



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

LAURA NÓBREGA BEZERRA

**PROJETO DE ADEQUAÇÃO PARA AUMENTO DE CAPACIDADE DE  
ARMAZENAMENTO DE DIETILENOGLICOL EM INDÚSTRIA DE RESINAS PET**

Recife

2023

LAURA NÓBREGA BEZERRA

**PROJETO DE ADEQUAÇÃO PARA AUMENTO DE CAPACIDADE DE  
ARMAZENAMENTO DE DIETILENOGLICOL EM INDÚSTRIA DE RESINAS PET**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Graduação em Engenharia  
Química da Universidade Federal de  
Pernambuco, como requisito parcial para a  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Química.

Orientador (a): Prof. Leandro Danielski

Recife  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Bezerra, Laura Nóbrega.

Projeto de adequação para aumento de capacidade de armazenamento de dietilenoglicol em indústria de resinas PET / Laura Nóbrega Bezerra. - Recife, 2023.

72 : il., tab.

Orientador(a): Leandro Danielski

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, anexos.

1. Adaptação. 2. Aumento de Capacidade. 3. Gestão de Mudança. 4. Projetos. 5. PET. I. Danielski, Leandro. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

LAURA NÓBREGA BEZERRA

**PROJETO DE ADEQUAÇÃO PARA AUMENTO DE CAPACIDADE DE  
ARMAZENAMENTO DE DIETILENOGLIGOL EM INDÚSTRIA DE RESINAS PET**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Química da  
Universidade Federal de Pernambuco, como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em: 15/09/2023

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente

 LEANDRO DANIELSKI  
Data: 15/09/2023 12:25:40-0300  
Verifique em <https://validar.itи.gov.br>

---

Prof. Dr.-Ing. Leandro Danielski (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente

 ANTONIO DEMOSTENES DE SOBRAL  
Data: 15/09/2023 14:40:20-0300  
Verifique em <https://validar.itи.gov.br>

---

Prof. Dr. Antônio Demóstenes de Sobral (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente

 JORGE VINICIUS FERNANDES LIMA CAVALCANTI  
Data: 15/09/2023 14:15:35-0300  
Verifique em <https://validar.itи.gov.br>

---

Prof. Dr. Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho a toda minha família e aos meus amigos, por todo o apoio, incentivo, força e suporte durante toda a minha trajetória.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a toda minha família e amigos que estiveram comigo dando o maior apoio, incentivo e motivação para o meu desenvolvimento e crescimento no âmbito acadêmico.

Ao orientador Profº. Leandro Danielski, por toda orientação, instrução e suporte na elaboração e realização do presente trabalho.

A empresa Alpek Polyester pela oportunidade de estágio e a sua equipe de Engenharia de Processos, em especial, a Edna Marina Queiroz da Silva, a Bruno Sávulo Alves de Oliveira, a Amanda de Andrade Costa, a Lucas Moreira Duarte de Melo e a Amanda Camilla Rodrigues pela contribuição em meu aprendizado, além de todo carinho, cuidado, compreensão, suporte, confiança e amizade durante o meu desenvolvimento no estágio.

A Universidade Federal de Pernambuco e ao Departamento de Engenharia Química pelo fornecimento dos meios materiais para o meu desenvolvimento acadêmico. Além de todos os professores que contribuíram para minha formação, de forma direta ou indireta.

*“A dúvida é o princípio da sabedoria.”*

*Aristóteles*

## RESUMO

Atualmente, as organizações passam por mudanças decorrentes de fatores como: competição, globalização, governos, tecnologia, mercado, clientes, leis e normas, inovações, incerteza do futuro, entre outros. Dessa forma, para manter seu funcionamento, é necessário apresentar uma capacidade de adaptação e gestão de mudança de maneira rápida e eficaz. Existem inúmeras ferramentas destinadas à execução das mudanças, dentre elas, destacam-se os projetos, os quais são muito utilizados pelas indústrias. O intuito desse trabalho foi avaliar a área de estocagem de dietilenoglicol (DEG) em indústria de resinas de poli(tereftalato de etileno) (PET), mediante a necessidade de importação de 100 toneladas desse material e, com isso, proporcionar o aumento da capacidade de armazenamento. Foi necessário realizar avaliações e análises em bombas centrífugas, tanque de armazenamento, tubulações, sistema de controle e dimensionar um instrumento de orifício de restrição. Estas foram fundamentadas por folhas de especificação, manuais de operação, desenhos técnicos de equipamentos, isométricos, diagramas de instrumentação e canalização (P&ID) e diagramas de fluxo do processo (PFD), além de ferramentas de cálculo desenvolvidas internamente. Através dos estudos sobre as bombas presentes na área de descarregamento de DEG, foram estabelecidos valores de vazão máxima e mínima em conjunto de seus rendimentos. O teste de performance foi positivo, pois, viu-se que o comportamento da maioria das curvas características foi similar ao teórico. O orifício de restrição dimensionado para atender a especificação do tanque de armazenamento possui um diâmetro de 22,5 mm. Esse tanque foi implementado no projeto devido a compatibilidade entre seus materiais constituintes com os do vaso de estocagem já existente, além do fato de que a capacidade total desse sistema ( $120\text{ m}^3$ ) comporta a quantidade importada. Também houve compatibilidade desses equipamentos (tanque e vaso) com as tubulações do tipo ZXZB, o que evitou certos problemas operacionais e viabilizou economicamente o projeto, uma vez que esse tipo de tubulação já é aplicado na área em estudo. Pela análise de perda de carga, o projeto encontra-se em conformidade pois atende aos valores desse parâmetro para a realidade da operação (10 a 16 m). O sistema de controle operacional com seus *interlocks* de *software* e sequência lógica obtiveram resultado satisfatório para promover a segurança operacional da unidade.

**Palavras-chaves:** Adaptação. Aumento de Capacidade. Gestão de Mudança. Projetos. PET.

## ABSTRACT

Organizations are currently undergoing changes due to factors such as: competition, globalization, governments, technology, market, customers, laws and regulations, innovations, future uncertainty, among others. Thus, in order to maintain its functioning, it is necessary to present a capacity to adapt and manage of change quickly and effectively. There are numerous tools for the implementation of changes, among them, projects stand out, which are widely used by industries. The purpose of this work was to evaluate the storage area of diethylene glycol (DEG) in a poly(ethylene terephthalate) (PET) resin industry, due to the need to import 100 tons of this material, and with that, provide an increase in storage capacity. It was necessary to carry out evaluations and analyzes on centrifugal pumps, storage tank, piping, control system and size a restriction orifice instrument. These were supported by specification sheets, operation manuals, technical drawings of equipment, isometrics, piping and instrumentation diagrams (P&ID) and process flow diagrams (PFD), in addition to calculation tools developed internally. Through studies on the pumps present in the DEG unloading area, maximum and minimum flow values were established, along with their yields. The performance test was positive, as it was seen that the behavior of most of the characteristic curves was similar to the theoretical one. The restriction orifice, sized to meet the storage tank specification, has a diameter of 22.5 mm. This tank was implemented in the project due to the compatibility between its constituent materials and the existing storage vessel, besides the fact that the total capacity of this system ( $120\text{m}^3$ ) accommodates the imported quantity. There was also compatibility of this equipment (tank and vessel) with the ZX type piping, which avoided certain operational problems and made the project economically viable, since this type of piping is already applied in the area under study. Based on the head loss analysis, the project is in compliance as it meets the values of this parameter for the reality of the operation (10 to 16 m). The operational control system with its software interlocks and logical sequence achieved a satisfactory result towards promoting the operational safety of the unit.

**Keywords:** Adaptation. Capacity Increase. Management of Change. Projects. PET.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Reação de formação de DEG.....	17
<b>Figura 2</b> - Fluxograma do descarregamento, armazenamento e alimentação de DEG para o processo antes da realização do projeto.....	18
<b>Figura 3</b> - Classificação dos principais tipos de bombas segundo a forma de transferência de energia ao fluido .....	19
<b>Figura 4</b> - Regiões de aplicação dos tipos de bomba de acordo com altura e vazão.....	20
<b>Figura 5</b> - Esquema dos internos de uma bomba centrífuga. ....	21
<b>Figura 6</b> - Curva característica de uma bomba centrífuga: vazão versus altura manométrica.	22
<b>Figura 7</b> - Curva característica de uma bomba centrífuga: vazão versus rendimento.....	23
<b>Figura 8</b> - Ponto de trabalho. ....	23
<b>Figura 9</b> - Alteração do ponto de trabalho pela modificação da curva do sistema.....	24
<b>Figura 10</b> - Alteração do ponto de trabalho pela modificação da curva da bomba. ....	24
<b>Figura 11</b> - Placa de orifício concêntrico. ....	25
<b>Figura 12</b> - Classificação das tubulações segundo critério de aplicabilidade. ....	29
<b>Figura 13</b> - Materiais constituintes de tubulações. ....	30
<b>Figura 14</b> - Sistema de controle em malha aberta. ....	33
<b>Figura 15</b> - Sistema de controle em malha fechada.....	34
<b>Figura 16</b> - Fluxograma do descarregamento, armazenamento e alimentação de DEG para o processo após a realização do projeto.....	40
<b>Figura 17</b> - Planta baixa da área de armazenamento de DEG. ....	41
<b>Figura 18</b> - Curvas características teóricas da bomba 15P01 para o dietilenoglicol a 40 °C e 24 bar. ....	43
<b>Figura 19</b> - Curvas características teóricas da bomba 15P01 para o dietilenoglicol a 40 °C e 24 bar dentro da faixa de vazão permitida no projeto. ....	44
<b>Figura 20</b> - Curvas características teóricas das bombas 15P02/03 para o dietilenoglicol a 40 °C e 24 bar. ....	46
<b>Figura 21</b> - Curvas características teóricas das bombas 15P02/03 para o dietilenoglicol a 40 °C e 24 bar dentro da faixa de vazão permitida no projeto.....	47
<b>Figura 22</b> - Curvas características práticas do desempenho da bomba 15P02 com a realização do teste de performance. ....	49
<b>Figura 23</b> - Cálculo de dimensionamento do orifício de restrição. ....	51

<b>Figura 24</b> - Representação da configuração do (a) vaso e (b) tanque de armazenamento de DEG.....	52
<b>Figura 25</b> - Dados do DEG para o cálculo de perda de carga na saída do tanque 18T01. ....	55
<b>Figura 26</b> - Perda de carga na tubulação entre o tanque 18T01 e a sucção das bombas de alimentação 15P02/03. .....	55
<b>Figura 27</b> - Dados do DEG para o cálculo de perda na entrada do tanque 18T01.....	56
<b>Figura 28</b> - Perda de carga na tubulação de descarga da bomba 15P01 para o tanque 18T01. ....	56
<b>Figura 29</b> - Sequência lógica e interlock de software do sistema de armazenamento de DEG. ....	58
<b>Figura 30</b> - Esquema representativo da área de DEG com os alarmes, intertravamentos e sequência lógica.....	59

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Dados da bomba 15P01 e do seu motor. ....	42
<b>Tabela 2</b> - Resultados do desempenho da bomba 15P01 para água a 20 °C e 24 bar. ....	42
<b>Tabela 3</b> - Resultados do desempenho da bomba 15P01 para o dietilenoglicol a 40 °C e 24 bar. ....	43
<b>Tabela 4</b> - Dados das bombas 15P02/03 e seus motores. ....	45
<b>Tabela 5</b> - Resultados do desempenho das bombas 15P02/03 para água a 20 °C e 24 bar. ....	45
<b>Tabela 6</b> - Resultados de desempenho das bombas 15P02/03 para o dietilenoglicol a 40 °C e 24 bar. ....	46
<b>Tabela 7</b> - Resultados do teste da bomba 15P02. ....	48
<b>Tabela 8</b> - Resultado do desempenho da bomba 15P02 com os valores do teste de performance. ....	48
<b>Tabela 9</b> - Dados de entrada para o cálculo de dimensionamento do orifício de restrição. ....	50
<b>Tabela 10</b> - Resultados do cálculo de dimensionamento do orifício de restrição. ....	50
<b>Tabela 11</b> - Dados de operação e projeto do vaso 15V01 e do tanque 18T01. ....	52
<b>Tabela 12</b> - Materiais constituintes do tanque 18T01 e do vaso 15V01.....	53
<b>Tabela 13</b> - Valores de pressão e temperatura para tubulação do tipo ZXZ com faixa de diâmetro DN 15 a DN 600.....	54
<b>Tabela 14</b> - Dados de fluidos para tubulação do tipo ZXZ. ....	54
<b>Tabela 15</b> - Condições operacionais do transmissor de nível 18LT01.....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEG	Dietilenoglicol
EG	Etilenoglicol
HH	<i>High High</i>
HHH	<i>High High High</i>
LAH	<i>Level Alarm High</i>
LAHH	<i>Level Alarm High High</i>
LAHHH	<i>Level Alarm High High High</i>
LAL	<i>Level Alarm Low</i>
MV	<i>Manipulated Variable</i>
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PFD	<i>Process Flow Diagram</i>
P&ID	<i>Piping and Instrumentation Diagram/Drawing</i>
PTA	Ácido tereftálico purificado
PV	<i>Process Variable</i>
SEG	Etilenoglicol reutilizado
SV	<i>Set-point</i>

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	17
2.1.	ÁREA DE ARMAZENAMENTO DE DEG .....	17
2.1.1.	Dietilenoglicol (DEG).....	17
2.1.2.	Processo de descarregamento, armazenamento e alimentação de DEG na indústria	18
2.2.	EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS.....	19
2.2.1.	Bombas centrífugas.....	19
2.2.2.	Orifício de restrição .....	25
2.2.3.	Tanque e vaso de armazenamento .....	27
2.3.	TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS .....	28
2.3.1.	Importância, classificação e especificação .....	28
2.3.2.	Perda de carga.....	30
2.4.	CONTROLE DE PROCESSO .....	32
3.	METODOLOGIA .....	35
3.1.	EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS.....	35
3.1.1.	Bombas centrífugas.....	35
3.1.2.	Orifício de restrição .....	36
3.1.3.	Tanque e vaso de armazenamento .....	37
3.2.	TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS .....	37
3.2.1.	Especificação das tubulações adicionais.....	37
3.2.2.	Perda de carga.....	37
3.3.	CONTROLE DE PROCESSO .....	38
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
4.1.	EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS.....	41
4.1.1.	Bombas centrífugas.....	41
4.1.2.	Orifício de restrição .....	49

4.1.3. Tanque e vaso de armazenamento .....	51
4.2. TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS .....	53
4.2.1. Especificação das tubulações adicionais.....	53
4.2.2. Perda de Carga .....	54
4.3. CONTROLE DE PROCESSO .....	57
4.3.1. Teste do intertravamento da bomba de descarregamento de DEG (15P01) .....	59
4.3.2. Teste da sequência lógica das bombas de alimentação de DEG para o processo (15P02/03) .....	60
4.3.3. Teste do intertravamento das bombas de alimentação de DEG para o processo (15P02/03) através da atuação do alarme HHH do vaso 15V01 .....	60
5. CONCLUSÃO .....	61
REFERÊNCIAS .....	63
ANEXO 1 – DIAGRAMA DE MOODY .....	68
ANEXO 2 – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA PARA ESCOAMENTO ATRAVÉS DE VARIAÇÕES BRUSCAS DE ÁREA .....	69
ANEXO 3 – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA PARA CONTRAÇÕES GRADUAIS .....	69
ANEXO 4 – COEFICIENTES DE PERDAS SECUNDÁRIAS PARA ENTRADAS DE CANOS.....	70
ANEXO 5 – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA PARA SAÍDA EM TUBULAÇÕES .....	70
ANEXO 6 – COMPRIMENTOS EQUIVALENTES ADIMENSIONAIS (Le/D) PARA VÁLVULAS E CONEXÕES .....	71

## 1. INTRODUÇÃO

Frequentemente, as organizações (empresas, indústrias, instituições de ensino, comerciais e governamentais) sofrem influência de fatores externos e/ou internos, como: questões legais e culturais; mudanças políticas, econômicas, jurídicas, pressões sociais, crescimento populacional, avanço tecnológico, entre outros. Tais fatores são a procedência para os processos de mudanças. Os quais são denominados de mudanças organizacionais cujo conceito encontra-se em constante modificação devido a sua diversidade literária e vasta variedade de definições pelos estudiosos e pesquisadores (SANTOS, 2014).

Para Abreu e Marra (2019), mudança organizacional é qualquer alteração na instituição, podendo ser de natureza estrutural, estratégica, tecnológica, cultural, humana, entre outras. Atualmente, pelo avanço acelerado da globalização e da tecnologia, as organizações se encontram, cada vez mais, imersas em um cenário de competição. Dessa forma, para manter seu funcionamento, é necessário apresentar uma capacidade de adaptação e gestão de mudança de maneira rápida e eficaz.

Estrada, Santos e Gutierrez (2013) acreditam que as mudanças organizacionais são proporcionadas por fatores como: competição, globalização, governos, tecnologia, mercado, clientes, leis e normas, inovações e a incerteza do futuro. Portanto, o processo para a realização das mudanças é, em muitas ocasiões, incerto, descontínuo e conflituoso. Dessa forma, para que uma mudança organizacional ocorra com sucesso, faz-se necessário realizar uma boa gestão cuja função é determinar os objetivos da mudança e, a partir de uma sucessão de atividades pensadas e planejadas, alterar a posição atual de uma corporação para uma nova, na qual visa-se atingir determinados interesses (ANTUNES, 2012).

Assim como o conceito, há uma diversidade de classificação dos tipos de mudança organizacional. Depentor (2014), em seu trabalho, levantou algumas abordagens, dentre elas, a dos autores Beer *et al.* (2003) que divide as mudanças organizacionais em quatro grupos principais: mudança cultural, redução de custos, mudança estrutural e modificação de processos. O primeiro grupo se refere a qualquer mudança relacionada às relações entre os indivíduos, como por exemplo: mudanças de liderança. Sobre a redução de custos, tem-se qualquer alteração referente à minimização e/ou eliminação de atividades não essenciais e, por consequência, gastos extras. No caso das mudanças estruturais, as modificações são feitas na estrutura (composição e hierarquia) da instituição. Por fim, ao que tange à classe de modificação de processos, encaixam-se qualquer alteração que almeje tornar os processos mais eficazes,

seguros e menos dispendioso. Mudanças essas realizadas a partir de análises e estudos em seus processos produtivos, equipamentos, tubulações, instalações e controles para justificativa de sua implementação (ALMEIDA JR, 2018).

Há, na literatura, também, uma vasta variedade de ferramentas de gestão destinadas a execução das mudanças nas instituições, dentre elas, destaca-se os projetos. Os quais são muito utilizados pelas indústrias (SERRANO, 2019). É importante mencionar que para obter um projeto adequado, deve-se realizar um bom gerenciamento e, para isso, se faz necessário a utilização de um conjunto de habilidades, técnicas e ferramentas baseadas em princípios administrativos que são aceitos pelas comunidades acadêmica e prática. Ademais, importante saliente que cada projeto, em sua particularidade, desenvolve suas etapas de atividades de acordo com seus interesses finais (TURNER, 2008).

