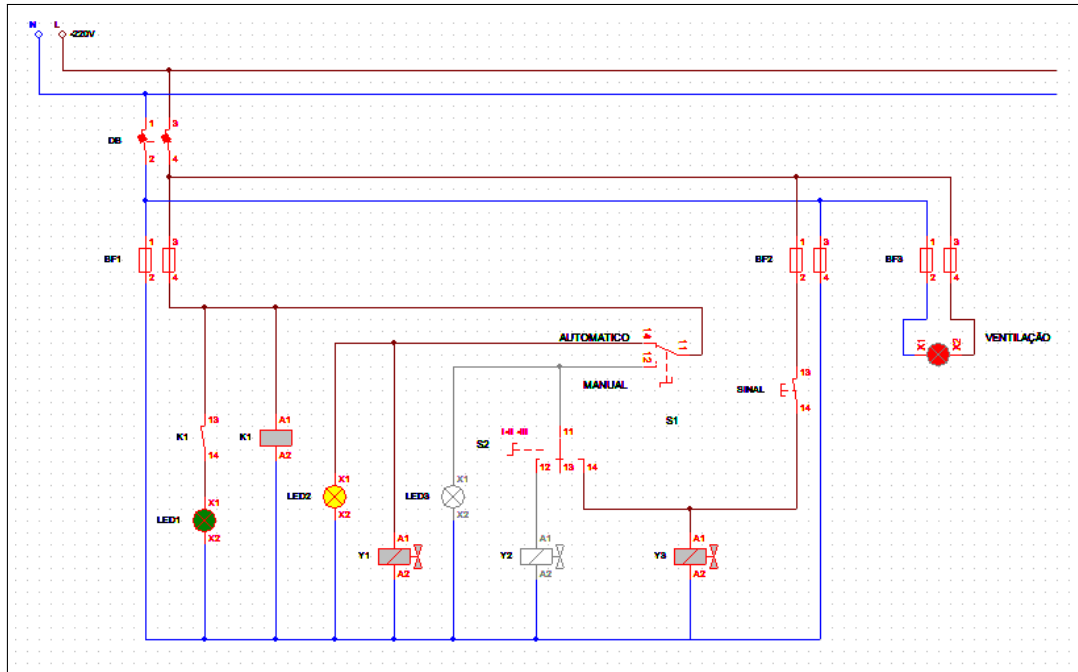


Fonte: Captura de tela do *software* *CADe SIMU* © (2023).

Uma lâmpada foi utilizada para representar o exaustor do sistema. Assim como no protótipo, a ventilação mecânica permanece acionada durante o funcionamento do sistema.

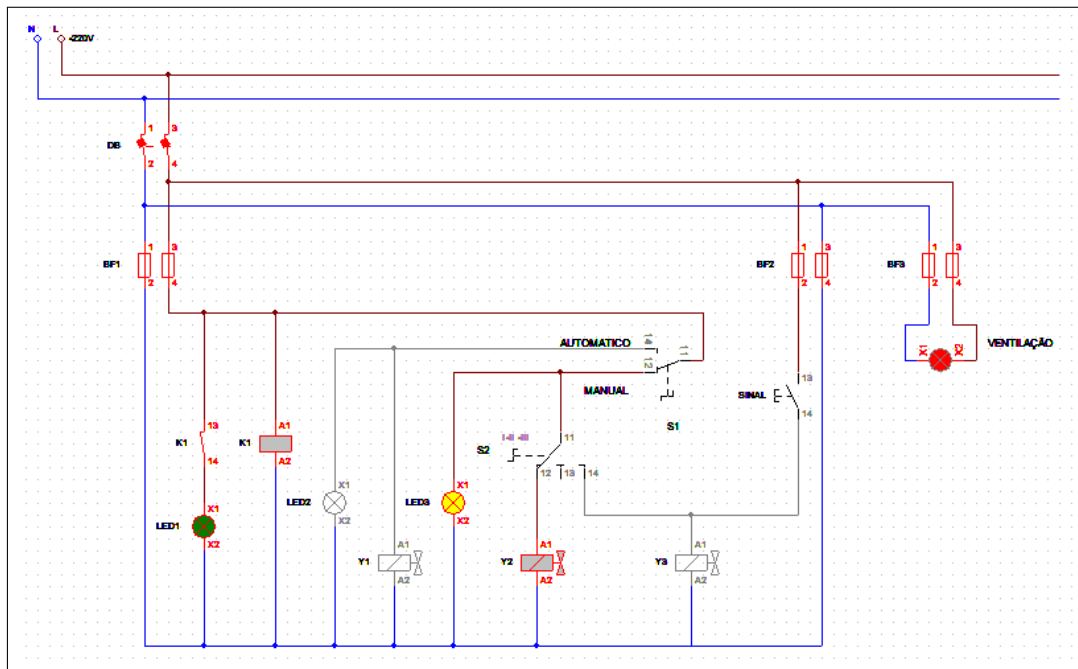
Através da simulação foi possível observar o funcionamento do projeto elétrico do sistema desenvolvido, bem como a mudança no modo de operação e o circuito de ventilação mecânica do painel. Além disso, pelas Figuras 16 e 17 é possível observar o acionamento das três válvulas solenoides durante os modos de operação escolhidos e o acionamento dos três sinalizadores que estão presentes no protótipo: um para informar que o sistema está ligado e, os outros dois, indicando cada um dos tipos de operação.

Figura 16 – Desempenho do sistema para a seleção do modo de operação automático.



Fonte: Captura de tela do *software* *CADe SIMU* © (2023).

Figura 17 – Desempenho do sistema para a seleção do modo de operação manual.



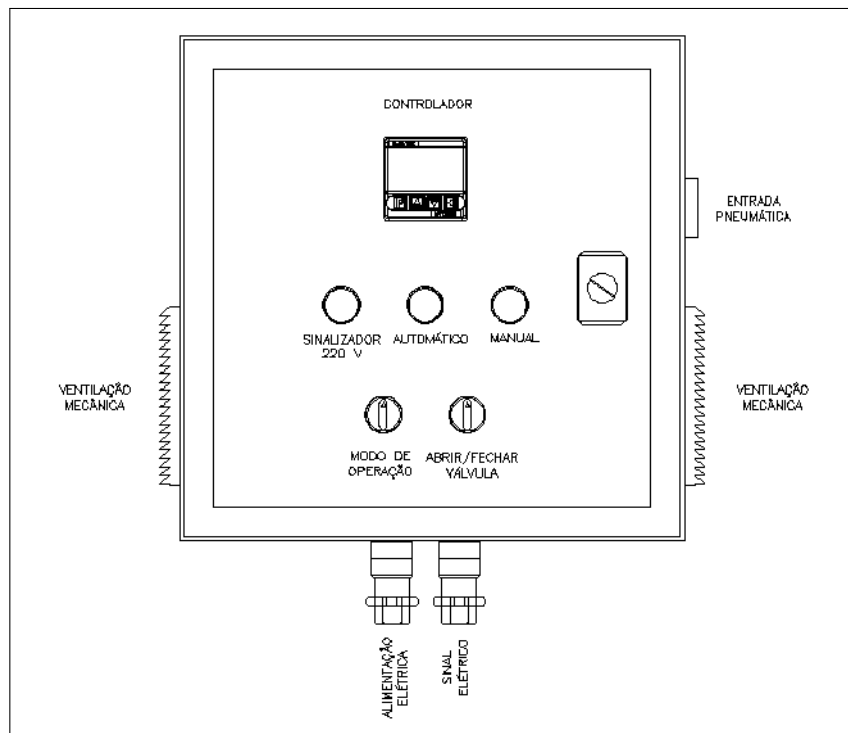
Fonte: Captura de tela do *software* *CADe SIMU* © (2023).

