

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

GIOVANA CAMPOS ABUD

GUSTAVO MAIA LOCATELLI

REGULADOR DE PRESSÃO POR ENGRENAGEM:
PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO
DE REGULADOR DE PRESSÃO

Taubaté - SP

2023

GIOVANA CAMPOS ABUD
GUSTAVO MAIA LOCATELLI

REGULADOR DE PRESSÃO POR ENGRENAGEM:
PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO
DE REGULADOR DE PRESSÃO

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador(a): Prof. Me. Luiz Ricardo Prieto Hercos

Taubaté – SP
2023

Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi
Universidade de Taubaté - Unitau

A165r Abud, Giovana Campos
Regulador de pressão por engrenagem: projeto e desenvolvimento de um modelo de regulador de pressão / Giovana Campos Abud, Gustavo Maia Locatelli -- 2023.
67 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2023.
Orientação: Prof. Me. Luiz Ricardo Prieto Hercos, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Regulador. 2. Protótipo. 3. Vazão. 4. Pressão. I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. Graduação em Engenharia de Produção Mecânica. II. Locatelli, Gustavo Maia.

CDD – 658.5

Ficha catalográfica elaborada por **Aline Peregrino – CRB-8/10970**

GIOVANA CAMPOS ABUD
GUSTAVO MAIA LOCATELLI

REGULADOR DE PRESSÃO POR ENGRENAGEM:
PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE REGULADOR DE
PRESSÃO

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

DATA: 21/11/2023

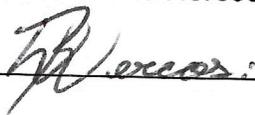
RESULTADO: APROVADO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Me. Luiz Ricardo Prieto Hercos

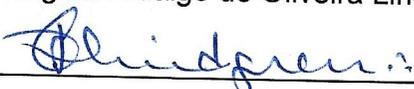
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura:



Prof. Me. Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura:



Novembro de 2023

Dedicamos este trabalho aos nossos pais Gilberto, Katia, Vagner e Carolina e a
nossas irmãs Maiara, Giovana e Gabriele.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecemos a Deus, que nos guiou para elaboração desse trabalho, nos dando força e sabedoria.

Ao nosso orientador, Prof. Me. Luiz Ricardo Prieto Hercos por todo incentivo e auxílio na orientação deste trabalho.

Aos nossos pais e familiares que incentivaram nossos estudos e a conclusão do nosso curso.

A Prof. Me. Maria Regina Hidalgo Oliveira Lindgren pelo incentivo a nossos estudos e por aceitar compor nossa banca como convidada.

“O regulador de pressão é a mão firme que suaviza as águas turbulentas, tornando o fluxo da vida mais tranquilo e controlado.”

AUTOR DESCONHECIDO

RESUMO

A recorrente necessidade de saneamento básico na sociedade atual reforçou a área de engenharia para realizar projetos hidráulicos seguros e funcionais, um dos principais focos de estudo nas tubulações utilizadas é o controle de pressão, visando reduzir acidentes. O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um protótipo de sistema com implementação de um regulador de pressão capaz de regular a pressão na saída do sistema, sendo ela diminuída ou elevada a partir do controle de rotação das engrenagens do equipamento. O modelo do sistema e do equipamento foram elaborados com intuito de desenvolver o protótipo do projeto, considerando os materiais e dimensionamento em busca de resultados favoráveis a ideia inicial. Através dos cálculos realizados, foram encontrados valores que comprovam que o sistema é funcional, demonstrando que além da redução de pressão é possível realizar o aumento de pressão apenas mudando o sentido da rotação das engrenagens.

Palavras-chave: Regulador, protótipo, vazão, pressão.

ABSTRACT

The recurring need for basic sanitation in today's society has reinforced the engineering area to carry out safe and functional hydraulic projects, one of the main focuses of study in the pipes used is pressure control, with the intention of reducing accidents. The main objective of this work is to develop a prototype system with the implementation of a pressure regulator capable of regulating the pressure at the system's exit, which can be lowered or raised by controlling the rotation of the equipment's gears. The system and equipment models were elaborated in order to develop the project prototype, considering the materials and sizing in search of results favorable to the initial idea. Through the calculations carried out, values were found that prove that the system is functional, demonstrating that in addition to reducing pressure, it is possible to increase pressure just by changing the direction of rotation of the gears.