Diante de um cenário de importação de 100 toneladas de dietilenoglicol (DEG) por uma indústria de resinas de poli(tereftalato de etileno) (PET) e visando a redução de custos de armazenamento em ambiente externo à empresa será elaborado um projeto que contemple os estudos necessários a fim avaliar, verificar e realizar todas as modificações imprescindíveis para possibilitar o aumento de capacidade de armazenamento dessa substância dentro da própria indústria.

Dessa forma, o presente trabalho pretende, de maneira específica, avaliar as bombas destinadas ao dietilenoglicol (descarregamento e alimentação), através de teste de desempenho e estudo de suas curvas características, a fim de adequá-las às condições de projeto; dimensionar um instrumento de orifício de restrição para atender a vazão requerida no projeto a partir de uma ferramenta implementada com base em cálculos empíricos; verificar, por meio de folhas de especificação, se um tanque de estocagem de etilenoglicol reutilizado (SEG) pode ser destinado ao armazenamento de DEG; verificar se as especificações e o tipo de tubulação a ser implementada no projeto são adequadas para o seu uso através de informações técnicas presentes em folhas de dados, isométricos e diagramas de instrumentação e canalização (P&ID); avaliar/estimar, pelo uso de uma ferramenta interna, a perda de carga nos trechos para as novas tubulações; estudar e estabelecer intertravamentos e sequências lógicas no sistema de controle para proporcionar segurança e funcionamento adequado do processo, sendo validados por meio de testes entre o sistema *software* e físico.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. ÁREA DE ARMAZENAMENTO DE DEG

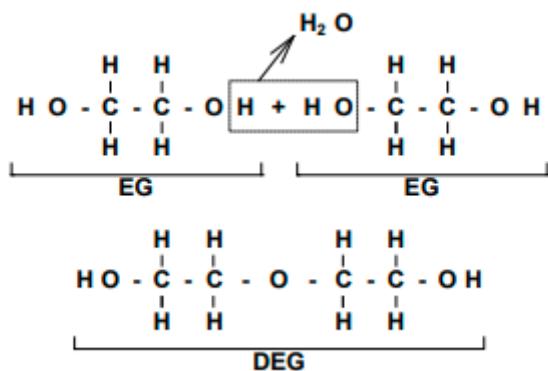
#### 2.1.1. Dietilenoglicol (DEG)

O dietilenoglicol ( $C_4H_{10}O_3$ ) é um fluido líquido, viscoso, claro, incolor e inodoro. Dentre seus sinônimos, pode-se mencionar: etileno diglicol, diglicol, glicol éter e DEG. Apresenta temperatura de ebulação em 245 °C, temperatura de fusão de -8 °C e temperatura de auto-ignição no valor de 230 °C. Além disso, sua densidade, em 25 °C, é de 1,11 g/cm<sup>3</sup>. É uma substância miscível em água e é perigoso se ingerido, causando irritações aos olhos e pele (FISPQ, 2003).

Esse composto é uma das matérias-primas utilizadas na fabricação do poli(tereftalato de etileno) (PET), atuando como comonômero do etilenoglicol (EG). Dessa maneira, ele possui o objetivo de modificar as propriedades do polímero (mecânicas, térmicas e químicas) de acordo com as estratégias de processo, porém mantendo o equilíbrio entre propriedades e baixos custos de fabricação (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009).

Além de ser adicionado para produção de PET, o dietilenoglicol também é formado ao longo do processo através da reação entre dois grupos finais hidroxietil oriundos da principal reação lateral de esterificação entre o ácido tereftálico purificado (PTA) e o etilenoglicol (EG), Figura 1. A reação de formação do DEG é ácido catalisada, mas existem também outros fatores influenciadores, como: temperatura, pressão, tempo de residência e concentração de EG (PQS, 2016).

**Figura 1** - Reação de formação de DEG.



**Fonte:** PQS (2016).

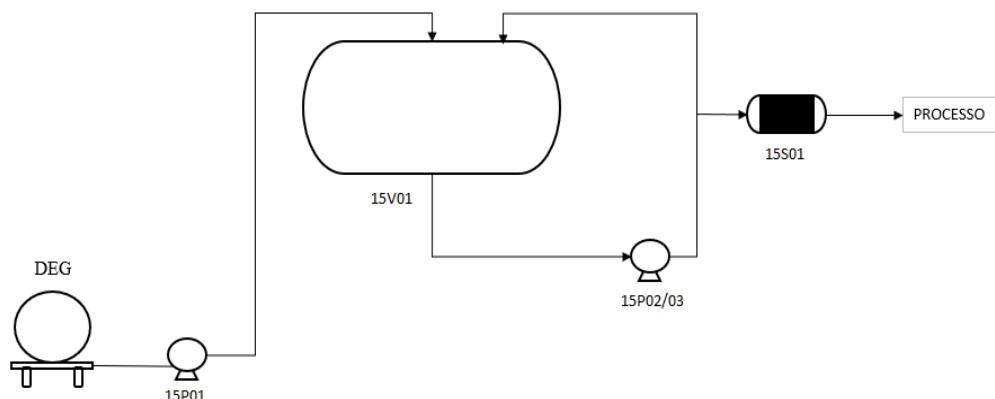
O aumento do teor de DEG na produção de resinas PET pode proporcionar efeitos positivos ou negativos, a depender também do tipo de resina e das condições operacionais. Entre os efeitos positivos, destacam-se: aumento da flexibilidade da cadeia; diminuição da taxa de cristalização; melhora da transparência e clareza; diminuição da temperatura de transição vítreia e de fusão. Já entre os negativos, pode-se citar: redução da estabilidade térmica; degradação térmica; degradação termo-oxidativa e perda de viscosidade intrínseca (PQS, 2016).

Todavia, é importante mencionar que a quantidade de DEG adicionada ao processo deve ser cautelosa. Pois, como se trata de um comonômero, em grandes quantidades, tem-se redução da taxa de cristalização do produto. E, assim, obtém-se um grau de cristalinidade insuficiente, o que pode proporcionar formação de material PET aglomerado em etapas posteriores do processo (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

### **2.1.2. Processo de descarregamento, armazenamento e alimentação de DEG na indústria**

A Figura 2 ilustra o processo de descarregamento, armazenamento e alimentação de DEG para a produção de resinas PET antes da elaboração do presente projeto. O dietilenoglicol, transportado comumente por *isotanks*, alimenta a bomba 15P01 cuja função é descarregar tal material do *isotank* para o vaso de armazenamento 15V01. Este último transfere o DEG para as bombas de alimentação (15P02/03), as quais (operando alternadamente) levam o fluido para o processo, passando, antes, por um filtro (15S01) para remoção de possíveis impurezas e contaminantes (PQS, 2016).

**Figura 2 - Fluxograma do descarregamento, armazenamento e alimentação de DEG para o processo antes da realização do projeto.**



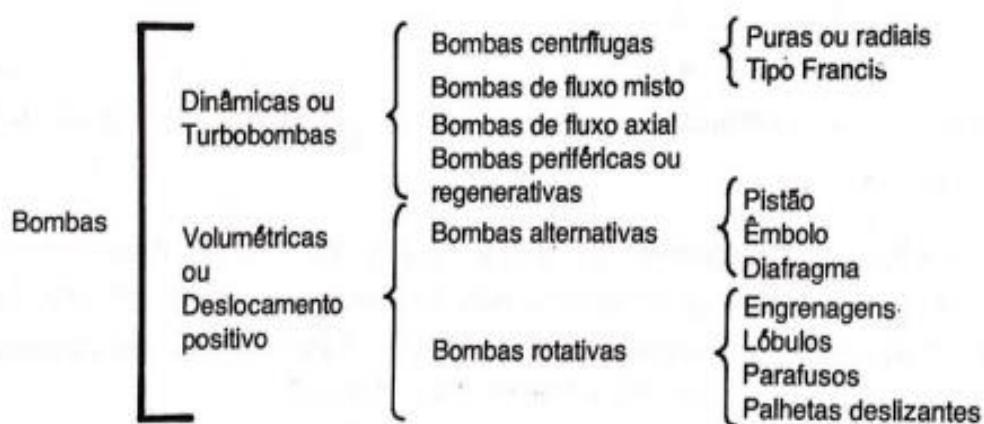
**Fonte:** AUTORA (2023).

## 2.2. EQUIPAMENTOS INDUSTRIALIS

### 2.2.1. Bombas centrífugas

Bomba é um equipamento hidráulico que recebe energia de uma fonte motora e cede parte desta energia a um fluido, na forma de energia potencial e/ou cinética, com o preceito de transferi-lo de um ponto a outro. Há várias formas de classificação das bombas, os critérios mais comumente utilizados são: aplicação e forma com que a energia é cedida ao fluido. A Figura 3 aborda um esquema classificatório desses equipamentos baseado pela forma de como a energia é fornecida ao fluido (ELETROBRÁS *et al.*, 2009).

**Figura 3** - Classificação dos principais tipos de bombas segundo a forma de transferência de energia ao fluido.



**Fonte:** UETA (2018).

As bombas centrífugas recebem esta denominação porque apresentam um elemento rotativo (rotor) responsável por fornecer energia cinética, através da sua força centrífuga, ao fluido desde o ponto de succão até a abertura para a descarga. Onde, neste momento, ocorre a transformação de energia cinética em energia de pressão (FONSECA, 2019).

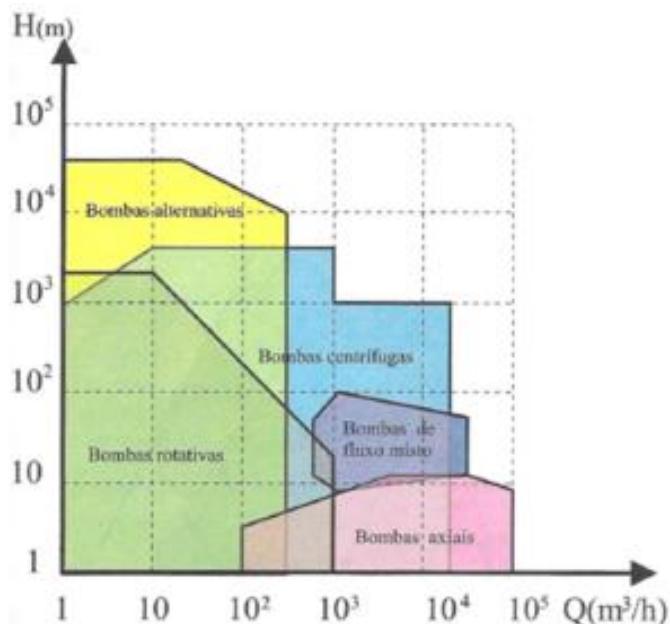
Nos processos industriais, os tipos de bombas centrífugas mais utilizadas são: radial, de fluxo axial e de fluxo misto cuja diferenciação está relacionada ao sentido de saída do fluido no rotor. Para o primeiro tipo, o fluido sai na direção perpendicular ao eixo do rotor; no segundo, sai paralelamente ao eixo de rotação e, por fim, para o fluxo misto, ocorre a saída na diagonal (FONSECA, 2019).

Já as bombas volumétricas (deslocamento positivo) são caracterizadas pela existência de um espaço vazio fixo no interior de seu corpo. Dessa forma, a vazão média no corpo da bomba é praticamente constante. Diferentemente das bombas centrífugas, as volumétricas já

fornecem energia ao fluido na forma de potência. Há uma subclassificação dentro deste grupo de acordo com os tipos de dispositivos mecânicos responsáveis pela impulsão em: alternativas e rotativas. Enquanto as alternativas são conhecidas pelo movimento de vai e vem de seus dispositivos (pistão, êmbolo ou diafragma), as rotativas apresentam um movimento de rotação (engrenagens, lóbulos, parafusos, palhetas) (ELETROBRÁS *et al.*, 2009).

A respeito das aplicações das bombas, existem diversos casos em que se pode utilizar vários tipos de bomba para uma mesma aplicação. De maneira geral, as bombas centrífugas de fluxo misto e axial são utilizadas quando se tem regiões de médias e grandes vazões, enquanto as volumétricas alternativas e rotativas são destinadas a faixa de médias e grandes alturas e pequenas vazões, conforme Figura 4 (HENN, 2006).

**Figura 4** - Regiões de aplicação dos tipos de bomba de acordo com altura e vazão.



**Fonte:** HENN (2006).

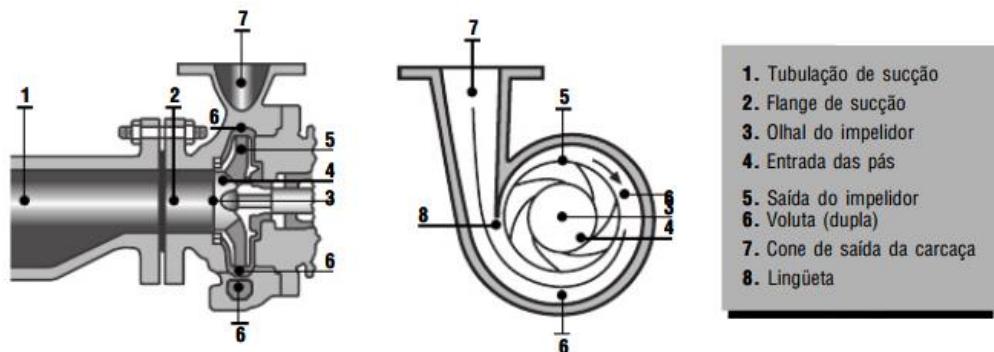
A Figura 5 ilustra um esquema representativo dos componentes principais de uma bomba centrífuga. O princípio de seu funcionamento consiste em: o impelidor ao girar, através da sua força centrífuga, transmite energia cinética ao fluido. Dessa forma, o fluido, presente no interior do impelidor (regiões 3, 4 e 5) possui velocidade suficiente para se encaminhar a voluta (6). Em seguida, pela orientação da lingueta (8), o fluido deixa o equipamento pelo cone de saída da carcaça (7). Importante dizer que a movimentação do impelidor acarreta em uma região de baixa pressão (do ponto 2 ao 4) e, isto, permite que o fluido vindo pela tubulação (1) seja succionado. Na entrada das pás (4) é onde ocorre ponto de pressão mais baixo (fluxo mais

turbulento) e o líquido começa a receber energia cinética pelo movimento das pás. Ao passo que o fluido vai percorrendo o impelidor, a energia cinética vai se transformando gradativamente em energia potencial, devido ao aumento de área (lei da conservação de energia, Equação 1), até o cone de saída (PETROBRAS, 2006).

$$\frac{m \cdot v_i^2}{2} + m \cdot g \cdot h_i = \frac{m \cdot v_f^2}{2} + m \cdot g \cdot h_f \quad (1)$$

Em que  $m$ : massa (kg);  $g$ : aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );  $v_i$  e  $v_f$ : velocidade inicial e final ( $\text{m/s}$ ), respectivamente e, por fim,  $h_i$  e  $h_f$ : altura no início e no fim (m), em ordem.

**Figura 5** - Esquema dos internos de uma bomba centrífuga.



**Fonte:** PETROBRAS (2006).

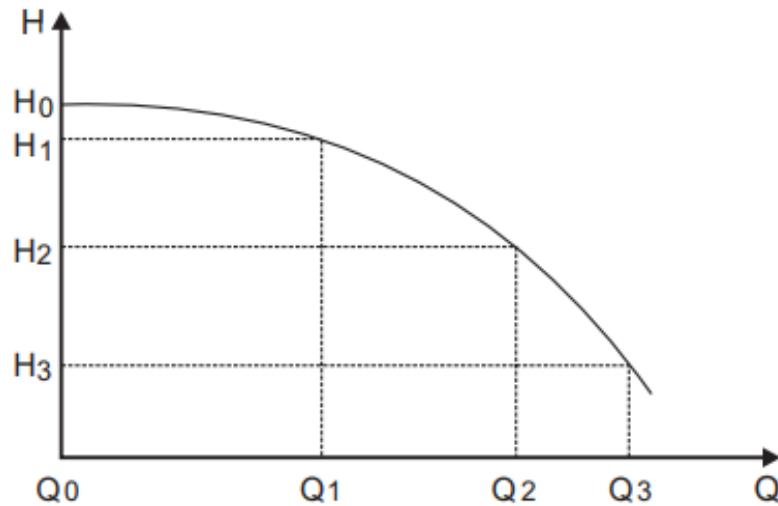
As curvas características das bombas são gráficos, obtidos pelo fabricante, que abordam o funcionamento da bomba correlacionando valores de vazão com diversos parâmetros, a exemplo de alturas manométricas, potência absorvida e eficiência. A Figura 6 ilustra uma curva característica que relaciona vazão com altura manométrica, nela, há um ponto importante, demarcado por  $(H_0; Q_0)$ , conhecido por *shut-off*. O qual fornece o valor máximo de altura manométrica, com vazão nula, proporcionado por uma bomba centrífuga (SILVA, 2003).

Além disso, frequentemente, os valores de altura manométrica são fornecidos pelo fabricante através de uma curva característica de teste para determinado fluido. Todavia, é possível estimá-los através da aferição da pressão de descarga ( $p$ ) da bomba, conforme Equação 2:

$$H = \frac{p}{\rho \cdot g} \quad (2)$$

Sendo  $\rho$  e  $g$ : densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ) e aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ), respectivamente.

**Figura 6** - Curva característica de uma bomba centrífuga: vazão *versus* altura manométrica.



**Fonte:** SILVA (2003).

No que se refere a curva de potência consumida pela bomba, é necessário conhecer as características elétricas do motor que a aciona como: corrente, voltagem e rendimento. Para o caso de um motor trifásico, por exemplo, a potência consumida é obtida através da Equação 3 (WEG, 2023):

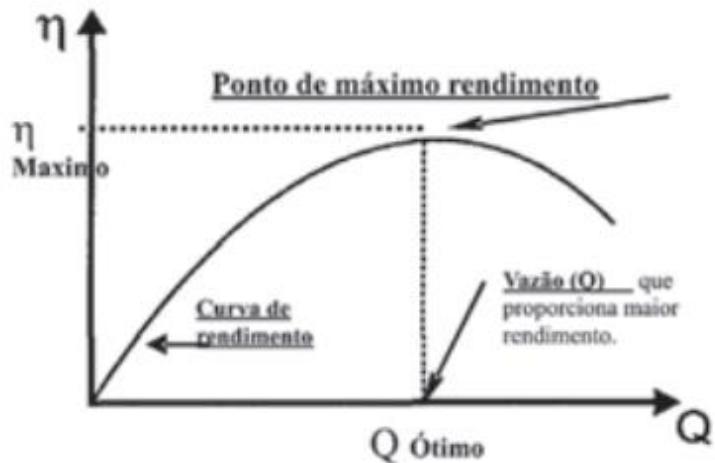
$$P = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot V \cdot \cos\phi \cdot \eta}{1000} \quad (3)$$

Em que  $P$ : Potência consumida (kW);  $I$ : Corrente do motor (A);  $\cos\phi$ : Fator de potência do motor;  $\eta$ : rendimento do motor (%). Através dessa mesma equação, pode-se realizar uma curva característica de uma bomba centrífuga relacionando a corrente com a vazão. Além disso, normalmente, faz-se uso da Equação 4, a seguir, para construir a curva de rendimento versus vazão, Figura 7. Por ela, nota-se que para o maior rendimento da bomba, tem-se um valor de vazão correspondente, denominada de vazão ótima (ELETROBRÁS *et al.*, 2009).

$$\eta = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{P} \quad (4)$$

Sendo  $\eta$ : Rendimento (%);  $H$ : Altura manométrica (m);  $Q$ : Vazão ( $m^3/h$ );  $P$ : Potência consumida pela bomba (kW).