Não foi possível observar a atuação válvula de controle que pertence ao navio tanque, pois no *CADe SIMU* © não há nenhum componente que possua um funcionamento semelhante a esse equipamento.

3.4 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

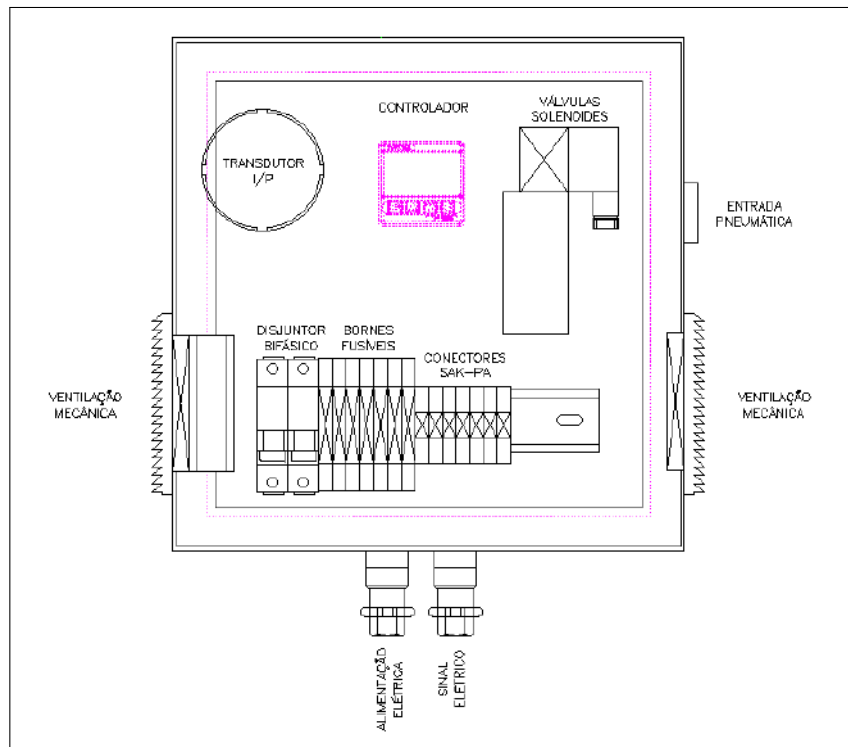
O sistema de controle de pressão para abastecimento de vapor foi montado em um armário de chapa de aço do fabricante *Cemar* ©. Os armários dessa marca funcionam como um painel de comando elétrico, sendo possível fixar a ele todos os equipamentos que foram utilizados para a construção sistema. O armário possui 30 centímetros de largura e 30 centímetros comprimento e 20 centímetros de profundidade. As Figuras 18 e 19 mostram um esboço de como os equipamentos encontram-se distribuídos no armário.

Figura 18 – Vista frontal do sistema de controle de pressão elaborada no *AutoCad* ©.



Fonte: Captura de tela do *software AutoCad* © (2023).

Figura 19 – Disposição dos equipamentos utilizados instalados no interior do painel.



Fonte: Captura de tela do *software AutoCad* © (2023).

Foram feitos cortes na parte externa do armário e, a eles, foram colocados as chaves seletoras, as lâmpadas e o controlador PID N1200. As válvulas solenoides e o transdutor I/P estão fixos no espelho da parte interna do painel; o disjuntor bifásico, o relé, os bornes fusíveis e os conectores SAK-PA também estão presos ao espelho por meio de um trilho de montagem do tipo DIN. A ventilação mecânica do sistema está localizada nas laterais do painel.

Antes de ser fixado ao painel, foram realizados testes ao transdutor I/P ABB TEIP11. O objetivo desse teste era observar o funcionamento do equipamento, visto que na construção do modelo foi utilizado um equipamento de segunda mão. Para alimentação pneumática do transdutor foi usado um compressor de ar, ajustado para uma pressão de saída de 8 *bars*. Para simular o sinal de entrada, foi utilizado um gerador de função com uma variação de corrente entre 2 e 24 *mA*. Na saída do transdutor I/P foi instalado um manômetro, com a finalidade de observar o valor da pressão. Os resultados obtidos durante esse teste podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados obtidos durante os testes ao transdutor I/P ABB TEIP11.

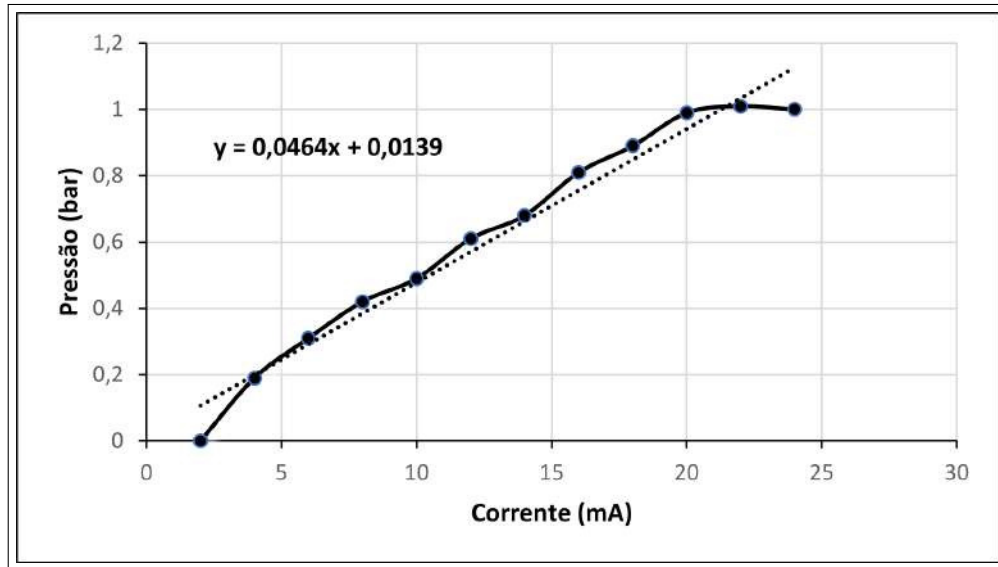
Corrente (mA)	Pressão (bar)
2	0
4	0,19
6	0,31
8	0,42
10	0,49
12	0,61
14	0,68
16	0,81
18	0,89
20	0,99
22	1,01
24	1

Fonte: Elaboração própria (2023).

O gráfico da Figura 20, produzido pelo *software Excel* ©, mostra a curva característica adquirida a partir dos valores da Tabela 1. Com esse gráfico, foi possível observar que o transdutor apresenta uma ação linear para a sua resposta de saída, assim como informado pelo fabricante do dispositivo. Quando a corrente aplicada estava abaixo de 4 mA , não houve resposta por parte do transdutor; quando essa corrente estava acima de 20 mA , não houve aumento na pressão de saída do transdutor.