Keywords: Regulator, prototype, flow, pressure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Manômetro Baixa Pressão Tipo Diafragma Mod. P5500, de 160mm H ² O até 25 Kgf/cm ²	17
Figura 2 - Manômetro digital CPG1500, até 10000 bar (150000 psi)	18
Figura 3 - Manômetro com tubo de Bourdon	19
Figura 4 - Bomba de pistão	20
Figura 5 - Bomba de engrenagens	21
Figura 6 - Bomba de lóbulos	21
Figura 7 - Bomba de Tornilho	22
Figura 8 - VRF de ação direta	23
Figura 9 - Componentes VRF de ação direta	24
Figura 10 - Regulagem de pressão antes e depois da VRF	24
Figura 11 - Diminuição da demanda e fechamento do obturador da VRF	25
Figura 12 - Instalação da VRF proporcional	26
Figura 13 - Componentes da VRF pilotada	27
Figura 14 - Sentido do fluxo de água da VRF pilotada	27
Figura 15 - Engrenagem cilíndrica	28
Figura 16 - Engrenagem cilíndrica de Dente Helicoidal	28
Figura 17 - Engrenagem Cônica	29
Figura 18 - Cremalheira	29
Figura 19 - Engrenagem Helicoidal Dupla	30
Figura 20 - Engrenagem cilíndrica de dente interno	30
Figura 21 - Ambiente de trabalho Inventor	33
Figura 22 - Formatos Inventor	33
Figura 23 - Plano de criação da sketch	34
Figura 24 - Sketch 2D	34
Figura 25 - Comando Extrude	35
Figura 26 - Parâmetros do modelo	36
Figura 27 - Material do modelo	36
Figura 28 - Comando Sweep	37
Figura 29 - Sketch 2D flange	38
Figura 30 - Comando Revolve	39
Figura 31 - Comando Hole	39
Figura 32 - Comando Pattern	40
Figura 33 - Parâmetros utilizados nos flanges	40
Figura 34 - Vista do regulador 3D	41
Figura 35 - Vista do regulador	42
Figura 36 - Vista em corte no plano X	42
Figura 37 - Vista em corte no plano Z	43
Figura 38 - Vista em corte no plano Z	43
Figura 39 - Comando Spur Gear	44
Figura 40 - Cálculos Engrenagem	45
Figura 41 - Modelo 3D das engrenagens	45
Figura 42 - Comando Bevel Gear	46
Figura 43 - Modelo 3D engrenagem cônica	47
Figura 44 - Montagem 3D das engrenagens	47
Figura 45 - Modelo 3D do manômetro	48
Figura 46 - Modelo 3D da Junta de vedação	49
Figura 47 - Modelos 3D das gaxetas e preme da gaxeta	49
Figura 48 - Modelo 3D do motor	50
Figura 49 - Ambiente de trabalho para montagens	51
Figura 50 - Modelo 3D do sistema completo	51
Figura 51 - montagem 3D do regulador de pressão	52
Figura 52 - Condições do sistema	53
Figura 53 - Orientação de rotação do Regulador de Pressão	58

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Dimensões Flange</i>	38
<i>Tabela 2 - Valores de Rotação, Vazão e Pressão (variando em condição A e B).</i>	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A

ABNT · *Associação Brasileira de Normas Técnicas*

ABS · *Pressão Absoluta*

ASTM · *American society for testing and materials*

D

DN · *Diâmetro Nominal*

N

NBR · *Norma Brasileira*

P

PN · *Pressão Nominal*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS GERAIS.....	13
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2.	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	PROPRIEDADES DO FLUIDO	14
2.1.1	PRESSÃO	14
2.1.2	VAZÃO VOLUMÉTRICA	15
2.1.3	MASSA ESPECÍFICA.....	15
2.1.4	PERDA DE CARGA	16
2.2	COMPONENTES PERIFÉRICOS.....	17
2.2.1	MANÔMETRO	17
2.2.2	ENGRENAGENS.....	19
2.2.3	VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO.....	19
2.3	BOMBA VOLUMÉTRICA	20
2.4	DEFINIÇÃO DE REDUTOR	22
2.4.1	TIPOS DE REDUTORES	23
2.4.2	TIPOS DE ENGRENAGENS POR REDUTORES	27
2.4.3	FUNCIONAMENTO DO REDUTOR	31
3.	METODOLOGIA.....	32
3.1	TUBULAÇÃO.....	32
3.1.1	TUBULAÇÃO PRINCIPAL	32
3.1.2	TUBULAÇÃO SECUNDÁRIA.....	37
3.2	FLANGES.....	38
3.3	REGULADOR DE PRESSÃO	41
3.3.1	CARCAÇA	41
3.3.2	SISTEMA DE ENGRENAGENS.....	44
3.3.3	MANÔMETRO	48
3.4	VEDAÇÃO	48
3.5	SISTEMA DE ACIONAMENTO	49
3.6	SISTEMA COMPLETO	50
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	PRIMEIRA CONDIÇÃO.....	54
4.2	SEGUNDA CONDIÇÃO	56
4.3	TERCEIRA CONDIÇÃO	59
4.4	CONDIÇÕES GERAIS	60
5.	CONCLUSÕES	63
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

1. INTRODUÇÃO

O modelo da sociedade atual se transcorre da evolução de diversas áreas do conhecimento. A recorrente necessidade de evolução em busca de conforto e agilidade nas tarefas diárias, fez com que a engenharia se destacasse com o desenvolvimento de novos projetos que atendessem as necessidades de seus usuários.