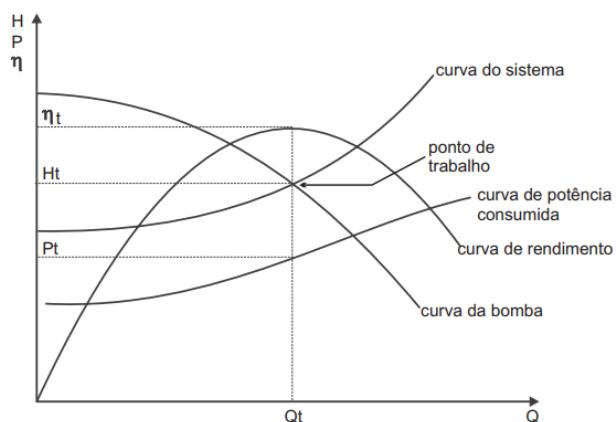
**Figura 7** - Curva característica de uma bomba centrífuga: vazão *versus* rendimento.



**Fonte:** ELETROBRÁS *et al.* (2009).

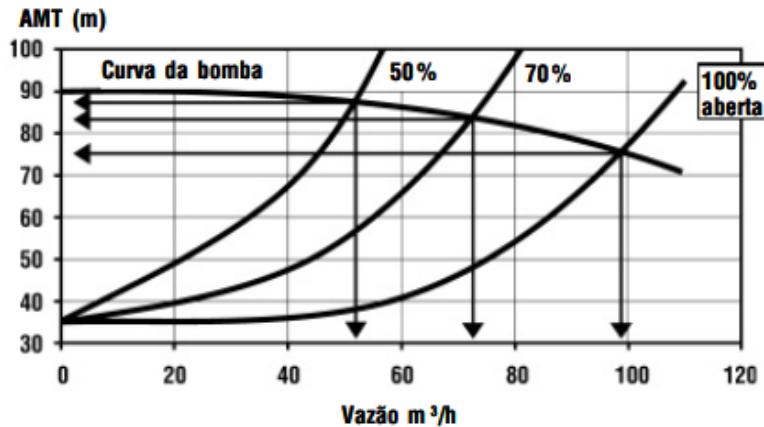
Ao plotar as curvas características das bombas com a curva do sistema, obtém-se o ponto de trabalho, ocasionado pela interseção da curva do sistema com a curva de altura manométrica da bomba, Figura 8. Existe uma variedade de fatores que podem modificar o ponto de trabalho, os quais consistem na alteração da curva do sistema e/ou da curva da bomba. No caso da curva do sistema, o fator mais comum é a modificação da porcentagem de abertura da válvula de descarga. Pela Figura 9, percebe-se que ao reduzir o grau de abertura da válvula de descarga, a curva do sistema desloca-se para esquerda e, com isso, tem-se um aumento da altura manométrica (por consequência, aumento da perda de carga) e uma redução da vazão da bomba através do novo ponto de trabalho estabelecido (PETROBRAS, 2006).

**Figura 8** - Ponto de trabalho.



**Fonte:** SILVA (2003).

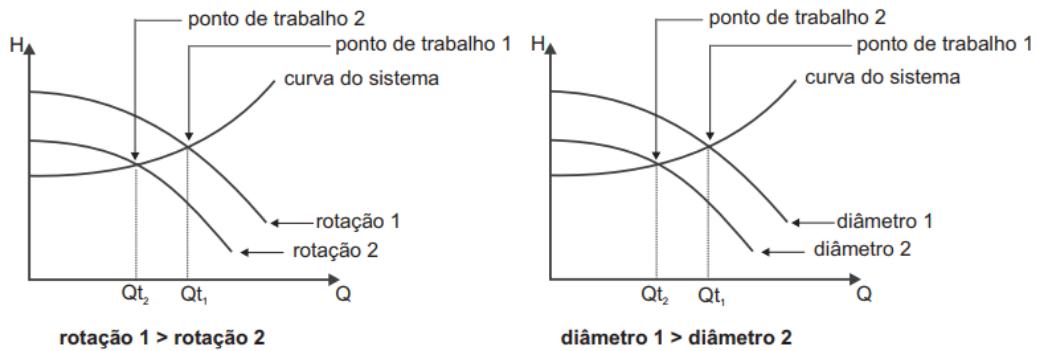
**Figura 9 - Alteração do ponto de trabalho pela modificação da curva do sistema.**



**Fonte:** PETROBRAS (2006).

No caso da curva da bomba, as formas mais usuais de modificação são através da variação da rotação da bomba, do diâmetro do rotor e da natureza do líquido bombeado. Sobre o primeiro: para menores rotações, a curva da bomba desloca-se para baixo proporcionando um novo ponto de trabalho, o qual fornece vazão de operação mais baixa. Para o diâmetro do rotor, a análise é similar, conforme ilustra a Figura 10 (SILVA, 2003).

**Figura 10 - Alteração do ponto de trabalho pela modificação da curva da bomba.**



**Fonte:** SILVA (2003).

Importante salientar que ao realizar uma modificação na rotação, gera-se uma mudança em outras curvas características, uma vez que existe uma proporcionalidade entre os parâmetros de vazão, altura e potência com a rotação, conforme Equação 5 (PETROBRAS, 2006).

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\rho_2 Q_1}{\rho_1 Q_2} = \sqrt{\frac{\rho_2 H_1}{\rho_1 H_2}} = \sqrt[3]{\frac{\rho_2 P_1}{\rho_1 P_2}} \quad (5)$$

Para os subscritos 1 e 2 sendo a situação conhecida e nova, respectivamente;  $n$ : rotação;  $\rho$ : densidade do fluido;  $Q$ : vazão;  $H$ : altura manométrica e  $P$ : potência.

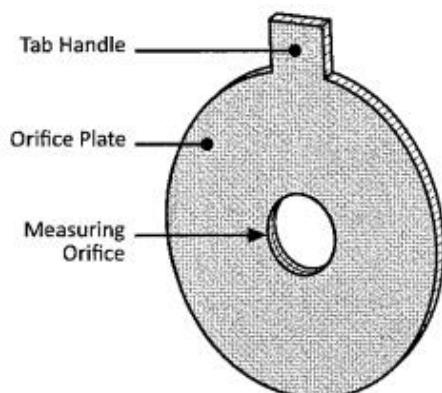
Fonseca (2019) relata que cada projeto de sistema de bombeamento há uma série de etapas a serem realizadas, como exemplo, ele cita as seguintes: 1) Dimensionar o diâmetro das tubulações de sucção e recalque; 2) Determinar a perda de carga na sucção e recalque; 3) Calcular a altura manométrica; 4) Escolher o tipo e o tamanho da bomba em função da vazão, altura manométrica, fluido a ser deslocado e condições operacionais; 5) Especificar a bomba através de curvas fornecidas por fabricantes; 6) Determinar se o sistema está livre de cavitação.

Em algumas indústrias, existem processos constituídos por associações de bombas: série ou paralelo. A primeira associação é realizada quando, para vazão desejada, a altura manométrica do sistema é muito elevada, não sendo possível atingir por uma única bomba. Já o arranjo em paralelo é aplicado quando, para o sistema abordado, a vazão almejada excede os limites de capacidade da bomba, ou seja, a associação em paralelo tem o objetivo de aumentar a vazão fornecida ao processo (FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2010).

### **2.2.2. Orifício de restrição**

Orifício de restrição, também conhecido por placa de orifício, é um elemento de medição de fluxo de pressão diferencial, sendo ele o tipo mais simples, mais barato e amplamente utilizado. Sua construção pode variar de acordo com o formato do orifício e da disposição. Entretanto, geralmente é formado por uma placa metálica com um furo redondo concêntrico, conforme Figura 11. O material padrão para a construção desse instrumento é o aço inoxidável, porém, ele também pode ser fabricado com outras ligas metálicas especiais, compatíveis com o fluido de processo (EMHEMED; GHNUME; FARAJ, 2019).

**Figura 11 - Placa de orifício concêntrico.**



**Fonte:** CRANE (2013).

Possui a vantagem de ser facilmente encaixado entre flanges adjacentes que permitem, assim, que ele seja facilmente alterado ou inspecionado. Além disso, o sistema de acoplamento

da placa de orifício é adequado para medir a taxa de fluxo de vapor, líquidos e a maioria dos gases. Como desvantagens, pode-se citar: alta perda de carga no sistema e existência de equipamentos mais modernos para medição (DELMÉE, 2003).

O princípio que rege este instrumento é formado pela introdução de um obstáculo na tubulação onde a vazão deve sofrer modificação. Este obstáculo é oriundo de uma placa de fina espessura contendo um orifício, a qual é devidamente instalada no tubo onde ela obriga o fluido a alterar sua velocidade e, consequentemente, seu fluxo e pressão, os quais impactam no valor de sua vazão. Ou seja, a placa de orifício mede a vazão gerando uma pressão diferencial (NASCIMENTO; JUNQUEIRA JUNIOR, 2016).

Dessa forma, em projetos industriais, costuma-se realizar sua implementação a partir de cálculos de dimensionamento cujo preceito é adquirir uma estimativa do valor de diâmetro do orifício de tal instrumento ( $d$ ) e da razão entre este diâmetro e o da tubulação ( $D$ ), conhecida por  $\beta$  (Equação 6), através dos dados de projeto (SENAI, 1999).

$$\beta = d/D \quad (6)$$

É válido salientar que esses cálculos, normalmente, são realizados de maneira empírica. Pois, dada a equação da vazão real ( $Q_v$ ) (Equação 7), percebe-se que, pela presença do fator  $E$  (Equação 8) e do coeficiente de descarga ( $C$ ) (Equação 9 a Equação 13), o cálculo torna-se mais complexo (ABNT NBR ISO 5167-2, 2011).

$$Q_v = 1,1107CE\beta^2D^2\sqrt{\Delta p/\rho} \quad (7)$$

$$E = 1/\sqrt{(1 - \beta^4)} \quad (8)$$

Em que  $\Delta p$ : queda de pressão (Pa) e  $\rho$ : densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ).

$$C = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521\left(\frac{10^6\beta}{Re_D}\right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A)\beta^{3,5}\left(\frac{10^6\beta}{Re_D}\right)^{0,3} + (0,043 + 0,08e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1})(1 - 0,11A)\left(\frac{\beta^4}{1 - \beta^4}\right) - 0,031(M'_2 - 0,8M'^{1,1}_2)\beta^{1,3} \quad (9)$$

$$M'_2 = \frac{2L'_2}{1 - \beta} \quad (10)$$

$$A = \left(\frac{19000\beta}{Re_D}\right)^{0,8} \quad (11)$$

$$Re_D = \frac{4Q_v\rho}{\pi\mu D} \quad (12)$$

Sendo  $Re_D$ : número de Reynolds para tubulação e  $\mu$ : viscosidade do fluido (Pa.s). Para tomadas tipo canto:  $L_1 = L'_2 = 0$ ; tipo raio:  $L_1 = 1$  e  $L'_2 = 0,47$  e tipo flange:  $L_1 = L'_2 = 25,4/D$ . Se  $D < 71,12\text{ mm}$  deve ser acrescentado:

$$+0,011(0,75 - \beta)(2,8 - \frac{D}{25,4}) \quad (13)$$

### 2.2.3. Tanque e vaso de armazenamento

Os tanques são responsáveis por armazenar diversos produtos destinados ao processo produtivo de indústrias, podendo tais produtos serem categorizados como: matérias-primas (armazenados em grandes quantidades para garantir o suprimento das indústrias), produtos intermediários (podem ser produtos finais de certas plantas e matéria-prima para outras) e produtos finais (esses são estocados a fim de aguardar o momento de distribuição para os consumidores). Assim sendo, esses equipamentos são de suma importância para garantir a boa flexibilidade das operações envolvidas no processo de uma indústria (GONÇALVES, 2003).

Além disso, os tanques podem ser classificados quanto a sua função e/ou ao seu tipo. Sobre o primeiro critério, os tanques se classificam em: tanques de armazenamento, onde ocorre o estoque de matérias-primas e produtos acabados à pressão atmosférica ou a pressões levemente superior à atmosférica; tanques de recebimento, estocando produtos intermediários; tanques de resíduo, responsáveis por armazenar produtos fora de especificação ou provenientes de operações indevidas, aguardando um possível reprocesso; tanques de mistura cuja função é proporcionar a mistura de produtos, ou produtos e aditivos, visando adquirir resultados de especificação (OLIVEIRA, 2023).

Já sobre o critério de tipo, os tanques possuem classificação segundo o tipo de fundo (plano, curvo, esferoidal, cônicos, cônicos invertidos e inclinados), de costado (cilíndrico e esferoidal) e de teto (fixo, móvel, fixo com diafragma flexível e flutuante) (OLIVEIRA, 2023).

O material mais comumente aplicado na fabricação de tanques de armazenamento é o aço-carbono, uma vez que os demais apresentam um custo mais elevado. Entretanto, a depender da função para que esse tanque se dedique, faz-se uso, também, de outros tipos de material, além do aço carbono, em sua composição (a exemplo de evitar o problema de corrosão) (GONÇALVES, 2003).

Os vasos de pressão são reservatórios que possuem diversas finalidades, tamanhos e tipos. A situação que justifica sua utilização é quando uma indústria deseja manipular fluidos ou gases com pressões diferentes da atmosférica. Contudo, a principal função desses vasos é de

regular a pressão interna, principalmente quando for diferente da pressão ambiente, e, quando são submetidos à tensão externa, apresentam a função de armazenamento (TELLES, 1996).

Além disso, esses equipamentos são largamente utilizados em processos de empresas do setor químico e petroquímico, onde são ligados às atividades de armazenamento, manuseio e distribuição de fluidos. Todavia, as indústrias de outros setores também podem utilizados para suas atividades (TELLES, 1996).

Esses vasos podem ser construídos de materiais e formatos geométricos distintos em função do tipo de função a que se destinam. Portanto, há vasos de pressão esféricos, cilíndricos, cônicos construídos com aço carbono, alumínio, aço inoxidável, entre outros. Esses equipamentos podem conter líquidos, gases ou mistura de ambos. Dentre suas funções, pode-se citar algumas: armazenamento final ou intermediário, amortecimento de pulsação, troca de calor, contenção de reações, filtração, destilação, entre outras (SILVA JUNIOR, 2023).

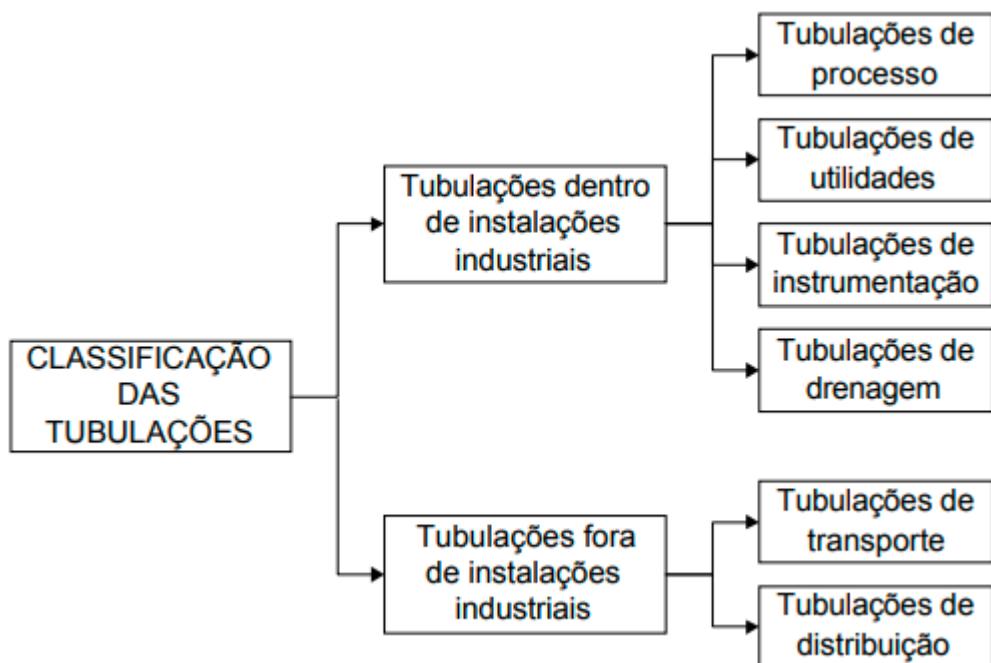
## 2.3. TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS

### 2.3.1. Importância, classificação e especificação

A necessidade de tubulações se faz necessário mediante ao fato de que, normalmente, o ponto de armazenamento e/ou geração de fluido encontram-se distantes do seu ponto de utilização/consumo. No âmbito industrial, sua importância é exacerbada, uma vez que são essenciais ao funcionamento das indústrias. No caso das indústrias de processo (indústria de petróleo, química, petroquímica, farmacêutica, alimentar, entre outras), por exemplo, as tubulações são responsáveis por interligar equipamentos (reatores, tanques, bombas, trocadores de calor, dentre outros) por onde circulam os fluidos do processo (TELLES, 2001).

Há diversos critérios de classificação para as tubulações industriais, como: quanto ao fluido conduzido e quanto a aplicação. Dentro deste último, as tubulações dividem-se em duas classes principais: tubulações dentro de instalações industriais e tubulações fora de instalações industriais. Aqui, o foco será na primeira classe. Assim sendo, as tubulações podem ser de: processo, de utilidades, instrumentação, transmissão hidráulica e drenagem, Figura 12 (ARAÚJO, 1997).