Não houve necessidade de aplicar valores de corrente acima dos utilizados já que o sensor de pressão, utilizado pelo sistema, possui uma saída máxima de apenas 20 mA e o limite de corrente suportado pelo transdutor I/P é de 30 mA .

Figura 20 – Curva característica obtida a partir dos testes realizados ao transdutor I/P.



Fonte: Captura de tela do *software Excel* © (2023).

A Figura 21 mostra o protótipo final desenvolvido após a instalação dos equipamentos.

Figura 21 – Protótipo desenvolvido para o sistema.



Fonte: Elaboração própria (2023).

Ao longo da construção do sistema houve a necessidade de obter-se uma válvula solenoide com um fabricante diferente. A princípio, seria utilizado uma válvula 2/2 vias NF com retorno por mola, porém o modelo encontrado não era adequado para o painel que o sistema de foi montado. Na Figura 22 é possível observar que os modelos utilizados possuem a pressão máxima de entrada diferente, assim teve-se o cuidado de regular a

pressão para o funcionamento do sistema em 8 *bars*. Se uma pressão maior que essa for aplicada, as válvulas não funcionaram de maneira correta e o desempenho do sistema de controle de pressão será prejudicado.

Figura 22 – Válvulas solenoides utilizadas no sistema de controle de pressão proposto.

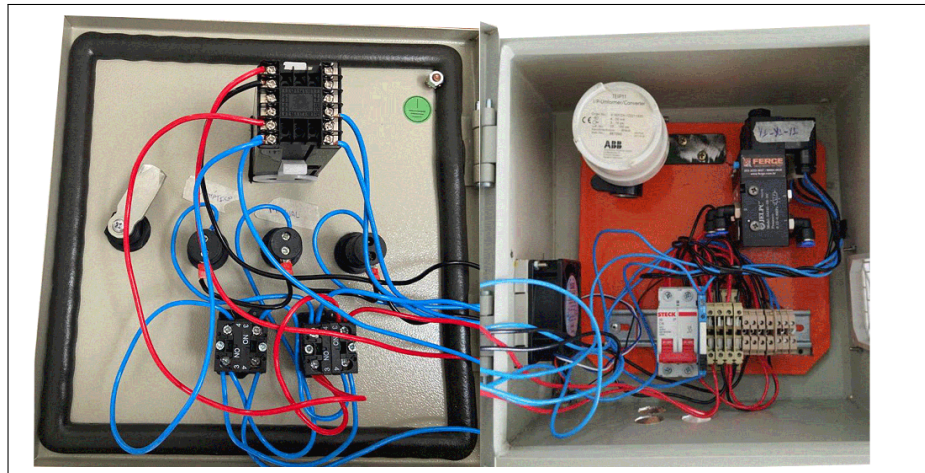


Fonte: Elaboração própria (2023).

3.4.1 Conexões elétricas e mecânicas

Nas conexões elétricas utilizou-se condutores flexível de 2,5 mm^2 . Os fios na cor vermelha foram utilizados para os circuitos de 220 V_{ac} , fios pretos para o neutro, fios azuis para os circuitos de comando e fios verde-amarelo para o aterramento do painel. Os conectores SAK-PA foram utilizados para as ligações elétricas e os bornes fusíveis para proteção do controlador PID N1200, do circuito de ventilação mecânica e na entrada do sistema.

Figura 23 – Conexões elétricas feitas aos equipamentos do sistema de controle de pressão.



Fonte: Elaboração própria (2023).

Nas conexões mecânicas utilizou-se mangueiras pneumática de poliuretano, ou PU, de 6 *mm* de diâmetro. Esse tipo de mangueira é bastante utilizada em circuitos pneumáticos devido sua maleabilidade, podendo ser dobrada durante o uso, adequando-se a qualquer ambiente ao qual está instalada. Além disso, foram utilizadas conexões pneumáticas do tipo engate rápido em forma de "T" e conexões de 90° nas portas das válvulas solenoide. Esse tipo de conexão permite uma maior facilidade no momento de instalação das mangueiras e também em futuras manutenções.

Figura 24 – Mangueiras e conexões pneumáticas utilizadas no modelo.



Fonte: Elaboração própria (2023).

4 RESULTADOS

Este capítulo do trabalho apresenta os resultados obtidos por meio de testes preliminares realizados ao sistema de controle de pressão para abastecimento de vapor em navios tanque.

A proposta inicial seria que o projeto fosse testado em um sistema semelhante a uma linha de distribuição de vapor de uma embarcação, construído a partir de um acumulador de pressão, uma válvula com atuador pneumático e tubulações de PVC (Policloreto de vinila). Porém, foi visto que seria demandado muito tempo e recurso financeiro para a construção desse sistema, tornando o projeto ainda mais caro. Assim, para a simulação da válvula de controle do navio tanque foi utilizado um cilindro pneumático.

4.1 DESEMPENHO DO SISTEMA DE CONTROLE DE PRESSÃO

A seleção do modo de operação é realizada pela chave seletora S1, instalada na parte frontal do modelo. Quando essa chave é movida para o lado esquerdo o sistema passa a operar no modo manual; o lado direito seleciona o modo manual de operação. Cada um dos sinalizadores na cor branca, visto na Figura 21, é acionado quando um dos modos de operação é escolhido. O sinalizador da cor verde indica que o painel está sendo alimentado com uma tensão de $220 V_{ac}$.

No modo manual o controlador PID N1200 não executa nenhuma função do controle PID, ficando acionado apenas para mostrar o valor da pressão da linha de distribuição do navio tanque. Nesse modo, o operador da embarcação comanda o sistema por meio da chave seletora S2, também instalada na parte frontal do painel. Essa chave controla a abertura da válvula de controle da embarcação através da válvula solenoide Y2, e também controla a válvula de descarga atmosférica Y3.

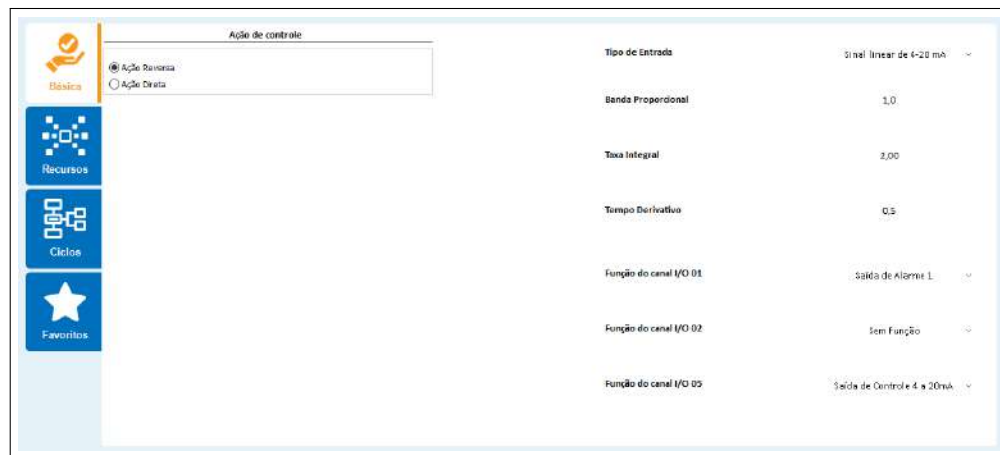
No modo automático o sistema começa a funcionar após o término do processo de auto-sintonia, realizado pelo controlador PID N1200. Na parte frontal do equipamento há um sinalizador na cor vermelha, denominado "*TUNE*", que indica ao operador que esse processo está ocorrendo. Quando a auto-sintonia do equipamento é encerrada, o sinalizador é apagado e o sistema começa a funcionar.

4.1.1 Configurações do controle PID

As configurações das variáveis do controle PID e os demais parâmetros utilizados pelo sistema foram realizadas através do *software QuickTune* © e enviadas ao controlador pela porta USB. Além disso, esse *software* disponibiliza gráficos relacionados à atuação do controle PID.

O controlador PID N1200 possui algumas restrições com relação aos parâmetros do PID, não permitindo um número maior que duas casas decimais aos seus valores. Os valores PID adicionados ao controlador podem ser observados pela captura de tela do *software* mostrada na Figura 25. A princípio, esses valores foram escolhidos com base nas informações do fabricante do equipamento, porém foram alterados de acordo com os testes realizados. Foi determinada uma entrada linear para um sinal de corrente que varia entre 4 e 20 *ma*, valor esse gerado pelo sensor de pressão piezoresistivo.

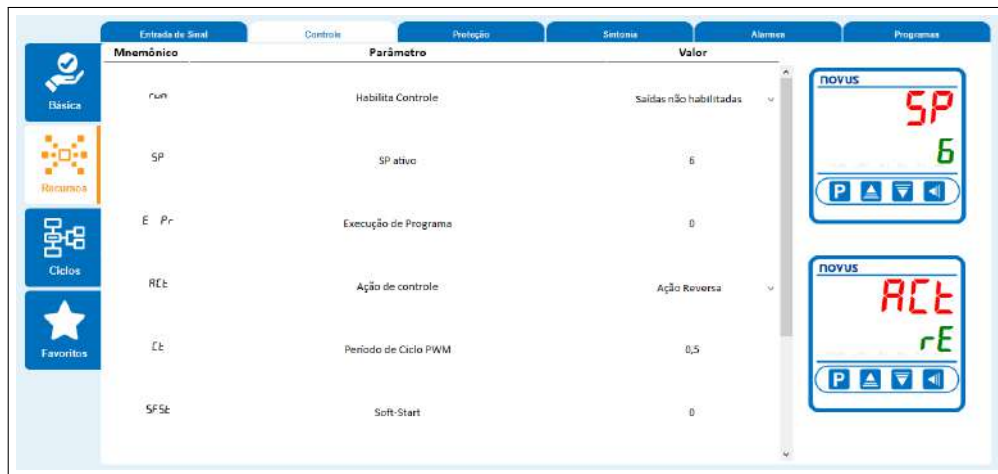
Figura 25 – Parâmetros do controle PID, tipo de sinal entrada e saídas do projeto.



Fonte: Captura de tela do *software QuickTune* © (2023).

O sistema de controle de pressão para abastecimento de vapor foi desenvolvido com o intuito de manter a pressão da linha de distribuição em 6 *bars*. A captura de tela da Figura 26 mostra a configuração do *setpoint* do sistema. A lógica de controle escolhida para o sistema foi de ação reversa, acionando a saída de controle quando o valor da pressão medido na tubulação da embarcação estiver abaixo do valor desejado.

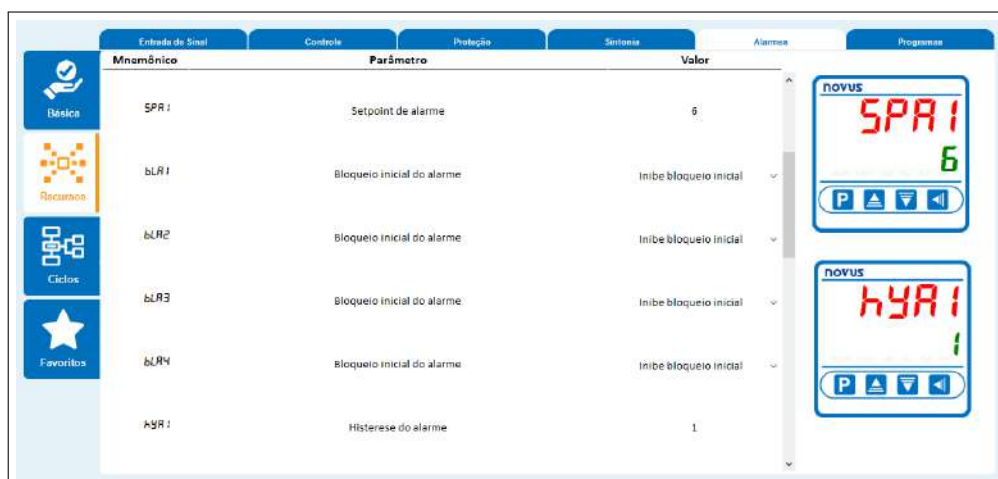
Figura 26 – *Setpoint* desejado e lógica de controle.



Fonte: Captura de tela do *software QuickTune* © (2023).

Na Figura 25, pode-se também observar os dois tipos de saída utilizados pelo sistema. A saída de alarme, responsável pelo acionamento da válvula de descarga, foi ajustada para ser acionada quando o valor da pressão medido ultrapassar 1 *bar* do valor desejado. A captura de tela da Figura 27 mostra como resultou a configuração dessa saída no *software*.

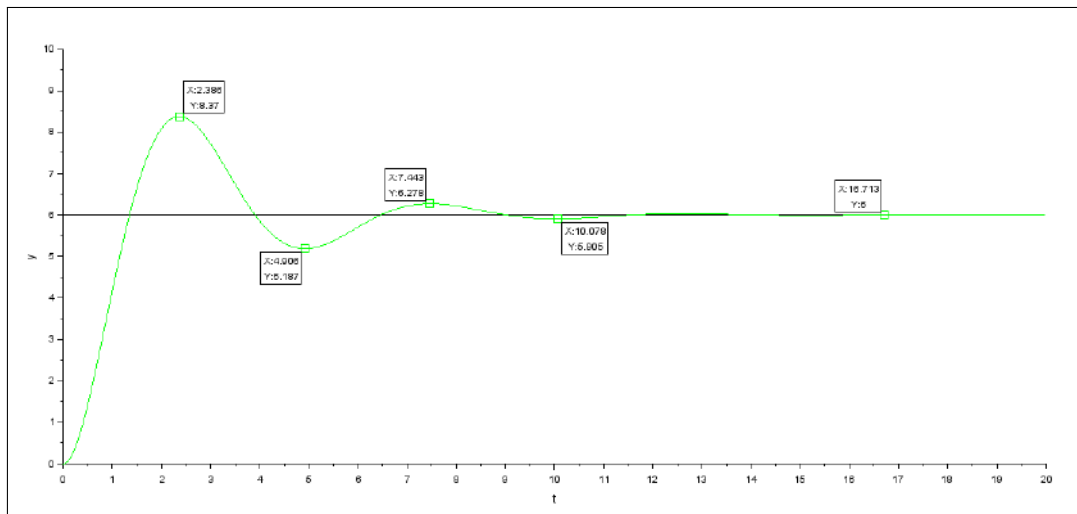
Figura 27 – Configuração para a saída de alarme.