**Figura 12** - Classificação das tubulações segundo critério de aplicabilidade.

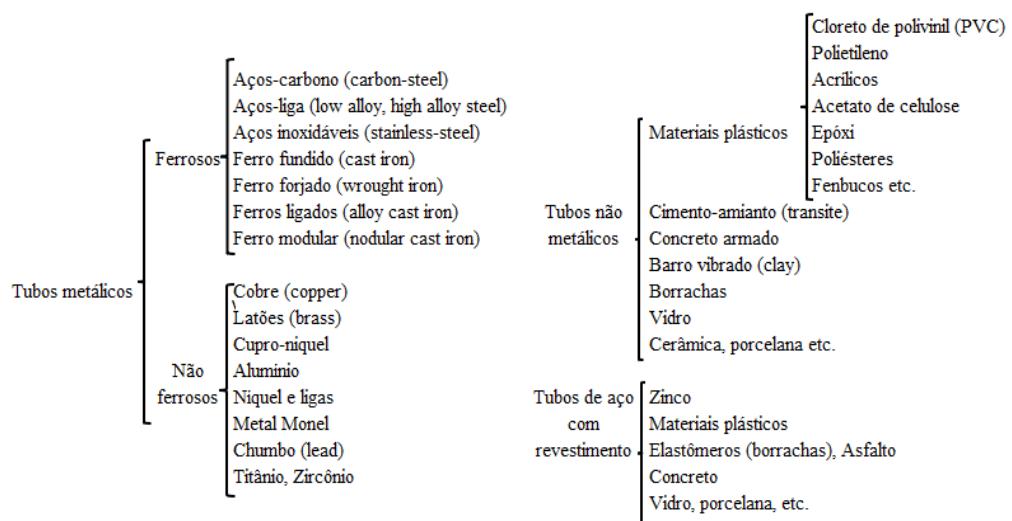


**Fonte:** RIBEIRO (2019).

Tubulações de processo são aquelas destinadas a finalidade básica da indústria: o processamento, a armazenagem e/ou a distribuição de fluidos. As de utilidade são responsáveis por transportar fluidos auxiliares (como água, vapor e ar condensador) e, assim, contribuir para o desempenho primordial da indústria. As tubulações de instrumentos, entretanto, não são destinadas ao transporte de fluidos. Elas estão envolvidas no controle operacional: transmitem sinais para válvulas de controle e para instrumentos automáticos. Além das tubulações de instrumentos, as de transmissão hidráulica também não se destinam ao transporte de fluidos. Esta classe, por sua vez, conduz líquidos sob pressão para atender a comandos hidráulicos. Por fim, as tubulações de drenagem tornam-se responsáveis por coletar e conduzir efluentes de uma indústria (ARAÚJO, 1997).

As tubulações industriais apresentam uma vasta variedade de materiais destinados à sua composição, Figura 13. Dessa forma, para determinada aplicação industrial, a seleção e a especificação do material mais adequado para tubulação não é uma tarefa fácil. Pois esta depende de uma série de fatores, entre eles: condições de operação (temperatura e pressão), das características físico-químicas do fluido transportado, do custo, do grau de segurança, da resistência ao escoamento, do sistema de ligações, da disponibilidade dos materiais e de sobrecargas externas (RIBEIRO, 2019).

**Figura 13 - Materiais constituintes de tubulações.**



**Fonte:** ADAPTADO SENAI (2023).

Os tubos constituídos de aços inoxidável são, normalmente, muito empregados nas indústrias (sobretudo nas de processo), pois, apresentam, em geral, boa resistência à fluência e à oxidação e, por isso, costumam ser utilizados em etapas que operam com uma faixa de altos valores de temperatura. Ademais, devido ao seu percentual de cromo (pelo menos 12%), não enferrujam mesmo com a exposição prolongada a uma atmosfera normal. Os casos gerais de emprego deste material em tubulações são: altas temperaturas, baixas temperaturas, alta corrosão, necessidade de não contaminação e segurança (RIBEIRO, 2019).

Especificações de Material de Tubulação são normas específicas cuja função é detalhar todos os materiais constituintes de tubulações de diversas classes de serviços, em certo projeto ou instalação. Cada especificação de material aborda uma determinada faixa de variação de pressão, de temperatura e de diâmetro. Partindo delas, para simplificação de um projeto, almeja-se coincidir os valores das faixas de pressão e de temperatura de cada especificação com a variação de pressão nominal de flanges, válvulas e conexões envolvidas no processo (TELLES, 2001).

### 2.3.2. Perda de carga

Quando um fluido escoa internamente através de tubulações, costuma sentir o impacto nas paredes devido ao atrito (resistência ao escoamento) e a uma turbulência, o qual torna-se responsável pela dissipaçāo de parte da energia envolvida nesse processo. Essa dissipaçāo de energia gera um abaixamento da pressão total do fluido ao longo do seu escoamento e, a essa variação do valor de pressão, denomina-se perda de carga (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

A maioria das tubulações industriais são constituídas de dutos sob-pressão (condutos fechados onde a pressão em seu interior é maior que a atmosférica) e acessórios de canalização (válvulas, curvas, cotovelos, tês, entre outros). A perda de carga que ocorre nos dutos, denomina-se como perda de carga distribuída, pois a pressão total reduz gradativamente ao longo do duto. Já aquela que ocorre nos acessórios, perda de carga localizada: os acessórios causam variação brusca de velocidade e, assim, intensificam a perda de carga nestes pontos (CENGEL; CIMBALA, 2007).

Dentre os diversos métodos utilizados para o cálculo da perda de carga distribuída ( $h_d$ ), comumente, utiliza-se o de Moody (Equação 14) (FOX; McDONALD, 1981):

$$h_d = \frac{1}{2} v^2 \frac{L}{D} f \quad (14)$$

Para  $v$ : velocidade de escoamento (m/s);  $L$ : comprimento do duto (m);  $D$ : diâmetro do duto (m) e  $f$ : fator de atrito de Moody. Este fator de atrito pode ser obtido pelo diagrama de Moody (Anexo 1) através da determinação do número de Reynolds (Re), Equação 15, e da rugosidade relativa, Equação 16 (FOX; McDONALD, 1981).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (15)$$

Em que  $\rho$  e  $\mu$  são a densidade ( $\text{kg/m}^3$ ) e a viscosidade absoluta (cP) do fluido. Além disso, este parâmetro (número de Reynolds) determina o tipo de regime de escoamento: laminar ( $Re \leq 2100$ ), transição ( $2100 < Re \leq 2300$ ) ou turbulento ( $Re > 2300$ ) (FOX; McDONALD, 1981).

$$\text{Rugosidade relativa} = \frac{e}{D} \quad (16)$$

Sendo  $e$ : rugosidade do material constituinte do duto (m).

Entretanto, o método de Moody estabelece uma dependência em relação a valores tabelados, o que costuma gerar uma certa fonte de erro, já que o olhar crítico varia de pessoa para pessoa. Dessa forma, para a construção de uma ferramenta de cálculo de perda de carga, é mais vantajoso fazer uso de outros métodos cujo propósito se dá pela busca de um resultado mais exato. Dentre eles, tem-se o de Colebrook, Equação 17, (MUZZO, 2019):

$$f(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} + 2 \log_{10} \left( \frac{\frac{e}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) = 0 \quad (17)$$

Em que  $\lambda$  é o fator de atrito de Darcy-Weisbach.

No caso da perda de carga localizada ( $h_l$ ), costuma-se ter duas formas mais usais de obtê-la (Equação 18 e 19) (FOX; McDONALD, 1981):

$$h_l = \frac{1}{2} v^2 K \quad (18)$$

Sendo  $K$ : número adimensional cujo valor poder ser encontrado para diversos acessórios nos Anexos 2 a 5.

$$h_l = \frac{1}{2} \frac{Le}{D} v^2 f \quad (19)$$

Para  $Le$ : comprimento equivalente de tubo reto (m), dado pela Equação 20:

$$Le = \sum K_i \quad (20)$$

Entretanto, às vezes, faz-se uso dos valores da razão  $Le/D$  encontrados no Anexo 6, para resolver a Equação 19. Portanto, a perda de carga de total ( $h_t$ ) que ocorre em uma tubulação é dada pelo somatório das perdas de carga distribuídas e localizadas, Equação 21:

$$h_t = \sum h_{d_i} + \sum h_{l_i} \quad (21)$$

#### 2.4. CONTROLE DE PROCESSO

Como possível definição, um sistema de controle refere-se a um conjunto constituído por um sistema (onde várias partes são relacionadas de tal maneira a formarem um todo. Podendo este ser físico, químico, biológico, entre outros) a ser controlado e o seu controlador (dispositivo destinado a realização do controle) (MORAES; CASTRUCCI, 2010).

Dessa forma, entende-se como controle de processos industriais: uma maneira de analisar os processos de uma indústria a fim de identificar possíveis falhas e oportunidades de melhorias. Para que, com isso, adquira otimização de seus recursos, aumento de produtividade e qualidade de seus produtos e/ou serviços. Portanto, ele almeja reduzir as falhas, garantir a estabilidade do processo, padronizar as atividades e operações, além de automatizar os processos recorrentes de indústrias (ROGGIA; FUENTES, 2016).

Dito isto, entende-se, então, que o controle de processos está envolvido em diversos setores de uma indústria, como: qualidade do produto; quantidade do produto; economia do processo; segurança da planta e proteção do processo. Sobre a qualidade, sabe-se que os produtos industriais devem satisfazer determinadas propriedades físicas e químicas. Então, quanto maior a qualidade do produto, menor é a tolerância de desvios nessas propriedades e, consequentemente, maior a necessidade da utilização de instrumentos para medição e controle para o seu monitoramento (RIBEIRO, 2001).

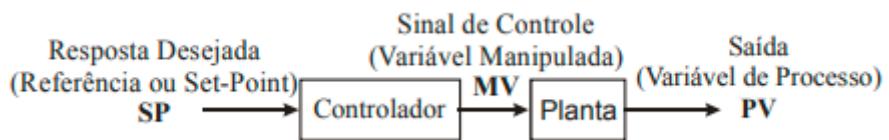
Ao que se refere a quantidade, o controle assegura a quantidade certa de substâncias para o desenvolver do processo sem comprometer o balanço de custo e o seu rendimento.

Ademais, o controle de processo permite economizar e/ou reduzir o consumo de energia para a realização das atividades industriais, além de gerar segurança na planta através da aferição e detecção da presença de concentrações perigosas de gases, vapores e chamas em determinadas áreas da empresa (RIBEIRO, 2001).

Por fim, o processo deve possuir alarmes e proteções associados ao sistema de medição e controle através de sistemas lógicos sequenciais e/ou intertravamentos (*interlock*) (dispositivo responsável por impedir que uma manobra inadequada seja executada ou ajustar o sistema para um estado seguro) que sejam capazes de sentir as variáveis de processo (temperatura, pressão, vazão, nível, viscosidade, pH, umidade, densidade e composição) e manter seus valores dentro dos limites de segurança, ligando ou desligando os equipamentos e evitando qualquer sequência indevida que produza condição perigosa (OLIVEIRA, 2013).

Existem duas classificações de sistemas de controle: com malha aberta e com malha fechada. A primeira é aquela em que a variável de saída do sistema não exerce influência sobre a variável de entrada, Figura 14. Já a de malha fechada é o oposto, onde ocorre uma monitoração/controle da variável de saída (variável de processo, PV) através da comparação do seu valor com um valor de referência (ponto de ajuste, *set-point*, SP) e, com isso, tem-se uma atuação, por parte do controlador, para eliminar erros (ARAÚJO, 2007).

**Figura 14** - Sistema de controle em malha aberta.



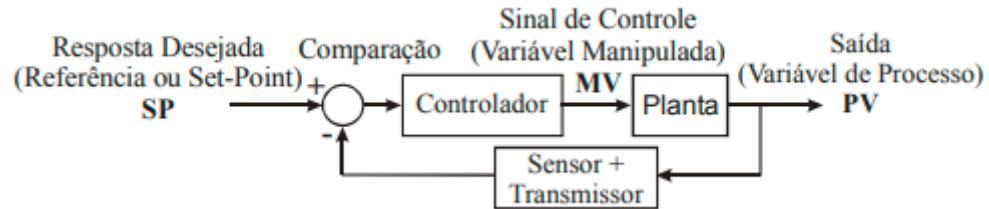
**Fonte:** ARAÚJO (2007).

A descrição anterior é a essência do controle automático, o qual é formado pelos seguintes elementos básicos: medição, comparação e atuação. A variável de processo (PV), que se pretende controlar, é aferida/medida por um sensor, condicionada e transmitida para o controlador. Este, por sua vez, também recebe uma segunda entrada: o valor de *set-point*. A partir disso, existe um cálculo de diferença entre essas duas variáveis de entrada e, a essa diferença, denomina-se de erro (SEBORG *et al.*, 2017).

Por este último, o controlador transmite uma resposta (sinal de saída) para o atuador de modo a anular o erro. O atuador, por fim, executa a ação em uma variável manipulada (MV) (em muitos casos está atrelada a válvulas, bombas, aquecedores, entre outros) com o preceito de ajustar a PV para próximo do valor de SP, conforme Figura 15. Portanto, um controle é mais

eficiente quando se tem um menor desvio padrão na saída, uma maior proximidade entre o *set-point* e a variável de processo e uma maior otimização do sistema (SEBORG *et al.*, 2017).

**Figura 15** - Sistema de controle em malha fechada.



**Fonte:** ARAÚJO (2007).

### **3. METODOLOGIA**

De maneira geral, o presente trabalho foi realizado através de avaliações e análises (de desempenho, dimensionamento e/ou comportamento) em equipamentos industriais (bombas centrífugas, placa de orifício, tanque e vaso de estocagem), tubulações e controles de processo envolvidos na área de armazenamento de dietilenoglicol. As quais foram fundamentadas por uma série de documentações internas da empresa, a exemplo: folhas de especificação; manuais de operação; desenhos técnicos; isométricos; diagramas de instrumentação e canalização (P&ID); diagramas de fluxo do processo (PFD) e ferramentas de cálculo desenvolvidas. Importante mencionar que, para atender a proposta e a implementação do projeto, foi necessário realizar alterações/atualizações em tais documentações.

#### **3.1. EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS**

##### **3.1.1. Bombas centrífugas**

Na análise de desempenho das bombas centrífugas, foi necessário coletar, em folhas de especificações, seus dados técnicos, como: potência absorvida, velocidade nominal, condições de densidade e temperatura para o fluido de teste (água) e para o fluido bombeado (DEG), além da tabela de desempenho para o fluido teste fornecido pelo fabricante. O mesmo foi feito para seus motores trifásicos cujos dados foram: frequência, eficiência, fator de potência, voltagem, potência, velocidade e torque nominais.

De posse de tais informações e, também, do conhecimento das equações de correlação de bombas semelhantes (Equação 5), das expressões de rendimento (Equação 4) e da corrente de motor trifásico (Equação 3), tornou-se possível estabelecer o comportamento teórico desses equipamentos (bombas 15P01/02/03) através da construção de suas curvas características: plotando gráficos X-Y entre a vazão e os demais parâmetros (altura manométrica, rendimento, potência e corrente). Com isso, obteve-se também o comportamento dessas bombas para faixa de valores de vazão prevista/permitida em projeto.

Ademais, realizou-se um teste de desempenho em uma das bombas centrífugas de alimentação de DEG para o processo, a 15P02, em campo e pelo software de acompanhamento de processo. Esse teste consistiu em obter, em campo, dados de pressão de descarga da bomba e de vazão na linha de recirculação para o vaso 15V01 através de instrumentos indicativos. Enquanto, pelo *software*, adquiriu-se o valor de vazão de DEG para a unidade produtiva juntamente da corrente da bomba.

Foram escolhidos seis pontos de coleta de valores: o ponto zero foi referente às condições iniciais do sistema (valores dos parâmetros com a linha de recirculação fechada), enquanto os demais foram obtidos pela abertura gradual da válvula responsável pela recirculação (esperou-se a estabilização das indicações entre cada coleta).

Com esses dados, foi possível construir uma tabela de comportamento da bomba com os parâmetros de potência, vazão, altura manométrica, rendimento e corrente. Determinaram-se os resultados de altura manométrica pela Equação 2; de vazão: pela soma entre os valores da vazão de recirculação e de alimentação para o processo; de potência através da Equação 3 e, por fim, do rendimento pela Equação 4. Por intermédio dessa tabela, obteve-se as curvas características práticas da bomba.

Portanto, esse teste teve o intuito de verificar como seria o comportamento prático da bomba, mediante adaptação do cenário da linha de recirculação (visando evitar possíveis problemas operacionais oriundos da implementação do projeto) e comparar com o teórico a fim de averiguar se este equipamento estava adequado para a realização do trabalho.

### **3.1.2. Orifício de restrição**

Foi realizado um cálculo de dimensionamento de um instrumento de orifício de restrição através de uma ferramenta desenvolvida na plataforma do Excel. É preciso fornecer os dados de entrada (temperatura do fluido, densidade e viscosidade do fluido, diâmetro da tubulação e queda de pressão) para obter os valores dos parâmetros de saída: razão entre os diâmetros ( $\beta$ ), diâmetro do orifício de restrição (Equação 6) e o coeficiente de descarga (Equação 9 a 13).

É válido destacar que essa ferramenta foi projetada segundo a opção de “atingir meta” do Excel. Almejou-se chegar, por esse método, no valor de vazão de projeto, utilizando o cálculo da Equação 7, a partir de interações e modificações do parâmetro  $\beta$ . O valor desse último, para dar início à interação, foi modificado a cada 0,10 dentro da faixa especificada pela ISO 5167-2:  $0,10 \leq \beta \leq 0,75$ . Além disso, foi estabelecido um critério de erro entre o valor da vazão calculada e a almejada pelo projeto, correspondendo a 0,0001 de diferença. A partir do qual, optou-se pelo menor valor de erro para determinar o  $\beta$  do dimensionamento.

Essa avaliação se tornou necessária através da verificação de uma restrição de valor de vazão de entrada bombeada para o tanque de armazenamento de dietilenoglicol (18T01), em sua folha de especificação. Portanto, para atende-la, foi preciso realizar a instalação de tal instrumento.

### **3.1.3. Tanque e vaso de armazenamento**

Ao que tange o vaso de armazenamento de dietilenoglicol (DEG) e o tanque de armazenagem de etilenoglicol reutilizado (SEG), fez-se uma busca pelas folhas de dados e especificações de cada um, além dos seus desenhos técnicos. Com isso, obteve-se a lista de materiais destinados à construção de cada parte dos equipamentos (fornecida pelo fabricante) e, também, das condições de operação e de projeto (capacidade, temperatura e pressão, por exemplo) deles.

Diante dessas informações, a avaliação deste item se deu de forma comparativa, dando destaque aos materiais constituintes desses equipamentos, a fim de verificar se o tanque estaria capacitado para receber e armazenar o dietilenoglicol.

## **3.2. TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS**

### **3.2.1. Especificação das tubulações adicionais**

Para a avaliação do tipo de tubulação industrial destinada as novas linhas na área de armazenamento de dietilenoglicol, foi reunido os P&IDs e os PFDs atuais dessa área com o propósito de identificar qual era o tipo de tubulação designada ao transporte do DEG.

Uma vez identificada, buscou-se informações técnicas (fluidos conduzidos; materiais constituintes; faixas de pressão, de temperatura e diâmetro) deste tipo de tubulação, em sua folha de especificação, para adequar as novas tubulações às condições operacionais daquelas já existentes.

### **3.2.2. Perda de carga**

Na avaliação de perda de carga, considerando os trechos modificados no processo com a adição das novas tubulações e já de posse dos P&IDs e dos PFDs atuais da área de armazenamento de dietilenoglicol, fez-se a identificação das linhas (tubulações) deliberadas ao percurso de transporte do fluido. Feito isso, reuniu-se seus isométricos com o objetivo de identificar e quantificar o comprimento dos trechos retos e todos os acessórios que componham essas tubulações.

Paralelamente, necessitou-se, também, buscar as informações do fluido, como viscosidade, densidade, temperatura e vazão a qual estava sujeito. Diante de todos esses dados, fez-se uso de uma ferramenta de cálculo de perda de carga desenvolvida internamente, através

da plataforma Excel, para obter a estimativa desse parâmetro (perda de carga) diante do novo cenário proposto pelo projeto.

Para o funcionamento dessa ferramenta, é preciso fornecer como dados de entrada: as informações do fluido; as características da tubulação (material, diâmetro nominal e *schedule*); a entrada e/ou saída da tubulação; redução e/ou expansão (com o devido diâmetro); o comprimento de trecho reto e a quantidade de válvulas e acessórios para obter os seguintes resultados: velocidade; número de Reynolds; fator de fricção de Colebrook; comprimento equivalente de válvulas e acessórios; comprimento equivalente de reduções e/ou expansões; perda de carga localizada, distribuída e total.

### 3.3. CONTROLE DE PROCESSO

Para a etapa destinada ao controle de processo, a fim de garantir a segurança operacional, necessitou-se instalar um instrumento de transmissão de nível (18LT01) no tanque 18T01 e, consequentemente, foram estabelecidos e configurados seus alarmes de indicação: baixo (LAL), alto (LAH) e alto alto (LAHH). Além disso, também foi implementado um alarme de nível alto alto alto (LAHHH) no vaso 15V01 cujo propósito foi assegurar o funcionamento adequado e seguro do processo.

Diante disso e da necessidade de integrar e adequar o tanque 18T01 à área de armazenamento de DEG, tornou-se fundamental estabelecer e determinar lógicas de controle constituídas por intertravamentos e sequências lógicas. Portanto, para averiguar o seu funcionamento, realizaram-se testes nas bombas de DEG (descarregamento e alimentação). Os quais foram baseados na documentação interna de controle de processo e executados através de verificações no *software* de acompanhamento de processo e de verificações em campo.

Os testes efetuados foram: (1) intertravamento da bomba de descarregamento de DEG (15P01), (2) sequência lógica das bombas de alimentação de DEG para o processo (15P02/03) e (3) intertravamento das bombas 15P02/03 através da atuação do alarme LAHHH do vaso 15V01.

Para o intertravamento da bomba 15P01, o teste, no *software*, consistiu em alterar o valor de alarme alto alto (HH) do indicador de nível do tanque 18T01 para um valor abaixo da indicação atual e verificar o intertravamento atuando na bomba 15P01 através do painel de controle. Já em campo, foi preciso descarregar um *isotank* de DEG para colocar a bomba em operação e verificar o intertravamento desse equipamento pela indicação de alarme de nível HH fisicamente.

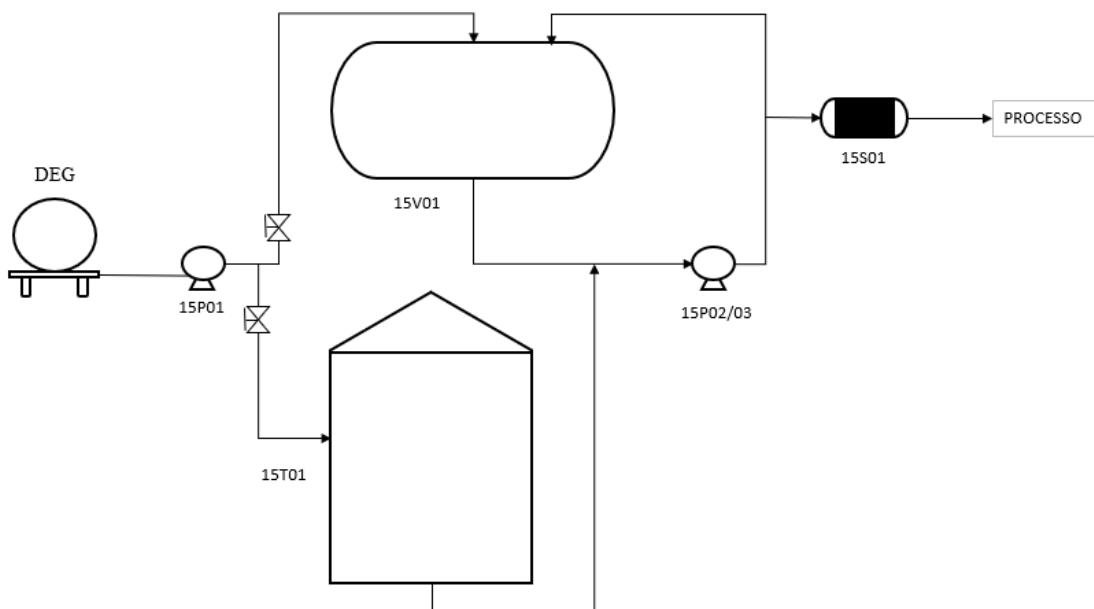
No caso da sequência lógica das bombas de alimentação de DEG para o processo (15P02/P03), pelo *software*, também se alterou o valor do alarme HH no vaso 15V01 para um valor abaixo da indicação atual e verificou-se o intertravamento ocorrendo nas bombas. No campo, o intuito foi de tentar repartir as bombas após a sua parada, uma vez que essa sequência lógica foi programada para interromper as bombas, mas, não intertravar. Ou seja, um pulso é emitido para parar a bomba, mas, não necessariamente, impedir a repartida do equipamento.

Por fim, o intertravamento nas bombas de alimentação por nível alto alto alto (HHH) no vaso 15V01 foi realizado de forma similar ao da sequência lógica no *software* de controle. Todavia, em campo, o objetivo foi verificar o intertravamento interrompendo a operação das bombas. Dessa forma, com a parada desses equipamentos, buscou-se tentar repartir o equipamento e confirmar o intertravamento (se a bomba permanece fora de operação).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização do projeto, a área de estocagem de dietilenoglicol sofreu mudanças e, consequentemente, o processo de descarregamento, armazenamento e alimentação de DEG para a planta de PET também. A Figura 16 ilustra um fluxograma representativo do novo processo após a implementação do projeto.

**Figura 16** - Fluxograma do descarregamento, armazenamento e alimentação de DEG para o processo após a realização do projeto.



**Fonte:** AUTORA (2023).

Através dela, observa-se que foi inserido um tanque (18T01) na área de armazenamento de DEG. Esse tanque já se encontrava instalado na planta e era destinado ao armazenamento de SEG, porém estava inativado. Então, diante desse cenário e almejando obter baixos custos na realização do projeto através do aproveitamento das instalações já existentes, decidiu-se por adequar e acrescentar tal tanque ao sistema de armazenagem de dietilenoglicol.

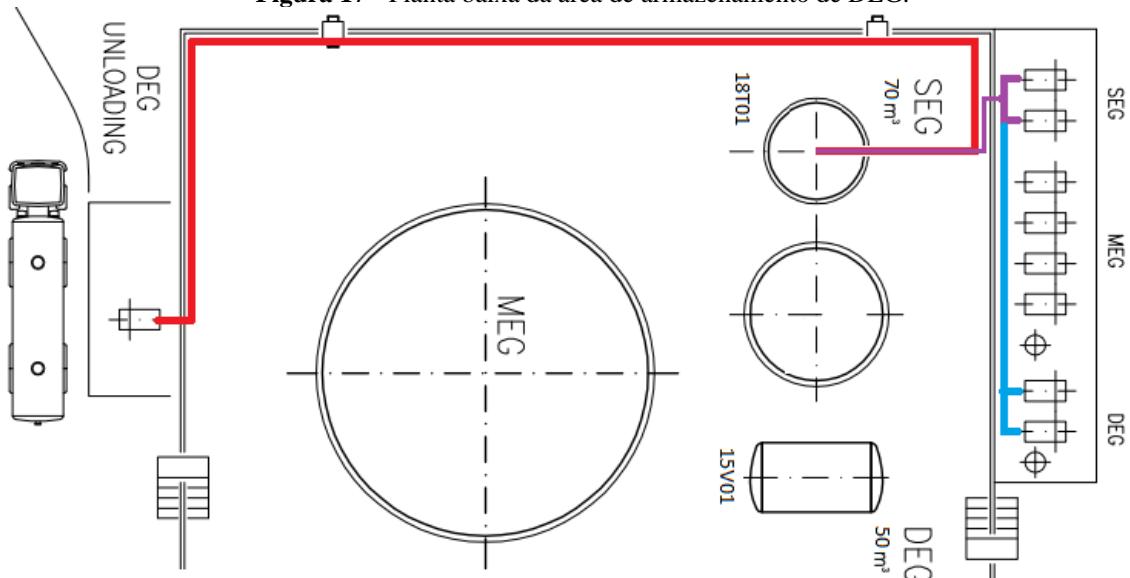
A bomba 15P01 abastece o vaso 15V01 e o tanque 18T01. Todavia, essa alimentação é feita de maneira alternada. Ou seja, quando a bomba 15P01 estiver alinhada para alimentar o vaso 15V01, a tubulação de abastecimento do tanque 18T01 estará fechada por meio de sua válvula. O mesmo ocorre para o 18T01 quando este estiver sendo abastecido.

Lógica similar ocorre para o procedimento de fornecimento de DEG para o processo de produção de resinas PET. Onde as bombas de alimentação (15P02/03) ora são alimentadas pelo vaso 15V01 e ora pelo tanque 18T01. Ressaltando que a recirculação é mantida aberta. Após as bombas 15P02/03, o fluido passa por uma filtração no 15S01 e segue para a planta de PET.

A Figura 17 ilustra a planta baixa da área de armazenamento de dietilenoglicol. Onde encontra-se, destacado em vermelho, o percurso destinado ao abastecimento do tanque 18T01 pela bomba de descarregamento de DEG (abordado no projeto) e, também, o percurso referente ao fornecimento de SEG do tanque para o processo de produção de resinas PET, em roxo. Válido frisar que este último já era existente antes da implementação do projeto.

Diante disso e visando evitar que o trabalho fosse dispendioso, foi possível implementar o trajeto para fornecimento de DEG do tanque para as bombas de alimentação desse fluido (em azul). Pois há um dreno presente no trajeto de SEG (roxo) que possibilitou realizar a conexão (com instalação de tubulações) com as bombas de alimentação de DEG.

**Figura 17 - Planta baixa da área de armazenamento de DEG.**



**Fonte:** AUTORA (2023).

#### 4.1. EQUIPAMENTOS INDUSTRIALIS

##### 4.1.1. Bombas centrífugas

A Tabela 1 apresenta as informações de especificação da bomba de descarregamento de DEG (15P01) e de seu motor. Além disso, na Tabela 2, estão presentes os resultados de desempenho desta bomba para o líquido de teste (água):

**Tabela 1** - Dados da bomba 15P01 e do seu motor.

<b>Dados da bomba</b>	
	Centrífuga
Tipo	Centrífuga
Potência absorvida (kW)	4,0
Velocidade nominal (1/min)	3500
Líquido bombeado	Dietilenoglicol
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1110
Temperatura (°C)	25
Líquido de teste	Água
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1000
Temperatura (°C)	20
<b>Dados do motor</b>	
	Trifásico
Tipo	Trifásico
Frequência (Hz)	60
Potência nominal do motor (kW)	6,1
Velocidade nominal do motor (1/min)	3550
Torque nominal do motor (Nm)	16,5
Eficiência (%)	88,0
Fator de potência	0,89
Voltagem (V)	440

**Fonte:** AUTORA (2023).

**Tabela 2** - Resultados do desempenho da bomba 15P01 para água a 20 °C e 24 bar.

<b>n (1/min)</b>	<b>P (kW)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>H (m)</b>
2915	2,29	40,4	10,03
2914	1,91	30,2	17,49
2914	1,57	18,2	21,82
2914	1,02	8,3	23,36
2913	0,6	0	23,6

**Fonte:** AUTORA (2023).

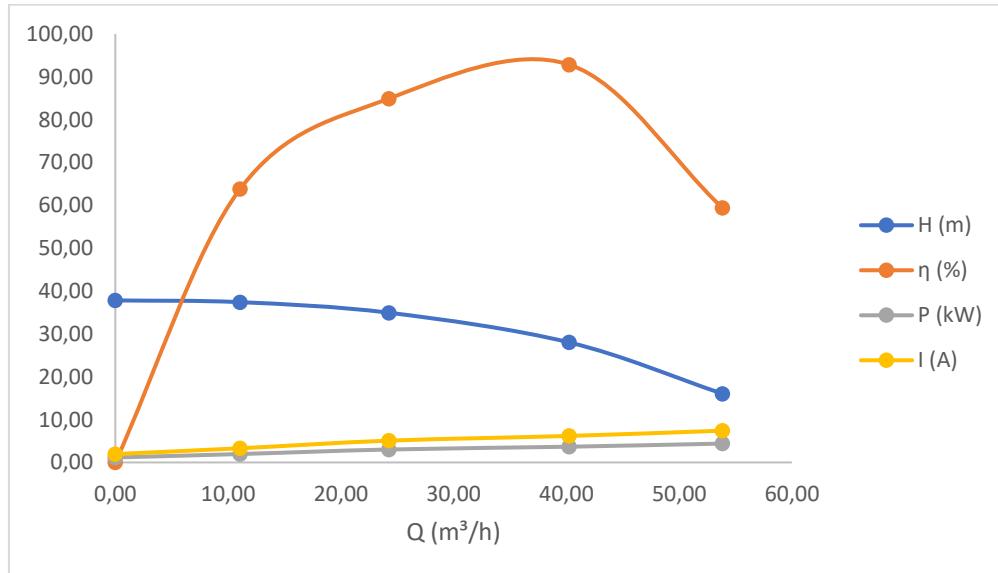
Assim, foi possível obter resultados de desempenho teórico da bomba 15P01 para o dietilenoglicol, conforme Tabela 3, pela qual plotou-se suas curvas características, Figura 18.

**Tabela 3** - Resultados do desempenho da bomba 15P01 para o dietilenoglicol a 40 °C e 24 bar.

n (1/min)	P (kW)	Q (m <sup>3</sup> /h)	H (m)	η (%)	I (A)
3500	4,40	53,84	16,05	59,41	7,41
3500	3,67	40,26	28,01	92,85	6,19
3500	3,02	24,26	34,94	84,93	5,09
3500	1,96	11,07	37,41	63,82	3,31
3500	1,16	0,00	37,82	0,00	1,95

**Fonte:** AUTORA (2023).

**Figura 18** - Curvas características teóricas da bomba 15P01 para o dietilenoglicol a 40 °C e 24 bar.

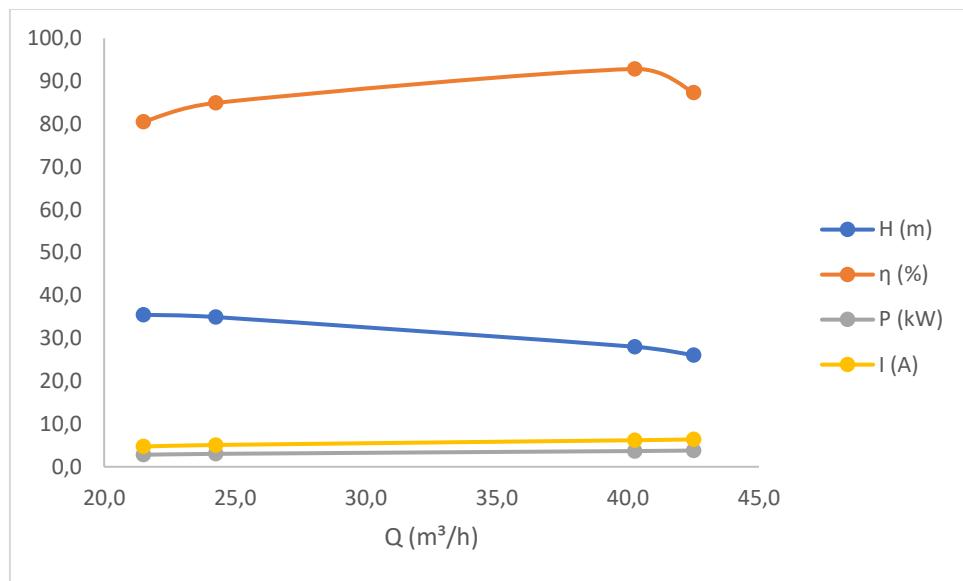


**Fonte:** AUTORA (2023).

Com isso, observa-se que esta bomba possui um máximo rendimento (maior desempenho) de 92,85 % em uma vazão próxima a 40,3 m<sup>3</sup>/h, além de suportar uma altura manométrica máxima de 37,82 m (ponto de *shut-off*).

Para atender as condições de processo em que está inserida e do presente projeto, determinaram-se valores de vazão mínima e máxima de operação correspondentes a  $21,5\text{ m}^3/\text{h}$  e  $42,5\text{ m}^3/\text{h}$ , respectivamente. Dessa forma, tem-se uma altura manométrica de  $35,5\text{ m}$  (máxima para essa situação) e rendimento de  $80,5\%$  para a mínima vazão permitida, enquanto para máxima, há  $26\text{ m}$  e  $87,3\%$ , conforme Figura 19.

**Figura 19** - Curvas características teóricas da bomba 15P01 para o dietilenoglicol a  $40\text{ }^\circ\text{C}$  e  $24\text{ bar}$  dentro da faixa de vazão permitida no projeto.