Fonte: Captura de tela do *software QuickTune* © (2023).

A saída de controle do sistema é acionada quando o valor da pressão na linha de distribuição está abaixo do *setpoint*. O gráfico da Figura 28 é resultado da combinação dos valores das constantes do PID. Esse controle possui um *overshoot* de quase 2,4 *bars* do valor desejado para a pressão de saída do sistema, oscilando durante 16 segundo até que o valor desejado seja atingido.

Figura 28 – Resposta do controle para os parâmetros iniciais: $K_c = 1$, $\tau_i = 2$ e $\tau_d = 0,5$.



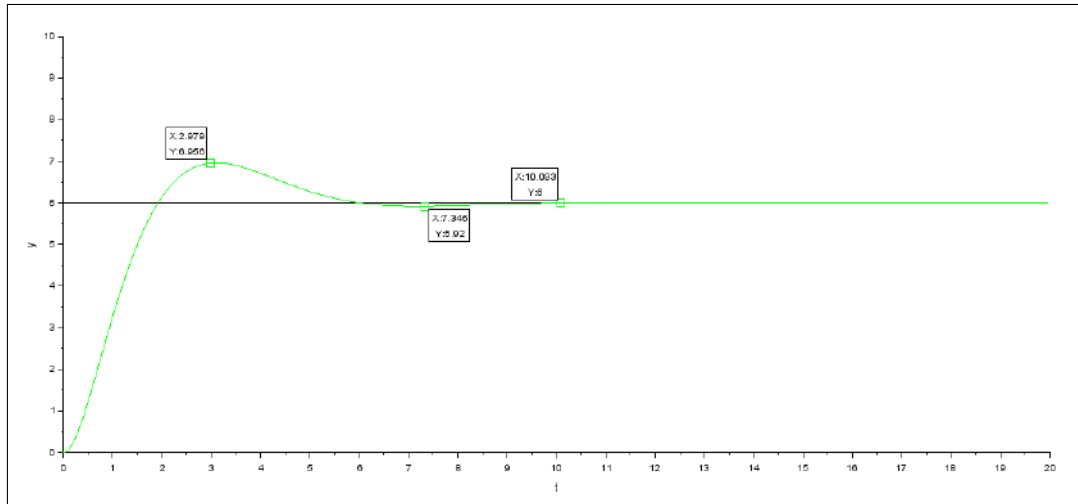
Fonte: Captura de tela do *software QuickTune* © (2023).

As constantes do controle PID devem atuar em conjunto, buscando uma melhor solução para a resposta de saída. O resultado inicial mostrou que o alto valor da taxa integrativa provocou oscilações que não puderam ser resolvidas pelas outras duas constantes. O valor da banda proporcional provocou o *overshoot* visto no gráfico da Figura 28 e, mesmo com um valor baixo para a constante derivativa, a resposta de saída do sistema foi lento. Por essas razões, os valores iniciais para o controle PID não atenderam o propósito do projeto.

Para o sistema proposto, o controle PID não deve possuir muitas oscilações ou *overshoots* que ultrapassem 1,5 *bars* da pressão de saída desejada. Caso isso aconteça, haverá muitos episódios onde a válvula de descarga atmosférica é acionando, atrasando ainda mais o resultado final desejado. A resposta de saída também deve ser rápida, garantindo um funcionamento mais eficiente para o sistema. Com esse propósito, foi necessário realizar alterações nos parâmetros do controle até que um controle preciso fosse encontrado.

Num primeiro momento, buscou-se eliminar as oscilações causadas durante o processo. O fabricante *NOVUS* ©, no manual do controlador, informa que para diminuir o *overshoot* uma das soluções é reduzir a taxa de integração do controle PID. O gráfico da Figura 29 mostra que, após uma redução do valor inicial ainda houve uma ultrapassagem de quase 1 *bar* acima do valor desejado, porém o tempo que o processo leva para atingir o *setpoint* foi reduzido em 6 segundos.

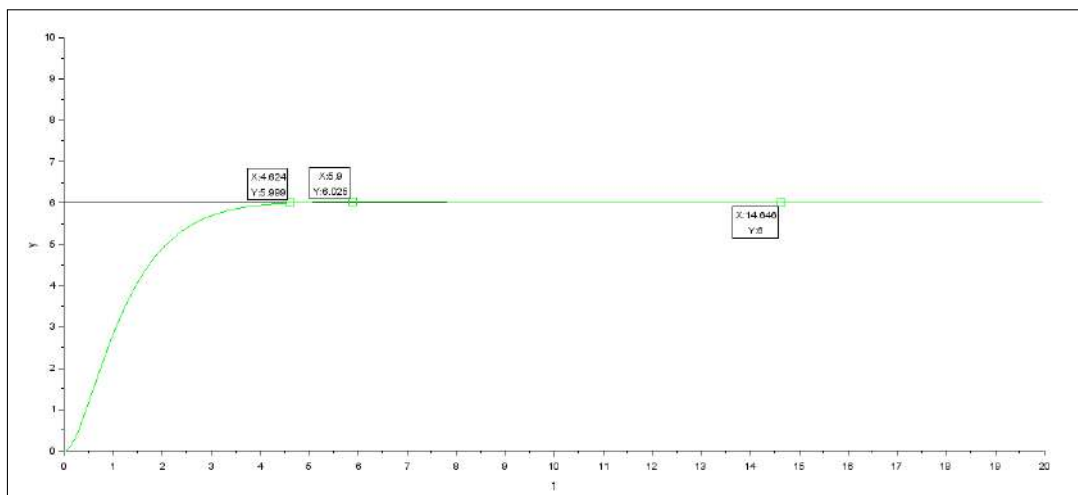
Figura 29 – Alteração da taxa integrativa do controle PID: $K_c = 1$, $\tau_i = 1$ e $\tau_d = 0,5$.



Fonte: Captura de tela do *software QuickTune* © (2023).

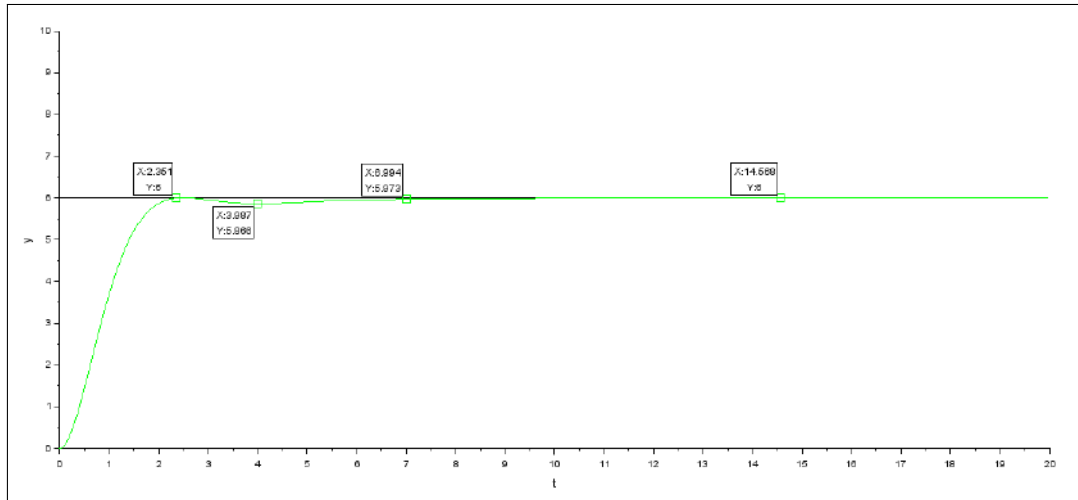
No gráfico da Figura 30 é visto que, com uma nova redução da taxa de integração, a pressão não ultrapassou o valor desejado, sendo atingida em quase 6 segundos após o início do processo. Esse controle seria suficiente para o sistema de controle de pressão, porém outros testes foram realizados com o objetivo de tornar a resposta final do processo mais rápida. Após diversas mudanças nos três parâmetros do controle, foi obtida a resposta vista na Figura 31.