**Fonte:** AUTORA (2023).

Além da bomba de descarregamento de DEG (15P01), foi preciso avaliar o desempenho das bombas de alimentação desse fluido para o processo (15P02/15P03) com o intuito de adequá-las ao projeto. A Tabela 4 ilustra as informações sobre as bombas de alimentação e de seus motores, enquanto a Tabela 5 aborda os resultados de desempenho para água:

**Tabela 4** - Dados das bombas 15P02/03 e seus motores.

<b>Dados da bomba</b>	
Tipo	Centrífuga
Potência absorvida (kW)	2,8
Velocidade nominal (1/min)	3500
Líquido bombeado	Dietilenoglicol
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1110
Temperatura (°C)	25
Líquido de teste	Água
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1000
Temperatura (°C)	20
<b>Dados do motor</b>	
Tipo	Trifásico
Frequência (Hz)	60
Potência nominal do motor (kW)	4,4
Velocidade nominal do motor (1/min)	3550
Torque nominal do motor (Nm)	12,1
Eficiência (%)	88,0
Fator de potência	0,88
Voltagem (V)	440

**Fonte:** AUTORA (2023).

**Tabela 5** - Resultados do desempenho das bombas 15P02/03 para água a 20 °C e 24 bar.

<b>n (1/min)</b>	<b>P (kW)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>H (m)</b>
2902	1,71	7,3	22,24
2899	1,53	5,6	26,65
2896	1,38	4,0	28,55
2896	1,23	2,2	29,73
2894	1,08	0	30,53

**Fonte:** AUTORA (2023).

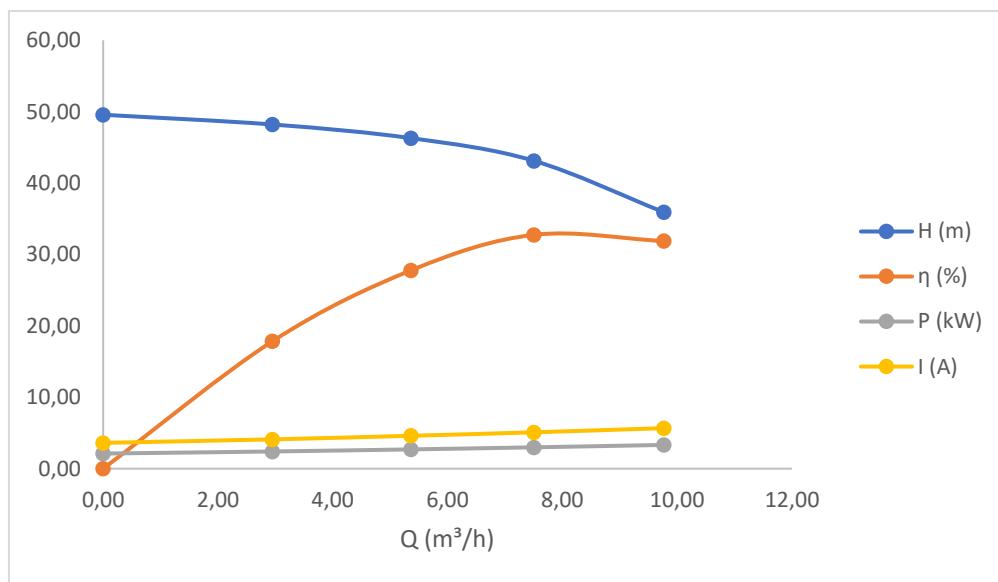
Similar ao ocorrido com a bomba 15P01, também foi possível construir uma tabela (Tabela 6) de desempenho das bombas de alimentação (15P02/03) para o DEG e suas curvas características, Figura 20:

**Tabela 6** - Resultados de desempenho das bombas 15P02/03 para o dietilenoglicol a 40 °C e 24 bar.

n (1/min)	P (kW)	Q (m³/h)	H (m)	Π (%)	I (A)
3500	3,33	9,77	35,91	31,88	5,67
3500	2,99	7,50	43,12	32,75	5,09
3500	2,70	5,37	46,29	27,78	4,61
3500	2,41	2,95	48,20	17,85	4,11
3500	2,12	0,00	49,57	0,00	3,61

**Fonte:** AUTORA (2023).

**Figura 20** - Curvas características teóricas das bombas 15P02/03 para o dietilenoglicol a 40 °C e 24 bar.

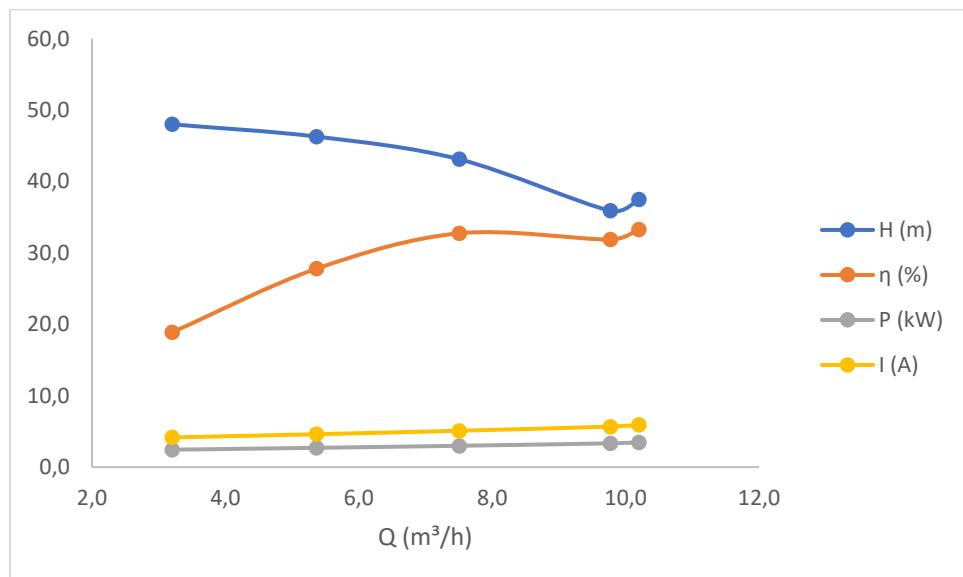


**Fonte:** AUTORA (2023).

Neste caso, essas bombas possuem um máximo rendimento de 32,75 % para uma vazão de 7,5 m<sup>3</sup>/h e uma altura manométrica máxima de 49,57 m (ponto de *shut-off*). Para atender ao projeto e ao quadro de processo da planta, estabeleceu-se uma vazão mínima de 3,2 m<sup>3</sup>/h enquanto a máxima é de 10,2 m<sup>3</sup>/h. Com isso, obteve-se um valor de altura manométrica máxima e rendimento máximo diferentes: 48 m e 33,3 %, respectivamente. O primeiro proveniente da condição de vazão mínima e o último oriundo da vazão máxima, Figura 21.

Dessa maneira, a recomendação estabelecida em projeto foi de operar esses equipamentos em valores inferiores a vazão máxima.

**Figura 21** - Curvas características teóricas das bombas 15P02/03 para o dietilenoglicol a 40 °C e 24 bar dentro da faixa de vazão permitida no projeto.



**Fonte:** AUTORA (2023).

Antes da implementação desse trabalho, a linha recirculação de DEG proveniente das bombas de alimentação para o vaso 15V01 era mantida fechada. Entretanto, foi constatado que certos problemas operacionais poderiam ocorrer caso o sistema, após a realização do projeto, fosse mantido nessa situação (com recirculação fechada): o fechamento da válvula responsável pela recirculação provocaria redução do fluxo na descarga da bomba que, por sua vez, proporcionaria um deslocamento (superior) na curva do sistema, alterando, por consequência, o ponto de trabalho. Nesse novo cenário, haveria menor vazão para o sistema, porém maior recirculação interna na bomba. A qual geraria um aquecimento do equipamento podendo danificar o selo e provocar vazamentos.

Mediante a decisão de operar com recirculação aberta, foi preciso realizar um teste de performance para a bomba 15P02 com o propósito de avaliar seu desempenho para essa nova condição. Importante ressaltar que a bomba 15P03 é idêntica a 15P02, então, os resultados obtidos desta avaliação foram replicados para a 15P03. Os dados de coleta do teste estão presentes na Tabela 7:

**Tabela 7** - Resultados do teste da bomba 15P02.

<b>Ponto</b>	<b>Horário</b>	<b>Pressão</b>	<b>Vazão de</b>	<b>Vazão</b>	<b>Vazão</b>	<b>Vazão</b>	<b>Corrente</b>
		de descarga (bar g)	recirculação (m <sup>3</sup> /h)	para linha	para linha	total de descarga (m <sup>3</sup> /h)	(A)
				<b>01</b> (m <sup>3</sup> /h)	<b>02</b> (m <sup>3</sup> /h)		
0	14:30	5	0	0,0829	0,0835	0,166	5,3
1	14:34	5,8	1	0,0815	0,0843	1,166	5,6
2	14:37	4,7	1,9	0,0815	0,0831	2,065	5,7
3	14:41	4,6	2,8	0,0814	0,0825	2,964	5,8
4	14:43	4,5	4,2	0,0809	0,0829	4,364	6,0
5	14:46	4,3	5,2	0,0806	0,0814	5,362	6,1
6	14:49	4,0	6	0,0814	0,0836	6,165	6,1

**Fonte:** AUTORA (2023).

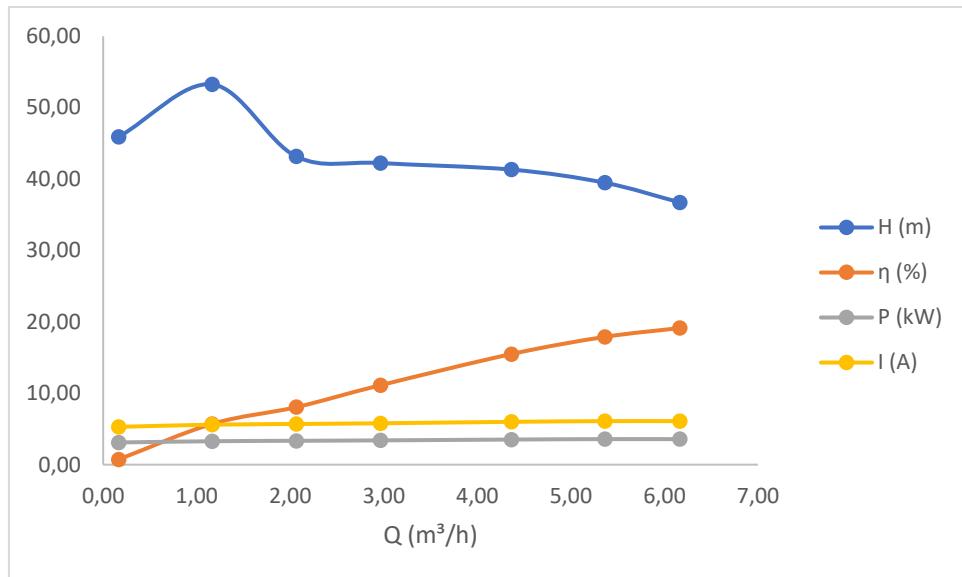
Com esses resultados, pode-se, também, construir uma tabela de desempenho (Tabela 8) e suas curvas características, Figura 22:

**Tabela 8** - Resultado do desempenho da bomba 15P02 com os valores do teste de performance.

<b>n (1/min)</b>	<b>P (kW)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Π (%)</b>	<b>I (A)</b>
3500	3,11	0,17	45,92	0,74	5,3
3500	3,29	1,17	53,26	5,72	5,6
3500	3,34	2,07	43,16	8,06	5,7
3500	3,40	2,96	42,24	11,13	5,8
3500	3,52	4,36	41,33	15,49	6
3500	3,58	5,36	39,49	17,89	6,1
3500	3,58	6,17	36,73	19,14	6,1

**Fonte:** AUTORA (2023).

**Figura 22** - Curvas características práticas do desempenho da bomba 15P02 com a realização do teste de performance.



**Fonte:** AUTORA (2023).

Diante do comportamento das curvas características obtidas com o teste, verificou-se que aqueles referentes aos parâmetros de corrente, potência e altura manométrica foram similares ao teórico. Pois, apesar do teste ter apontado uma altura manométrica máxima de 53,26 m, esse resultado pode estar atrelado a falhas humanas (tempo de reação na leitura do equipamento, comunicação, anotação de valor) e/ou mecânicas (calibração dos instrumentos, tempo de comunicação entre equipamentos de campo e *software*). Assim sendo, esse valor pode ser desconsiderado.

Já a curva de rendimento obtida no teste estava mais abaixo do que a curva teórica, o que implicou na necessidade de estabelecer uma maior frequência na realização de manutenção desse equipamento. Entretanto, pode-se constatar que o processo de alimentação de DEG pode ser realizado com a linha de recirculação aberta (Figura 20).

#### 4.1.2. Orifício de restrição

O tanque 18T01, destinado ao armazenamento de DEG, apresenta uma limitação de vazão de alimentação e descarga: 16  $\text{m}^3/\text{h}$  e 5  $\text{m}^3/\text{h}$ , respectivamente. Portanto, para garantir a especificação de vazão de entrada no tanque, tornou-se necessário instalar um orifício de restrição na linha de transferência para este equipamento. Todavia, sobre a condição de vazão de descarga, verificou-se, por meio do histórico de operação e discussão entre áreas, que não era preciso instalar uma placa de orifício para atendê-la. Visto que, normalmente, a vazão de

operação gira em torno desse valor. Além de estar dentro da faixa de vazão permitida para as bombas de alimentação (15P02/03) do fluido para o processo.

Os dados de entrada utilizados para o cálculo do dimensionamento do orifício de restrição, na tubulação de transferência de DEG pela bomba 15P01 para o tanque 18T01, encontram-se Tabela 9.

**Tabela 9** - Dados de entrada para o cálculo de dimensionamento do orifício de restrição.

Parâmetros	Valores
Viscosidade do fluido, $\mu$ (cP)	32
Densidade do fluido, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1110
Diâmetro da tubulação, D (mm)	42,5
Queda da pressão, $\Delta P$ (bar)	1,59
Vazão volumétrica desejada, $Q_{v\_desejada}$ (m <sup>3</sup> /h)	16

**Fonte:** AUTORA (2023).

É válido mencionar que foi considerada uma configuração habitual para a placa de orifício (orifício redondo e concêntrico) e as tomadas do tipo canto. Diante dessas informações, a ferramenta desenvolvida retornou os seguintes resultados, Tabela 10:

**Tabela 10** - Resultados do cálculo de dimensionamento do orifício de restrição.

Parâmetros	Valores
$E$	1,04
$A$	1,87
$M'_2$	0
$Re_D$	4618,6
$C$	0,63
$Q_{v_{Calculada}}$ (m <sup>3</sup> /h)	16,1
$\beta$	0,53
$d$ (mm)	22,5

**Fonte:** AUTORA (2023).

Por meio dela, tem-se, então, que o diâmetro esperado para o orifício de restrição seja de 22,5 mm devido à  $\beta$  ser 0,53. Além disso, a Figura 23 aborda um trecho da tabela de cálculo do erro esperado do método de atingir meta presente na ferramenta de dimensionamento. Salienta-se que tal tabela contempla toda a faixa de valores de  $\beta$  presentes na ISO 5167 (0,10 a 0,75).

Dessa maneira, realizou-se um filtro para valores de erro igual e/ou menor que 0,0001 (entre o valor da vazão calculada e a desejada) e, sequencialmente, optou-se pelo menor erro (0,00000825) para determinar o valor de  $\beta$  para o projeto. Todavia, é importante salientar que a vazão calculada ( $16,1 \text{ m}^3/\text{h}$ ) pode sofrer uma pequena redução a depender do nível de líquido dentro do tanque, visto que a tubulação de entrada é submersa no líquido.

**Figura 23** - Cálculo de dimensionamento do orifício de restrição.

Nº de interação	Erro Esperado do Atingir Meta				Valor_Obtido ( $\beta$ )
	Valor_Interação ( $\beta$ )	Qv_Desejada ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Qv_Calculada ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Erro_Calculado	
3	0,13	0,00444	0,004530829	0,00009083	0,53
11	0,21	0,00444	0,004393205	0,00004679	0,53
21	0,31	0,00444	0,004450158	0,00001016	0,53
43	0,53	0,00444	0,004448251	0,00000825	0,53

Fonte: AUTORA (2023).

#### 4.1.3. Tanque e vaso de armazenamento

Os dados de operação e de projeto para o vaso de armazenamento de DEG (15V01) e para o tanque de armazenamento de SEG (18T01) estão na Tabela 11. Por ela, é possível observar que a utilização desses equipamentos para estocagem de DEG contribui de forma favorável a execução do projeto. Pois, a capacidade total de armazenamento é de  $120 \text{ m}^3$ . Viabilizando, portanto, a importação de 100 toneladas ( $90,1 \text{ m}^3$ ) desse material.

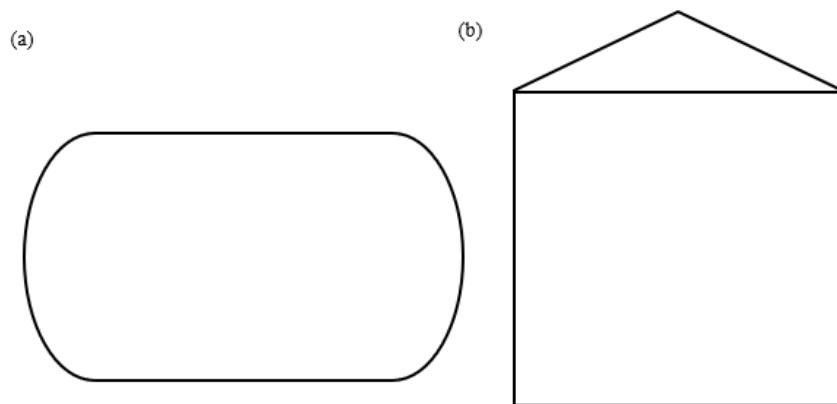
A vazão desse fluido (DEG), para o processo de fabricação de resinas PET, possui uma faixa de operação de 60 a 190 kg/h. Dessa maneira, a quantidade importada deverá ser consumida, por completo, entre 0,7 a 2,5 meses.

**Tabela 11** - Dados de operação e projeto do vaso 15V01 e do tanque 18T01.

	<b>15V01</b>	<b>18T01</b>
Capacidade (m <sup>3</sup> )	50	70
Temperatura normal de operação (°C)	25	50
Pressão manométrica operacional máxima (kPa)	-	1,5
Pressão manométrica de projeto máxima (kPa)	50	2
Temperatura máxima (°C)	40	180
Temperatura mínima (°C)	15	5
Venting Breathing rate in (m <sup>3</sup> /h)	-	270
Venting Breathing rate out (m <sup>3</sup> /h)	-	30
Venting pump rate in (m <sup>3</sup> /h)	-	16

**Fonte:** AUTORA (2023).

O vaso, 15V01, possui a configuração do tipo cilíndrico horizontal (Figura 24-a) que necessita regularizar sua pressão interna, dentro do processo, para atender a função a qual foi submetido (armazenamento de dietilenoglicol). O tanque 18T01, por sua vez, também destinado a estocar essa matéria-prima, é constituído por um teto fixo cônicamente, costado cilíndrico e fundo plano, conforme Figura 24-b.

**Figura 24** - Representação da configuração do (a) vaso e (b) tanque de armazenamento de DEG.

**Fonte:** AUTORA (2023).

Além disso, na Tabela 12, está presente a análise comparativa a respeito dos materiais que constituem as principais partes desses equipamentos. Por esta, notou-se que há uma grande compatibilidade entre os materiais constituintes do vaso 15V01 e do tanque 18T01. Assim sendo, tornou-se mais um ponto primordial para a realização do projeto, no qual foi possível

ocorrer o armazenamento de DEG no tanque 18T01, uma vez que não há riscos iminentes: como a corrosão.

**Tabela 12** - Materiais constituintes do tanque 18T01 e do vaso 15V01.

<b>MATERIAIS</b>			
<b>AB-10-A-18-T01</b>		<b>AB-11-B-15-V01</b>	
Casco	Aço inox	Casco	Aço inox
Teto	Aço inox	Cabeças/tampas	Aço inox
Viga do teto	Aço carbono		
Fundo	Aço carbono		
-Flanges	Material para flanges feito de austenítico e aço austenítico-ferríco	-Flanges	Material para flanges feito de austenítico e aço austenítico-ferríco
-Juntas	Aço-liga	-Juntas	Aço-liga
-Parafusos/porcas	Aço galvanizado	-Parafusos/porcas	Aço galvanizado
-Flanges	Aço galvanizado	-Flanges	Aço galvanizado
-Tubos	Aço-liga	-Tubos	Aço-liga
-Juntas	Material de fibra sintética reforçada com um ligante nitrílico	-Juntas	Material de fibra sintética reforçada com um ligante nitrílico
-Parafusos/porcas	Aço galvanizado	-Parafusos/porcas	Aço galvanizado
Internos	Aço inox	Internos	Aço inox
Externos	Aço inox	Externos	Aço inox
Escada, plataforma	Aço carbono	Suporte/saia/pernas	Aço carbono

**Fonte:** ADAPTADO PQS (2023).

## 4.2. TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS

### 4.2.1. Especificação das tubulações adicionais

É de suma importância verificar a compatibilidade de materiais entre equipamentos e tubulações a fim de evitar inúmeros problemas operacionais, como: corrosão, incrustações, entupimentos, entre outros. Dessa maneira, foi verificado que a maioria das tubulações, presentes na área de armazenamento de DEG, são do tipo ZXB (tubulações de processo) constituída basicamente de aço inoxidável.

Assim sendo, para o projeto, em termos de viabilidade econômica e operacional, o tipo de tubulação destinado para as linhas planejadas é o ZXB, uma vez que os cuidados e precauções são os mesmos das linhas já existentes. Dessa forma, não há necessidade de

adaptação do sistema. A Tabela 13 e a Tabela 14 abordam as especificações da tubulação ZXB, como a faixa de valores de pressão e temperatura, além dos tipos de fluidos e condições que podem ser utilizados nessa tubulação, respectivamente.

**Tabela 13** - Valores de pressão e temperatura para tubulação do tipo ZXB com faixa de diâmetro DN 15 a DN 600.

Parâmetros	Valores				
Pressão manométrica (bar)	9	7	6,5	5,9	2,36
Temperatura (°C)	60	110	160	210	240

Fonte: ADAPTADO LURGI ZIMMER (2009).

**Tabela 14** - Dados de fluidos para tubulação do tipo ZXB.

Fluido	Pressão de sucção (bar)	Temperatura de sucção (°C)	Fase	Pressão de vapor absoluta (bar)
Spent Butanediol	6	210	l	0,7
Spin Finish	4	110	l	0,009
Glycol Vent	3	210	g	-
Glycol Catalyst	6	90	l	0,009
Glycol Pure	6	60	l	0,010
Glycol residue	6	210	l	1,1
Spent Glycol	7	240	l	2,4
Triethylene Glycol	6	240	l	0,25
Glycol vapour	7	210	g	-
Delustering Agent	3	60	l	-
Terephthalic Acid	8	75	L	0,00045
Paste				
Process Hot Water	3	110	L	1,0
Process Water Vapour	2	240	G	-
Demineralized Water	6	90	L	0,5

Fonte: ADAPTADO LURGI ZIMMER (2009).

#### 4.2.2. Perda de Carga

Para a estimativa da perda de carga na tubulação entre o tanque 18T01 e a sucção das bombas de alimentação 15P02/03 do sistema de armazenamento de dietilenoglicol, foram

utilizados os dados referentes ao fluido (DEG) ilustrados na Figura 25 cujo valor da vazão aplicada visa atender a limitação de fluido bombeado de saída do tanque 18T01: 5 m<sup>3</sup>/h.

**Figura 25** - Dados do DEG para o cálculo de perda de carga na saída do tanque 18T01.

DADOS PARA CALCULO DA PERDA DE CARGA	FLUIDO:	DEG
	TEMPERATURA:	25,0 °C
	MASSA ESPECÍFICA, $\rho$ :*	1110,0 kg/m <sup>3</sup>
	VISCOSIDADE ABSOLUTA, $\mu$ :*	32,0 cP
	VAZÃO (Q):*	5,00 m <sup>3</sup> /h

**Fonte:** AUTORA (2023).

Além disso, nesse percurso existem trechos contendo reduções e expansões (diâmetros de 40, 25 e 15DN) além dos seguintes acessórios: válvula esfera, joelho padrão de 90° e tê padrão lateral, conforme ilustrado na Figura 26. Através da simulação da planilha, obteve-se 11,10 m como valor de perda de carga.

**Figura 26** - Perda de carga na tubulação entre o tanque 18T01 e a sucção das bombas de alimentação 15P02/03.

TRECHO DE SUCESSÃO						
CARACTERÍSTICAS DA TUBULAÇÃO	MATERIAL					
	Aço comercial					
DIÂMETRO NOMINAL (DN)	11/2	11/2	1	3/4	1	
SCHEDULE	ZXB	ZXB	ZXB	ZXB	ZXB	
DIÂMETRO INTERNO (D)	42,5 mm	42,5 mm	28,5 mm	16,6 mm	28,5 mm	
RUGOSIDADE (ε)	0,060 mm	0,060 mm	0,060 mm	0,060 mm	0,060 mm	
COMPRIMENTO DO TRECHO RETO	6,2 m	5,4 m	14,9 m	0,2 m	0,5 m	
ENTRADA NA TUBULAÇÃO	1					
VALVULA ESFERA	1	1	2	1	1	
JOELHO PADRÃO 90°	4	2	2			
TE PADRÃO (LATERAL)		1			1	
REDUÇÃO	DN	1,00 in	0,75 in			
	D <sub>i</sub>	0,0 mm	28,5 mm	16,0 mm	0,0 mm	
EXPANSÃO	DN			1,00 in	1,50 in	
	D <sub>i</sub>	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm	28,5 mm	42,5 mm
SAÍDA DA TUBULAÇÃO						1
RESULTADOS	VELOCIDADE (V)	1,0 m/s	1,0 m/s	2,2 m/s	0,4 m/s	2,2 m/s
	NÚMERO DE REYNOLDS (Re)	1443	1443	2152	3695	2152
	FATOR DE FRICÇÃO DE COLEBROOK, $f$ <a href="#">Calcular</a>	0,044	0,044	0,050	0,044	0,050
	COMPRIMENTO EQUIVALENTE VALVULAS E ACESSÓRIOS (Exceto reduções e expansões)	5,25 m	5,25 m	1,88 m	0,05 m	1,82 m
	COMPRIMENTO EQUIVALENTE DE REDUÇÕES	0,00 m	0,05 m	0,05 m	0,00 m	0,00 m
	COMPRIMENTO EQUIVALENTE DE EXPANSÕES	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,10 m	0,07 m
	PERDA DE CARGA LOCALIZADA ( $h_l$ )	0,27 mea	0,27 mea	0,82 mea	0,82 mea	0,80 mea
	PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA ( $h_d$ )	0,32 mea	0,17 mea	0,31 mea	1,12 mea	0,21 mea
	PERDA DE CARGA TOTAL DO TRECHO ( $h_t$ )	0,58 mea	0,44 mea	7,12 mea	1,94 mea	1,01 mea
	$\Delta p_{100}$	0,555 bar	0,555 bar	4,608 bar	60,031 bar	4,608 bar
	PERDA DE CARGA NA SUCÇÃO =					
						11,10 m

**Fonte:** AUTORA (2023).

Já na tubulação da bomba de descarregamento de DEG, 15P01, para o tanque 18T01, utilizou-se os dados presentes na Figura 27. Nesse caso, a vazão utilizada foi o da limitação de entrada do fluido no tanque: 16 m<sup>3</sup>/h. Houve apenas uma redução (modificação do diâmetro de

50DN para 40DN) e verificou-se a presença de acessórios (joelho padrão de 90° e tê lateral) e, também, de válvulas (esfera e de retenção tipo portinhola), presentes na Figura 28. Com isso, obteve-se um valor de perda de carga de 12,39 m.

**Figura 27** - Dados do DEG para o cálculo de perda na entrada do tanque 18T01.

DADOS PARA CALCULO DA PERDA DE CARGA	FLUIDO:	DEG
	TEMPERATURA:	25,0 °C
	MASSA ESPECÍFICA, $\rho$ :*	1110,0 kg/m³
	VISCOSIDADE ABSOLUTA, $\mu$ :*	32,0 cP
	VAZÃO (Q):*	16,00 m³/h

**Fonte:** AUTORA (2023).

**Figura 28** - Perda de carga na tubulação de descarga da bomba 15P01 para o tanque 18T01.

TRECHO DE RECALQUE							
CARACTERÍSTICAS DA TUBULAÇÃO	MATERIAL		Aço comercial				
	DIÂMETRO NOMINAL (DN)		2	112	▼	▼	▼
SCHEDULE	ZXB	▼	ZXB	▼	ZXB	▼	ZXB
DIÂMETRO INTERNO (D <sub>i</sub> )		54,0 mm	42,5 mm	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm	
RUGOSIDADE (ε)		0,060 mm	0,060 mm	0,060 mm	0,060 mm	0,060 mm	
COMPRIMENTO DO TRECHO RETO		48,1 m	7,5 m				
ENTRADA NA TUBULAÇÃO		1	1				
VALVULA ESFERA		1					
VALVULA DE RETENÇÃO TIPO PORTINHOLA		1					
JOELHO PADRÃO 90°		3					
TE PADRÃO (LATERAL)		1					
REDUÇÃO	DN	1,50 in					
	D <sub>i</sub>	42,5 mm	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm	
EXPANSÃO	DN						
	D <sub>i</sub>	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm	0,0 mm	
SAIDA DA TUBULAÇÃO			1				
VELOCIDADE (V)		1,9 m/s	3,1 m/s				
NUMERO DE REYNOLDS (Re)		3635	4619				
FATOR DE FRICÇÃO DE COLEBROOK, $f$	Calcular	0,042	0,040				
COMPRIMENTO EQUIVALENTE VALVULAS E ACESSÓRIOS (Exceto reduções e expansões)		10,99 m	0,06 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m	
COMPRIMENTO EQUIVALENTE DE REDUÇÕES		0,03 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m	
COMPRIMENTO EQUIVALENTE DE EXPANSÕES		0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m	
PERDA DE CARGA LOCALIZADA (h <sub>l</sub> )		1,65 mea	0,05 mea				
PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA (h <sub>d</sub> )		7,20 mea	3,51 mea				
PERDA DE CARGA TOTAL DO TRECHO (h <sub>t</sub> )		8,85 mea	3,54 mea				
$\Delta p_{100}$		1,630 bar	5,093 bar				
PERDA DE CARGA TOTAL (RECALQUE) =							
12,39 m							

**Fonte:** AUTORA (2023).

Através desses resultados (11,10 e 12,39 m), pode-se dizer que o sistema está em conformidade. Pois, atendem a faixa de valores de perda de carga estabelecida/estimada e comumente trabalhada na área de armazenamento de DEG: 10 a 16 m.

#### 4.3. CONTROLE DE PROCESSO

O transmissor 18LT01 foi configurado para as mesmas condições de operação do transmissor de nível já existente no vaso 15V01, conforme a Tabela 15.

**Tabela 15** - Condições operacionais do transmissor de nível 18LT01.

Fluido	Dietilenoglicol
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1110
Pressão manométrica (bar)	0
Temperatura (°C)	30

**Fonte:** AUTORA (2023).

As lógicas de controle, destinadas à proteção da área de armazenamento de DEG, foram estabelecidas da seguinte forma e estão ilustradas na Figura 29:

- *Interlock* de *software* que interrompe a operação da bomba 15P01 por nível muito alto no 18T01 (18LAHH01), o qual previne o transbordamento deste tanque;
- Sequência lógica que interrompe a operação das bombas 15P02/03 por nível muito alto (HH) no vaso 15V01 através de um pulso. Todavia, essa sequência permite a repartida das bombas (15P02/03). Ou seja, o pulso atua como alerta para a necessidade de alterar a linha de alimentação de DEG para o processo: deve-se interromper a alimentação pelo tanque 18T01 e alinhar para iniciar a alimentação pelo vaso 15V01;
- Na sequência lógica anterior, há um *interlock* de *software* que atua interrompendo e intertravando as bombas de alimentação de DEG para o processo (15P02/03) quando se tem o acionamento do alarme HHH no vaso 15V01. Logo, a função desse alarme, também, é evitar o transbordamento do vaso. Para normalizar o seu nível, há um *by-pass* nesse alarme HHH, o qual é acionado apenas por uma chave específica da operação, que permite colocar as bombas 15P02/03 em operação após a troca do 18T01 pelo 15V01 para alimentação do processo.

É válido destacar que o pulso referente a lógica controle por nível HH no vaso 15V01 não intertrava as bombas de alimentação de DEG. Assim sendo, caso não seja feito o ajuste de troca de tanques (do 18T01 para o 15V01), o nível do vaso continuará subindo até atingir o nível HHH e gerará o acionamento do *interlock* de *software*.

**Figura 29** - Sequência lógica e *interlock de software* do sistema de armazenamento de DEG.

S: Sequência lógica  
IS: Interlock de Software

DO INICIADOR:

MÓDULO	TAG N°	DESCRIÇÃO	STATUS
AB11-B-15	15LAHH01	LEVEL DEG STORAGE VESSEL V01	ALTO ALTO
AB10-A-18	18LT01	LEVEL SEG STORAGE TANK (POLY A)	ALTO ALTO
AB11-B-15	15LT01	LEVEL DEG STORAGE TANK	ALTO ALTO ALTO

PARA MÓDULO:  
AB11-B15

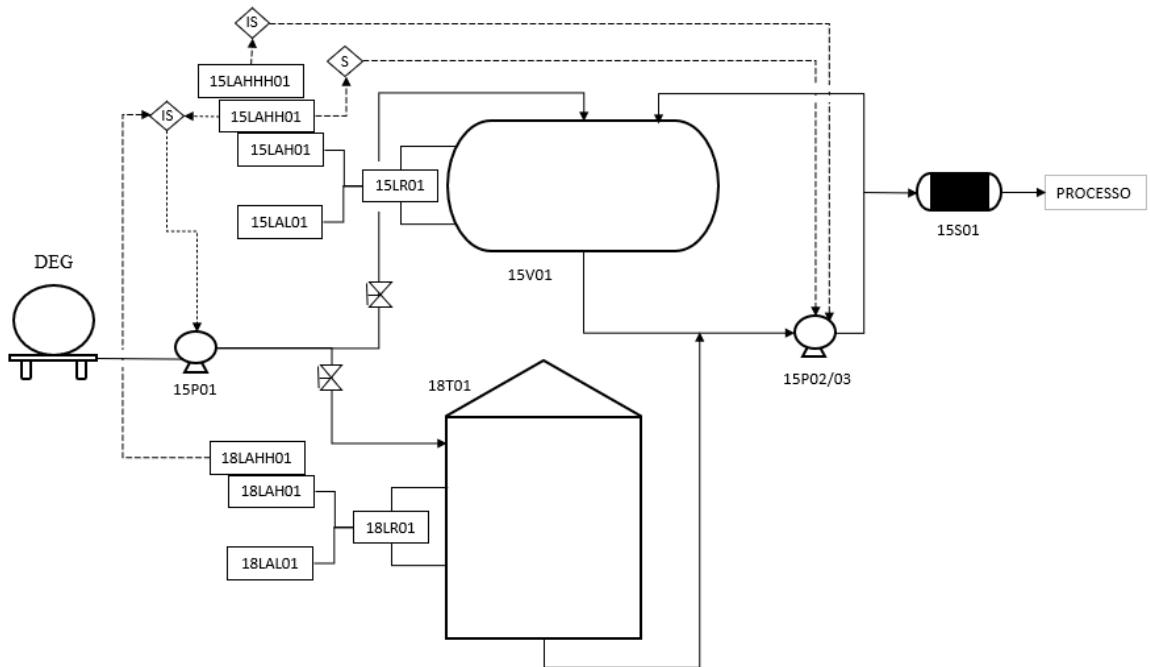
TAG N°	DESCRIÇÃO	AÇÃO	
		BOMBA DE ALIMENTAÇÃO DE DEG	LIGAR
1SP02	BOMBA DE ALIMENTAÇÃO DE DEG	LIGAR	
1SP03	BOMBA DE ALIMENTAÇÃO DE DEG	LIGAR	
1SP01	BOMBA DE DESCARREGAMENTO DE DEG	PARAR	

S	S	IS
		IS
IS	IS	

**Fonte:** AUTORA (2023).

As lógicas de controle, ditas anteriormente, estão ilustradas esquematicamente na Figura 30, a qual aborda um fluxograma ilustrativo da área de armazenamento de DEG constando os alarmes, intertravamentos e sequência lógica implementados no projeto. Nela, a corrente de produto (DEG) é representada por setas contínuas, enquanto os sinais (elétricos) envolvidos na lógica de controle são representados por setas tracejadas.

**Figura 30** - Esquema representativo da área de DEG com os alarmes, intertravamentos e sequência lógica.



**Fonte:** AUTORA (2023).

A seguir, tem-se os resultados dos testes executados para verificação do funcionamento dos intertravamentos e da sequência lógica implementados na área de armazenamento de DEG:

#### 4.3.1. Teste do intertravamento da bomba de descarregamento de DEG (15P01)

No *software* de acompanhamento da planta de PET, alterou-se o valor do alarme de nível alto alto (HH) do tanque 18T01 para um valor abaixo da indicação atual (43,5%): 40%. Com isso, verificou-se a ocorrência do intertravamento na bomba 15P01 pela indicação no próprio *software*.

No teste em campo, alinhou-se a bomba 15P01 para o tanque 18T01 e foi modificado o nível do alarme HH para um valor mais alto do que a indicação atual (46,8%): 47%. Dessa forma, com o início do descarregamento do *isotank* pela bomba, o nível chegou em 47% e o *interlock* configurado atuou parando a bomba 15P01. O mesmo ocorreu quando configurou-se o alarme HH para uma indicação de nível inferior a atual.

#### **4.3.2. Teste da sequência lógica das bombas de alimentação de DEG para o processo (15P02/03)**

O alarme de nível HH do vaso 15V01 foi alterado para um valor abaixo da indicação atual (25,4%): 20% e a bomba 15P02 foi posta em operação enquanto a 15P03 estava parada. Após isso, pode-se verificar, pelo *software*, que essa bomba parou por meio da atuação do intertravamento.

Em seguida, elevou-se o alarme HH para indicação de 80% e replicou-se o teste para a bomba 15P03, agora, em operação. Novamente, o alarme HH foi ajustado para 20% e foi constatada a parada da 15P03. Também foi visto a ocorrência do alarme de pulso em ambas as bombas.

Importante ressaltar que a sequência foi programada para interromper a operação das bombas, mas, não intertravá-las. Assim sendo, depois da parada da bomba 15P02 pela decorrência do alarme HH, fez-se o teste do *by-pass* ainda com a indicação de alarme HH como 20%. Pelo qual, pode-se colocar essa bomba em operação novamente. Após isso, desativou-se o *by-pass* e ajustou-se o alarme HH para 80%, enquanto a 15P03 se manteve parada. O mesmo foi replicado para a bomba 15P03.

#### **4.3.3. Teste do intertravamento das bombas de alimentação de DEG para o processo (15P02/03) através da atuação do alarme HHH do vaso 15V01**

Este teste foi realizado na sequência do teste supracitado: parada das bombas de alimentação de DEG para o processo (15P02/03) pela atuação de alarme HH do vaso 15V01.

Depois que a bomba 15P02 foi posta em operação, após o teste do *by-pass*, fez-se um ajuste no indicador de nível do vaso (15LR01): colocou-se em modo calibração e sua variável de processo (PV) foi modificada para o valor de 86%. Como o alarme HH foi estabelecido para um valor 80%, viu-se, através do *software* de acompanhamento da planta, que a bomba 15P02 foi intertravada. O mesmo procedimento foi feito para bomba 15P03.