Figura 30 – Redução da taxa de integração pela metade: $K_c = 1$, $\tau_i = 0,5$ e $\tau_d = 0,5$.



Fonte: Captura de tela do *software QuickTune* © (2023).

Figura 31 – Resultado final para o controle do sistema: $K_c = 1,1$, $\tau_i = 0,65$ e $\tau_d = 0,1$.



Fonte: Captura de tela do *software QuickTune* © (2023).

O processo obtido pelo controle da Figura 31 leva cerca de 2 segundos para atingir o *setpoint* do sistema, sendo a resposta mais rápida encontrada no decorrer dos testes. Nesse controle há uma queda de, aproximadamente, 0,14 *bar* da pressão de saída. A variação da resposta final do processo, em torno de 0,03 *bar*, não interferiu no desempenho do sistema durante os testes realizados.

O controlador industrial da *NOVUS* © ainda possui outros parâmetros para configuração como, por exemplo, mais saídas de alarmes, calibração, portas de entradas e saídas, dentre outros. Não houve necessidade de realizar modificações para esses parâmetros, visto que os mesmos não foram utilizados no controle do sistema de controle de pressão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho esclarece que o projeto para o sistema de controle de pressão para abastecimento de vapor em navios tanque é viável, apresentando bons resultados durante os testes preliminares. O uso do Controlador PID Auto-Adaptativo N1200 proporcionou bons resultados para o processo, comprovando ser uma ferramenta eficiente, com grande facilidade em compreender como o processo ocorre e fácil ajuste do controle PID por meio do *software* ou pelos botões frontais. O próprio fabricante disponibiliza recursos que ajudam a entender o funcionamento do equipamento, auxiliando nos problemas que podem ocorrer durante o desenvolvimento. Essas características colaboram para uma maior segurança e qualidade do processo, tornando o projeto útil para a embarcação.

O principal custo da automação deste processo está na aquisição de um transdutor de corrente para pressão ABB TEIP11, podendo ser encontrado no mercado internacional a custos exorbitantes, em torno de US\$ 1.200,00. Tal fator pode ser um impeditivo para implementação imediata do sistema de controle de pressão, visto que esse equipamento é essencial para o seu funcionamento. Porém, quando comparado com o valor que a embarcação gasta por dia enquanto estando parada e realizando manutenções nos sistemas, esse custo é mínimo.

As válvulas solenoides utilizadas no protótipo podem ser substituídas por novas, com a pressão de entrada maior e dimensões físicas menores, diminuindo assim o espaço utilizado por esse equipamento dentro do painel. Pode-se também encontrar comercialmente válvulas com as especificações corretas, sem precisar fazer ajustes ou adaptações em válvulas com características diferentes da necessária.

O único impedimento encontrado ao longo do desenvolvimento do protótipo foi o tempo que o controlador leva para realizar o processo de auto-sintonia e combinar as constantes do controle PID. No primeiro teste esse processo demorou cerca de 25 minutos, porém ao longo dos testes esse tempo diminui à medida que parâmetros para um controle perfeito era encontrado.

Para que o sistema desenvolvido pudesse ser instalado e testado em um navio tanque seria necessário a obtenção de uma autorização da Transpetro ©. Até o final do formulação desse trabalho tais autorizações não foram obtidas, impedindo a implementação do sistema de controle de pressão de vapor em um navio tanque da frota *Seuzmax*.

Como sugestões futuras pode-se buscar outras plataformas para a programação do controlador, que sejam capazes de criar uma interface que possa controlar o sistema a partir do CCM (Centro de Controle de Máquinas) da embarcação, fazendo com que o operador não seja obrigado a ir ao local onde o sistema será instalado para fazer a sua ativação, seja manual ou automática. Além disso, o uso de equipamentos que possam ser encontrados no mercado nacional torna o projeto mais barato, quando comparado a outros sistemas que existem no mercado.

Diante disso, o processo fornecido pelo sistema de controle de pressão para abastecimento de vapor pode trazer vantagens para os navios tanques, uma vez que o mesmo reduz os problemas relatados pelos operadores que estão a serviço da embarcação e, através do que foi observado durante os testes, controla a pressão no valor desejado corretamente.

REFERÊNCIAS

- ALFA LAVAL. **Aalborg XW - Exhaust gas economizer**. 2015. Disponível em: <<https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/marine-and-transportation/marine/aalborg-xw.pdf>>. Acesso em 28/04/2023.
- AMARAL, A. N. **Critérios para análise de viabilidade para manutenção preditiva em válvulas de controle em indústrias de processo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.
- ANALYTICS, A. M. . **TEIP11 I/P signal converter for standard signals**. 2018. Disponível em: <https://library.e.abb.com/public/dea6ae54dd524f888a999ffa5e26a210/DS_TEIP11_EN_D.pdf>. Acesso em 06/09/2022.
- BABCOCK; WILCOX. **Steam its generation and use**. 41. ed. Ohio, U.S.A: Babcock & Wilcox, 2005.
- BOTELHO, M. H. C.; BIFANO, H. M. **Operação de caldeira: gerenciamento, controle e manutenção**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 2015.
- CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010.
- CIBO. **Energy Efficiency Handbook**. Warreton, VA: COUNCIL OF INDUSTRIAL BOILER OWNERS, 1997.
- DIAZ, V. H. H.; ENCALADA, J. L. P.; PEÑA, A. P. Técnicas de gestión energética en sistemas de vapor. **Revista Politécnica**, 2015.
- FERREIRA, S. A. **Sistema de gás inerte em navios tanques**. Dissertação (Mestrado) — Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, 2016.
- FIALHO, A. B. **Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises**. 7. ed. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2002.
- FORSMAN, C.; MORIN, J. **World valve: development of an outdated valve range**. Dissertação (Mestrado) — Luela University of Tecnology – Ergonomic Design e Production Engineering, 2005.
- GHOSH, A.; ROY, S.; SARKAR, C. **Design and simulation of MEMS based piezoresistive pressure sensor for enhanced sensitivity**. 2013. Disponível em: <<https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.ieee-art-000006533510>>. Acesso em 07/09/2022.
- GRANDO, F. L. **Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados em ambiente LabVIEW para aquecedores solares**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de tranferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- JÚNIOR, F. G. F. **Metodologia para re-sintonia de controladores pid industriais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