Por fim, em campo, foi constatado que a bomba realmente parou e que não era possível reparti-la sem o acionamento da chave de operação para o *by-pass*.

## 5. CONCLUSÃO

A realização de projetos é um dos recursos da gestão de mudanças que permite que as organizações (como as indústrias) passem por alterações de maneira segura e eficaz. Pois, a partir de um cenário de modificações (motivado por fatores externos e/ou internos), essa ferramenta (projeto) traça uma sucessão de atividades pensadas e planejadas com o preceito da organização atingir determinados interesses.

Dessa forma, o presente trabalho permitiu desenvolver um projeto de adaptação/adequação de uma área de armazenamento de dietilenoglicol em indústria de resinas PET com intuito de aumentar sua capacidade, mediante a necessidade de importação de 100 toneladas desse material e redução de custos referentes ao armazenamento no porto de Suape. Como atividades pensadas e planejadas, esse projeto proporcionou a realização de avaliações e análises (de desempenho, dimensionamento e/ou comportamento) em equipamentos industriais (bombas centrífugas, placa de orifício, tanque e vaso de estocagem), tubulações e controles de processo.

Para atender as condições de processo, determinou-se valores de vazão mínima e máxima de operação para as bombas envolvidas na área. Para a de descarregamento de DEG, tem-se a vazão mínima de  $21,5 \text{ m}^3/\text{h}$  enquanto a máxima correspondeu a  $42,5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dentro dessa faixa, obteve-se um rendimento superior a 80%. No caso das bombas de alimentação, a vazão mínima foi de  $3,2 \text{ m}^3/\text{h}$  enquanto a máxima foi de  $10,2 \text{ m}^3/\text{h}$  para um rendimento maior que 30%. Decidiu-se operar com valores inferiores a vazão máxima. Além disso, mediante a decisão de operar com a recirculação aberta a fim de evitar problemas operacionais, realizou-se um teste de performance das bombas de alimentação, o qual foi promissor. Uma vez que as curvas características obtidas por ele foram similares as curvas teóricas.

O orifício de restrição dimensionado para a linha de alimentação do tanque de armazenamento apresentou um diâmetro de 22,5 mm e  $\beta$  de 0,53. Seu intuito foi de atender a especificação de vazão de entrada nesse equipamento. O qual foi implementado no projeto pois possui grande compatibilidade de materiais constituintes com o vaso de estocagem já existente. Além de proporcionar o aumento da capacidade de armazenamento da área (tanque mais vaso:  $120 \text{ m}^3$ ) e, sobretudo, comporta e viabiliza a importação das 100 toneladas de DEG.

Pela análise das tubulações existentes na área, foi decidido que a tubulação do tipo ZXB seria implementada para os novos trechos do projeto. Pois, fazendo uso deste tipo, pode-se verificar a existência de compatibilidade de materiais entre essa tubulação e os equipamentos

(vaso e tanque). Por consequência, evitou-se certos problemas operacionais e viabilizou economicamente o projeto, uma vez que esse tipo de tubulação já é aplicado na área em estudo.

O estudo sobre perda de carga para atender as limitações de vazão de fluido bombeado na entrada ( $16 \text{ m}^3/\text{h}$ ) e na saída ( $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) do tanque de armazenamento, gerou como resultado valores de 12,39 m e 11,10 m, respectivamente. Diante disso, o projeto se encontra em conformidade pois atende aos valores de perda de carga já estimada na área de estudo (10 a 16 m).

Por fim, foram implementados alarmes referentes aos indicadores de níveis do tanque e do vaso de estocagem de DEG, além da configuração de *interlocks* de *software* e sequência lógica de controle entre esses equipamentos e as bombas de transferência e alimentação de DEG cujo propósito foi promover a segurança operacional da unidade. Testes foram realizados e seu resultado satisfatório viabilizou a instalação desse sistema de controle.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 5167-2. **Medição de vazão de fluidos por dispositivos de pressão diferencial inseridos em condutos forçados de seção transversal circular. Parte 2: Placas de orifício**, 2011.

ABREU, R. M. A.; MARRA, A. V. **Mudança organizacional e as reações dos servidores após a implantação do REUNI**. Revista Gestão Universitária na América Latina – GUAL, 2019.

ALMEIDA JR, Holdai Ribeiro de. **Conceitos da gestão de mudança organizacional aplicados à efetividade do gerenciamento de projetos: um estudo com gerentes seniores**. Dissertação (Mestrado em Gestão e Estratégia) – Instituto de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, 2018.

ANTUNES, Sandra Maria Gouveia. **A mudança organizacional e a gestão da mudança**. Instituto Politécnico de Viseu, 2012.

ARAÚJO, Etevaldo C. **Curso técnico de tubulações industriais**. Hemus, 1<sup>a</sup> ed, 1997.

ARAÚJO, Fábio Meneghetti Ugulino de. **Sistemas de controle**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Deptº. de Engenharia de Computação e Automação, Natal – RN, 2007.

BEER, M. *et al.* **Gerenciando mudança e transição**. Rio de Janeiro: Record, 2003.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9<sup>a</sup> ed, Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CRANE. **Flow of fluids: through valves, fittings and pipe**. Technical Paper Nº 410, 2013.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**, Mc Graw Hill, Bookman, 2007.

DELMÉE, Gérard J. **Manual de medição de vazão.** 3<sup>a</sup> ed, São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

DEPENTOR, Bruno Luciano. **As mudanças organizacionais e seus impactos.** Monografia (Pós Graduação em Gestão Empresarial) – Rio de Janeiro, Universidade Veiga de Almeida, MBA gestão Empresarial, 2014.

ELETROBRÁS, *et al.* **Bombas: guia básico,** 2009.

EMHEMED, A. A. A.; GHNUME, M.; FARAJ, A. M. **Orifice plate sizing calculation using a new labVIEW technique.** ResearchGate, 2019.

ESTRADA, J. A. F. D.; SANTOS, H. R. F.; GUTIERREZ, R. H. **Gestão de mudanças em processos industriais: o caso da aplicação da ferramenta SIGM.** Enegep – XXXIII encontro nacional de engenharia de produção. Salvador, BA, Brasil, 08 a 11 de outubro de 2013.

FISPQ      Nº      28.      **Dietilenoglicol.**      2003.      Disponível      em:  
[https://www.santos.sp.gov.br/static/files\\_www/conteudo/DadosAbertos/FISPQ%20Dietileno%20glicol.pdf](https://www.santos.sp.gov.br/static/files_www/conteudo/DadosAbertos/FISPQ%20Dietileno%20glicol.pdf). Acesso em: 12 de jun. 2023.

FONSECA, Victor Ferreira da M. L. **Bombeamento de fluidos.** Apostila – Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, 2019.

FOX, R. W. & Mc. DONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos,** 2<sup>a</sup>.ed., Guanabara Dois, 1981.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos.** 7<sup>a</sup>ed, Rio de Janeiro: LTC, 2010.

GONÇALVES, Marcelo Giglio. **Monitoramento e controle de processos.** Programa de Qualificação de Operadores, SENAI – PETROBRAS, 2003.

HENN Érico Antônio Lopes. **Máquinas de fluido,** 2<sup>a</sup>ed, Porto Alegre, UFSM, 2006.

LURGI ZIMMER. **E232 – Piping material specification.** 69813-####-#-##-E232-0010 – Piping Material Specification. Rev. 0. Projeto PET SEGURO. Documento Interno Restrito, 2009.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de automação industrial.** 2<sup>a</sup> ed, Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MUZZO, Luiz Eduardo. **Análise comparativa de correlações para o fator de atrito em condutas.** Dissertação (Mestrado) – Curso: Engenharia Industrial, ramo de Engenharia Mecânica, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança e Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

NASCIMENTO, A. M. M.; JUNQUEIRA JÚNIOR, A. I. **Dimensionamento de placa de orifício para desaerador horizontal.** Universidade de Rio Verde, 2016.

OLIVEIRA, Rafael César Buriche. **Tanques de armazenamento. curso de formação de inspetor de equipamentos – TREINAEND.** Disponível em: [https://www.treinaend.com.br/material\\_apoio/01\\_37\\_001.pdf](https://www.treinaend.com.br/material_apoio/01_37_001.pdf). Acesso em: 21 de jun. 2023.

OLIVEIRA, Rafael Garlet. **Curso técnico em automação industrial.** Apostila de Controle de Processos, Luzerna, 2013.

PETROBRAS. **Manutenção e reparo de bombas.** Programa de Atualização para Mecânicos de Equipamentos de Processo, Rio de Janeiro, 2006.

PQS. **Produção e controle da qualidade da resina pet – polimerização contínua.** Documento Interno Restrito, 2016.

PQS. Relatório técnico – armazenamento de DEG. Documento Interno Restrito, 2023.

RIBEIRO, Antônio Clélio. **Curso de tubulações industriais**. Faculdade de Engenharia Química de Lorena. Apostila: AULA 1, 2019.

RIBEIRO, Marco Antônio. **Controle de processo: teoria e aplicações**. 7<sup>a</sup>ed, Salvador, BA, 2001.

ROGGIA, L.; FUENTES, R. C. **Automação industrial**. Santa Maria – RS, 2016.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. de. **Poli(tereftalato de etileno), pet: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem**. Instituto de Química, Unicamp, 2009.

SANTOS, Marcel de Souza e Silva. **Gestão da mudança organizacional: uma revisão teórica**. Dissertação (Mestrado em Gestão Empresarial) – Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas da Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2014.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A.; DOYLE III, F. J. **Process dynamics and control**. 4<sup>a</sup> ed, Wiley, 2017.

SENAI. **Tubulação industrial e estrutura metálica**. Apostila de PCO: Programa de Certificação Operacional CST. Disponível em:  
<https://proalpha.com.br/onewebmedia/tubula%C3%A7%C3%A3o%20industriais.pdf>. Acesso em 21 de jun. 2023.

SENAI. **Instrumentação básica II – vazão, temperatura e analítica – instrumentação**. CPM: Programa de Certificação do Pessoal de Manutenção. Vitória, ES, 1999.

SERRANO, Marcus Gregório. **Gestão de mudanças**. Escola de Serviço Público do Espírito Santo – Esesp. 2019.

SILVA, Marcos Antônio da. **Manual de treinamento: seleção e aplicação de bombas centrífugas.** 5<sup>a</sup> ed, KSB, 2003.

SILVA JUNIOR, Valter Firmino da. **Projeto e estudo da fabricação de vaso de pressão esférico.** Disponível em: [http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2011/Resumos/Resumo\\_TCC\\_60\\_2011.pdf](http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2011/Resumos/Resumo_TCC_60_2011.pdf). Acesso em 21 de jun. 2023.

TELLES Pedro. C. Silva. **Tubulações industriais: materiais, projeto, montagem.** LTC, 10<sup>a</sup> ed, 2001.

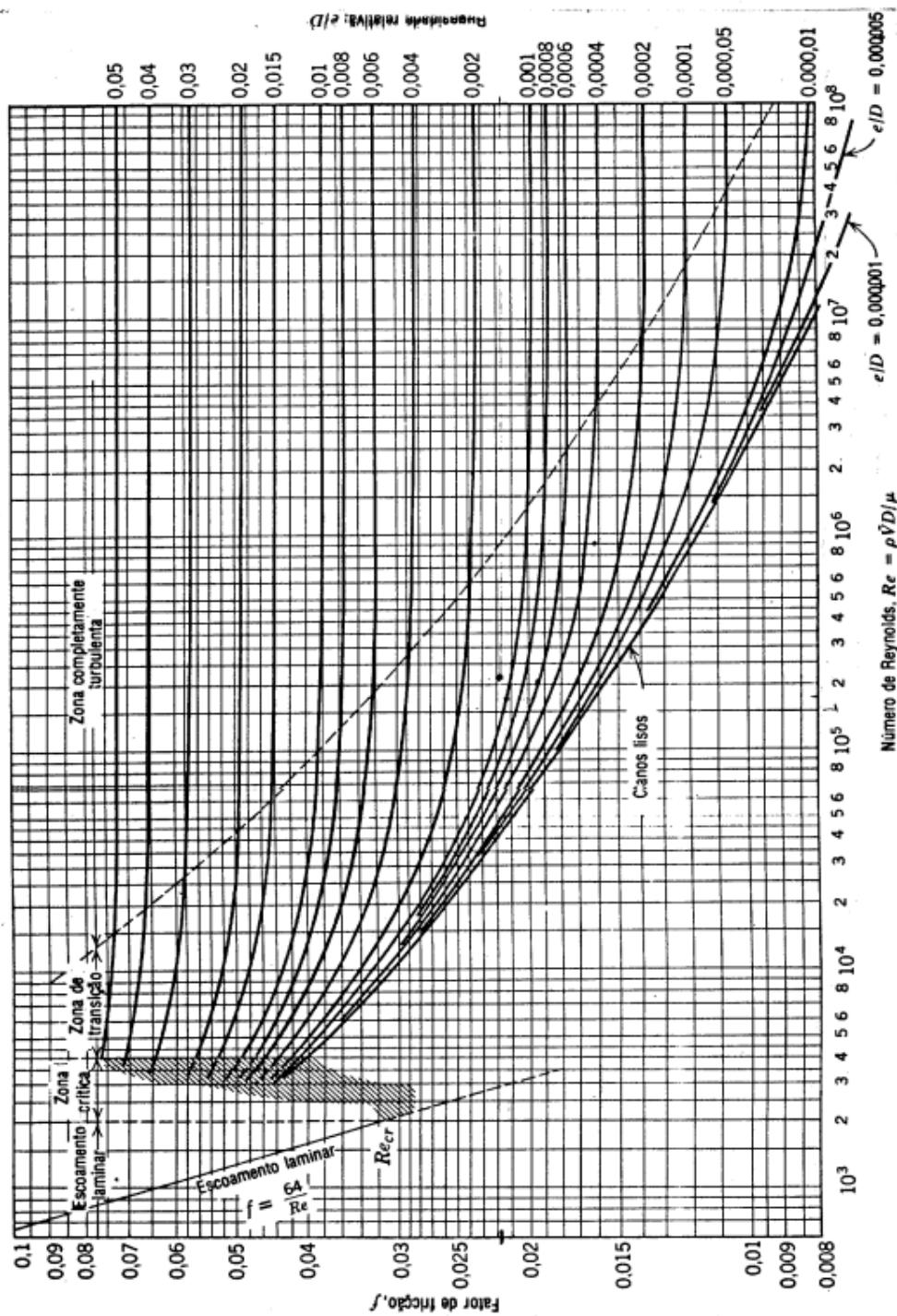
TELLES, Pedro. C. Silva. **Vasos de pressão.** 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

TURNER, J. Rodney. **The handbook of project-based management.** 3<sup>a</sup>ed, New York: McGraw-Hill Education, 2008.

UETA, Artur Shozo Nishi. **Projeto de impelidor e voluta para uma bomba centrífuga.** Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

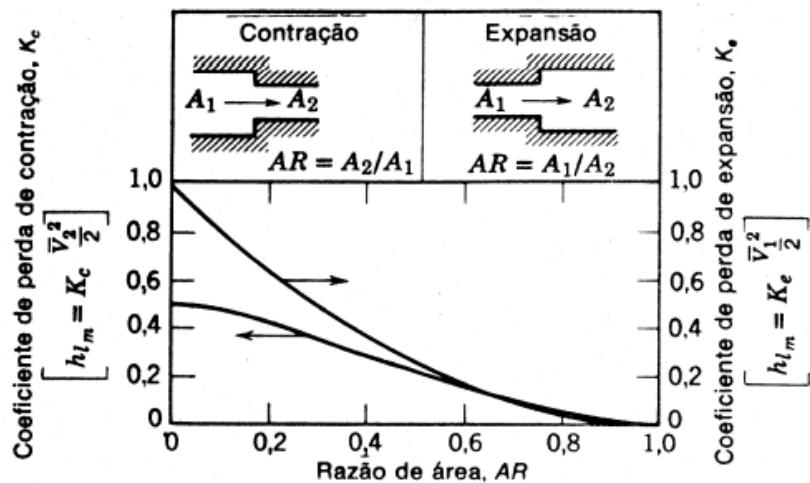
WEG. **Guia de especificação motores elétricos.** Disponível em: <https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em 21 de jun. 2023.

## ANEXO 1 – DIAGRAMA DE MOODY



Fonte: FOX & McDONALD (1981).

**ANEXO 2 – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA PARA ESCOAMENTO ATRAVÉS DE VARIAÇÕES BRUSCAS DE ÁREA**



Fonte: FOX & McDONALD (1981).

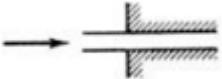
**ANEXO 3 – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA PARA CONTRAÇÕES GRADUAIS**

Diagrama	Ângulo incorporado, $\theta$ , Graus	Coeficiente de perda, $K^*$
	30	0,02
	45	0,04
	60	0,07

\*Baseado em  $h_{lm} = K \left( \frac{\bar{V}_2^2}{2} \right)$ .

Fonte: ADAPTADO FOX & McDONALD (1981).

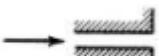
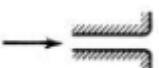
#### ANEXO 4 – COEFICIENTES DE PERDAS SECUNDÁRIAS PARA ENTRADAS DE CANOS

Tipo de entrada	Diagrama	Coeficiente de perda secundária, $K^*$
Reentrante		1,0
Canto vivo		0,5
Arredondada†		~0,04

\*Baseado em  $h_{lm} = K \left( \frac{\bar{V}^2}{2} \right)$ , onde  $\bar{V}$  é a velocidade média no cano. † $r/R > 0,25$

Fonte: ADAPTADO FOX & McDONALD (1981).

#### ANEXO 5 – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA PARA SAÍDA EM TUBULAÇÕES

Tipo de saída	Diagrama	Coeficiente de perda secundária, $K^*$
Cano protundente		1,0
Canto vivo		1,0
Arredondado		1,0

\*Baseado em  $h_{lm} = K \left( \frac{\bar{V}^2}{2} \right)$ .

Fonte: ADAPTADO FOX & McDONALD (1981).

**ANEXO 6 – COMPRIMENTOS EQUIVALENTES ADIMENSIONAIS (Le/D) PARA VÁLVULAS E CONEXÕES**

<b>Tipo de Conexão</b>	<b>Descrição</b>	<b>Comprimento equivalente, Le/D*</b>
Válvula-globo	Completamente Aberta	350
Válvula-gaveta	Completamente Aberta	13
	$\frac{3}{4}$ aberta	35
	$\frac{1}{2}$ aberta	160
	$\frac{1}{4}$ aberta	900
Válvula de segurança		50-100
Joelho a 90° padrão		30
Joelho a 45° padrão		16
Joelho a 90°	Raio longo	20
Joelho macho/fêmea a 90°		50
Joelho macho/fêmea a 45°		26
Tê	Escoamento da linha reta	20
	Escoamento em curva	60
Curva em «U»	Desenho fechado	50

\*Baseado em  $h_{lm} = f \frac{Le}{D} \left( \frac{\bar{V}^2}{2} \right)$ .

**Fonte:** ADAPTADO FOX & McDONALD (1981).