- LIMA, A. O. F. d. **Mobilização de Navios Tanque: uma proposta**. 1. ed. São Paulo: Editora Dialética, 2021.
- MARTINELLI, L. C. Geradores de vapor. **UNIJUÍ, Panambi RS**, 2003.
- MARTINS, A. d. P.; SCHURT, E. L.; RAMOS, F. S. d. C. **Estudo da viabilidade de automação do processo de brassagem, filtragem e fervura da cervejaria Floresta**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- MARTINS, D. F. F. **Otimização do Funcionamento de Caldeiras Aquatubulares em Indústria de Processo Químico**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- NANDWANA, D.; PERIASWAMY, S. Tube failure analysis and residual life assessment in water tube boiler. **International Mechanical Engineering Congress Exposition**, 2010.
- NOGUEIRA, L. A. H.; ROCHA, C. R.; NOGUEIRA, F. J. H. **Eficiência energética no uso de vapor**. [S.l.]: Eletrobrás, 2005.
- NOVUS. **Controlador PID Auto-Adaptativo N1200—Manual de instruções**. 2022. Disponível em: <<https://www.novus.com.br/site/>>. Acesso em 22/09/2022.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.
- OLIVEIRA, D. J. Análise de operação de caldeiras de acordo com a nr-13. **Faculdade de Engenharia Mecânica**, 2014.
- OLIVEIRA, J. A.; RODRIGUES, G. A.; GONÇALVES, L. B. Projeto caldeira aquatubular na indústria predilecta alimentos ltda. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 406–416, 2019.
- PATSKO, L. F. Tutorial—aplicações, funcionamento e utilização de sensores. **Maxwell Bohr: Instrumentação eletrônica**, 2006.
- PERILLO, S. R. P. **Determinação do tempo de resposta de transdutores de pressão utilizando o método de medida direta**. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares, 1994.
- RIBEIRO, M. A. **Controle de processo**. 7. ed. Salvador: Tek Treinamento & consultoria, 2001.
- RIBEIRO, M. A. **Válvulas de controle e segurança**. 5. ed. Salvador: Primavera, 2003.
- RODRIGUES, M. L. Curso eficiência energética em sistemas de vapor. **DATTE: Educação & Treinamento. Belo Horizonte**, 2012.
- RODRIGUES, N. R. S. **Estudo da eficiência energética de uma caldeira aquatubular**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.
- SÁNCHEZ, C. G. *et al.* Tecnologia da gaseificação de biomassa. **Campinas, SP: Editora Átomo**, 2010.

SHIRAHIGE, A. B. **Metodologia para aferição da ação de controle proporcional integral derivativa implementada em controladores industriais**. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

SIEMENS. **SITRANS P200/P210/P220**. 2011. Disponível em: <<https://new.siemens.com/global/en/products/automation/process-instrumentation/pressure-measurement/sitrans-p200-p210-p220.html>>. Acesso em 06/09/2022.

SILVA, A. C. C. **Conservação e gerenciamento de energia em sistemas de vapor**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

SILVA, E. C. M. **Técnicas de alocação de polos aplicadas no projeto de controladores para um servoposicionador eletropneumático**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2005.

SILVA, J. A. F. d.; LAGO, C. L. d. Módulo eletrônico de controle para válvulas solenóides. **Química Nova**, SciELO Brasil, 2002.

TAMESON. **SOLENOID VALVE TYPES**. 2017. Disponível em: <<https://tameson.com/solenoid-valve-types.html>>. Acesso em 09/09/2022.

TRANSPETRO. **Frota Transpetro**. 2019. Disponível em: <<https://transpetro.com.br/transpetro-institucional/nossas-atividades/transporte-maritimo/frota-transpetro.htm#0>>. Acesso em 28/11/2022.

VALIAS, F. F. Geração de vapor: análise comparativa entre uma instalação de caldeira fogotubular a óleo e a cavaco em uma empresa alimentícia. **Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas**, 2021.

WENDLING, M. Sensores. **Universidade Estadual Paulista. São Paulo**, 2010.

ZIGMANTES, P. V. M. **MARINHA DO BRASIL DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS ENSINO PROFISSIONAL MARÍTIMO**. 2011. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/50036840/Apostila_Caldeiras.pdf>. Acesso em 29/08/2022.

ANEXOS

ANEXO A – Informações técnicas sobre a caldeira de recuperação de gases.

Figura 32 – *Aalborg XW - Exhaust gas economizer.*



Aalborg XW

Exhaust gas economizer



The Aalborg XW is a water tube, forced circulation exhaust gas economizer. It is specially designed to utilize thermal energy in diesel engine exhaust gas but the basic design suits numerous applications.

Steam capacity: 0.2 - 17.0 t/h
Design pressure: 18 bar(g) or 24 bar(g)

Description
The Aalborg XW is a water tube, forced circulation exhaust gas economizer. It is specially designed for heat recovery from diesel engine exhaust gas but the basic design suits numerous applications.

The heating surface is made of double gilled tubes with a spacing which minimizes soot build-up. It is supplied with an efficient cleaning system with steam or with compressed air sootblowers.

The economizer can be supplied with a dividing wall system for connection of several exhaust gas sources to one economizer.

The Aalborg XW may be used in conjunction with an oil-fired auxiliary boiler or a separate steam drum, in both cases acting as a steam/water separator.

Boiler characteristics:

- Forced-circulation exhaust gas economizer
- Water-tube economizer with gilled tubes for exhaust gas heat recovery
- Robust, well-proven construction, able to withstand vibrations and exhaust gas pulsation
- Heating surface composition which ensures the required output from the most compact unit
- Efficient, well-proven cleaning system with steam or air soot blowers
- Superheater and preheater as an option

FONTE: (ALFA LAVAL, 2015)

ANEXO B – Informações técnicas dos equipamentos utilizados pelo sistema.

Figura 33 – Sensor de pressão SITRANS P220.

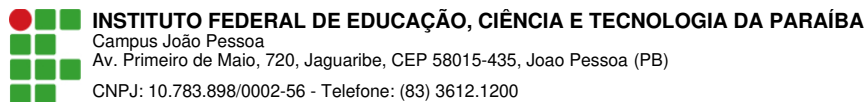
Pressure Measurement Pressure transmitters Single-range transmitters for general applications	
SITRANS P220 for gauge pressure	
Technical specifications	
Application	Gauge pressure measurement
Mode of operation	Liquids, gases and vapors
Measuring principle	Piezoresistive measuring cell (stainless steel diaphragm)
Measured variable	Gauge pressure
Inputs	
Measuring range	
• Gauge pressure	
- Metric	25 ... 1000 bar (36 ... 14500 psi)
- US measuring range	30 ... 14500 psi
Output	
Current signal	4 ... 20 mA
• Load	(U _B - 10 V)/0.02 A
• Auxiliary power U _B	DC 7 ... 33 V (10 ... 30 V for Ex)
Voltage signal	0 ... 10 V DC
• Load	≥ 10 kΩ
• Auxiliary power U _B	12 ... 33 V DC
• Power consumption	< 7 mA at 10 kΩ
Ratiometric output	0 ... 90 %
• Load	≥ 10 kΩ
• Auxiliary power U _B	5 V DC ± 10 %
• Power consumption	< 7 mA at 10 kΩ
Characteristic curve	Linear rising
Measuring accuracy	
Error in measurement of limit setting incl. hysteresis and reproducibility	<ul style="list-style-type: none"> • Typical: 0.25 % of measuring span • Maximum: 0.5 % of measuring span
Step response time T₉₀	< 5 ms
Long-term stability	
• Lower range value and measuring span	0.25 % of measuring span/year
Influences of ambient temperature	
• Lower range value and measuring span	0.25 %/10 K of measuring span
• Influence of power supply	0.005 %/V
Operating conditions	
• Process temperature	-40 ... +120 °C (-40 ... +248 °F)
• Ambient temperature	-25 ... +85 °C (-13 ... +185 °F)
• Storage temperature	-50 ... +100 °C (-58 ... +212 °F)
• Degree of protection (to EN 60529)	<ul style="list-style-type: none"> • IP 65 with connector per EN 175301-803-A • IP 67 with device plug M12 • IP 67 with cable • IP 67 with cable quick screw connection
Electromagnetic compatibility	<ul style="list-style-type: none"> • acc. IEC 61326-1/-2/-3 • acc. NAMUR NE21, only for ATEX versions and with a max. measuring deviation ≤ 1 %
Design	
Weight	Approx. 0.090 kg (0.198 lb)
Process connections	See dimension drawings
Electrical connections	<ul style="list-style-type: none"> • Connector per EN 175301-803-A Form A with cable inlet M16x1.5 or 1/4-14 NPT or Pg 11 • Device plug M12 • 2 or 3-wire (0.5 mm²) cable (2 ± 5.4 mm) • Quick cable quick screw connection
Wetted parts materials	
• Measuring cell	Stainless steel, mat. No. 1.4016
• Process connection	Stainless steel, mat. No. 1.4404 (SST 316 L)
Non-wetted parts materials	
• Enclosure	Stainless steel, mat. No. 1.4404 (SST 316 L)
• Rack	Plastic
• cables	PVC
Certificates and approvals	
Classification according to pressure equipment directive (PED 2014/68/EU)	For gases of fluid group 1 and liquids of fluid group 1; complies with requirements of article 4, paragraph 3 (sound engineering practice)
Lloyd's Register of Shipping (LR) ¹⁾	12/20010
Germanischer Lloyd (GL) ¹⁾	GL 19740 11 HH00
American Bureau of Shipping (ABS) ¹⁾	ABS_11_HG 789392_PDA
Bureau Veritas (BV) ¹⁾	BV 271007A0 BV
Det Norske Veritas (DNV) ¹⁾	A 12553
Drinking water approval (ACS) ¹⁾	ACS 15 ACC NY 360
EAC ¹⁾	№ TC RU C-DEГ505.B.00732 OC НАИИО «ЦОБЭ» OF 186595C
CRN ²⁾	
Underwriters Laboratories (UL) ¹⁾	
• for USA and Canada	UL 201 10217 - E34453
• worldwide	IEC UL DK 21845
Explosion protection	
Intrinsic safety ¹⁾ (only with current output)	Ex II 1/2 G Ex ia IIC T4 Ga/Gb Ex II 1/2 D Ex ia IIC T125 °C Da/Db
EC type-examination certificate	SEV 10 ATEX 0146
Connection to certified intrinsically-safe resistive circuits with maximum values:	U _i ≤ 30 V DC; I _i ≤ 100 mA; P _i ≤ 0.75 W
Effective internal inductance and capacity for versions with plugs per EN 175301-803-A and M12	L _i = 0 nH; C _i = 0 nF
CSA ²⁾	70006348 Class I, Division 1, Groups A, B, C and D; Class II, Division 1, Groups E, F and G, Class III Class I, Division 2, Groups A, B, C and D; Class II, Division 2, Groups F and G, Class III A/Ex ia IIC T4 Ga/Gb A/Ex ia IIC T125°C Da/Db
¹⁾ For variants with output signal 0 ... 5 V and ratiometric output available soon.	
²⁾ See ordering data for available versions.	

FONTE: (SIEMENS, 2011)

Figura 34 – Transdutor de corrente para pressão ABB TEIP11.

Specification			
Input (electric)			
Signal range			
0 to 20 mA or 4 to 20 mA			
0 to 10 mA or 10 to 20 mA			
4 to 12 mA or 12 to 20 mA			
(additional ranges available upon request)			
Input resistance			
$R_i = 260 \Omega$ at 20 °C (68 °F), $T_k + 0.4\%/K$			
Overpressure limit			
30 mA (for Ex devices see Ex relevant specifications on page 6).			
Capacitance / inductance			
Negligible			
Output (pneumatic)			
Signal range			
0.2 to 1 bar (3 to 15 psi)			
Air capacity			
at supply air pressure	(kg/h)	(Nm ³ /h)	(scfm)
1.4 bar (20 psi)	0.05	0.041	0.024
2.0 bar (30 psi)	0.07	0.057	0.033
4.0 bar (60 psi)	0.10	0.082	0.048
6.0 bar (90 psi)	0.16	0.130	0.076
10.0 bar (150 psi)	0.25	0.205	0.120
Power supply (pneumatic)			
Instrument air			
Free of oil, water, and dust acc. to DIN/ISO 8573-1			
Pollution and oil content according to Class 3			
Pressure dew point 10 K below operating temperature			
Supply pressure			
1.4 to 10 bar (20 to 145 psi)			
Output signal			
0.2 to 1 bar (3 to 15 psi)			
Air consumption			
Equivalent to air capacity			
Transmission data and contributing factors			
Characteristic curve			
Linear, direct, or reverse action			
Characteristic curve deviation			
≤ 1 %			
Hysteresis			
≤ 0.3 %			
Dead band			
≤ 0.1 %			
Temperature			
≤ 1 % / 10 K within -20 to 85 °C (-4 to 185 °F)			
≤ 2 % / 10 K within -55 to -20 °C (-67 to -4 °F)			
Power supply			
≤ 0.8 % at 1.4 to 2 bar (20 to 30 psi)			
≤ 0.8 % at 2 to 3 bar (30 to 45 psi)			
≤ 0.5 % to 3 to 10 bar (45 to 150 psi, each 1 bar [15 psi])			
Mechanical vibration			
≤ 1 % to 10 g and 20 to 80 Hz			
Seismic vibration			
Meets the requirements of DIN IEC 68-3-3 Class III for strong and strongest earthquakes.			
Mounting orientation			
Zero point ≤ 0.5 % at 90° change of position			
Step response			
10 to 90 % and 90 to 10 % 0.6 s			
5 to 15 % and 15 to 5 % 0.25 s			
45 to 55 % and 55 to 45 % 0.2 s			
85 to 95 % and 95 to 85 % 0.15 s			
EMC			
Meets the requirements of EMC Directive 2014/30/EU (increased interference immunity as per EN 50082-2 PR)			
CE Marking			
Complies with the EC directive for CE conformity			

FONTE: (ANALYTICS, 2018)



Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC assinado pela banca

Assunto: TCC assinado pela banca
Assinado por: Dayalla Fernandes
Tipo do Documento: Anexo
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Dayalla Maria da Costa Fernandes, ALUNO (20171610040) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA, em 17/08/2023 15:01:55.

Este documento foi armazenado no SUAP em 17/08/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 912981
Código de Autenticação: be4dd40ba7