Uma recorrente necessidade, que busca ser alcançada por toda população, é o saneamento básico. O fluxo de água, esgoto e outros fluidos entre residências e pontos de distribuição, incentivou o surgimento de projetos hidráulicos, que por sua vez, trouxe conforto e facilidade no uso a todos que utilizam dessa fonte diariamente.

A distribuição desses fluidos para seus devidos destinos depende diretamente de uma distribuição hidráulica, responsável por deslocar o fluido de sua fonte de origem até o local desejado através de uma série de tubulações e outros equipamentos.

As tubulações instaladas em um sistema, são as estruturas responsáveis por criar o caminho para o fluxo, que por sua vez será intensificado pela ação das bombas hidráulicas. Este equipamento garantirá a correta direção e pressão do fluido.

As bombas hidráulicas e tubulações, assim como todos os equipamentos de um sistema hidráulico são projetados e calculados afim de evitar futuras falhas como trincas na tubulação, cavitação, corrosão dos materiais e uma rápida crescente de pressão no sistema.

Visando promover a segurança dos projetos e garantir o controle da pressão dos fluidos, a engenharia de projetos, ao longo dos anos, desenvolveu equipamentos responsáveis pelo controle de pressão, como por exemplo os vasos de pressão, as válvulas redutoras de pressão e de fechamento rápido.

Os redutores de pressão são equipamentos projetados para reduzir as pressões de um sistema ao receberem o fluido em alta pressão em um determinado ponto e retorná-lo com pressões reduzidas em outro ponto do sistema. Isso é possível através do auxílio de motores pneumáticos, redutores elétricos, ou conforme

apresentado neste trabalho, a partir da divisão do sistema principal em uma ramificação com uma bomba volumétrica em forma de regulador de pressão.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Avaliar uma nova concepção de reguladores de pressão no qual pode ser variada dentro de um único sistema, considerando seu cálculo, projeto, funcionamento e viabilidade ao aplicá-lo em um sistema.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar e desenvolver um projeto de um regulador de pressão acionado por um sistema de engrenagens, permitindo um controle ativo de variação de pressões;
- Avaliar o funcionamento teórico do equipamento dentro de um sistema.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PROPRIEDADES DO FLUIDO

2.1.1 PRESSÃO

Definida inicialmente pelo físico italiano Evangelista Torricelli no século XVII, a grandeza responsável por medir a força do fluido numa determinada superfície é chamada de pressão. Reafirmada pelo White (2008), a pressão é uma grandeza escalar considerando que possui uma única direção e sentido.

Complementando, o raciocínio de Cimbala (2017), a grandeza é a razão entre força e área, medida pela grandeza escalar Pascal, que representa 1 Newton para cada metro quadrado de área. A principal relação de área ou superfície de contato com a força, informa que quanto maior a força maior será a pressão encontrada no sistema.

Cimbala (2017) explica os diferentes tipos pressões que podem ser encontradas, conforme classificações abaixo:

- Pressão atmosférica: Usa como referência o nível do mar e foi medida pela primeira vez através do uso de mercúrio em experimento realizado por Torricelli, Evangelista. O estudo concluiu que a pressão atmosférica é definida pela pressão da coluna de mercúrio encontrada no tubo de vidro do experimento;
- Pressão absoluta: Usa como referência um vácuo perfeito que não muda independentemente da altitude ou das condições climáticas (zero absoluto). Isso torna seu trabalho mais fácil e menos sujeito a erros, pois ele usa um ponto de referência estável. Quando mensurado geralmente utiliza a notação ABS;
- Pressão diferencial: Compara a pressão de dois diferentes pontos, ou seja, quando qualquer ponto diferente do vácuo ou atmosfera é tomado como referência, por exemplo a pressão diferencial encontrada numa placa de orifício.
- Pressão manométrica (Gauge): Usa a pressão atmosférica como referência. Os sensores geralmente possuem um respiradouro ou câmara para

pressão atmosférica. Comparando esta pressão (atmosférica) com a pressão absoluta. Em outras palavras, a pressão medida sempre reflete as condições às quais o instrumento está exposto devido à pressão atmosférica e às condições climáticas.

2.1.2 VAZÃO VOLUMÉTRICA

De acordo com Franzini (1999), os fluidos de um sistema sofrem influência de duas principais atividades, a vazão e a pressão. A relação das duas atividades gera informações essenciais para o funcionamento do mesmo.

Ainda segundo Franzini (1999), a vazão consiste no volume adquirido pelo fluido que transita no determinado espaço do sistema num determinado instante de tempo, já a pressão é a força exercida pelo fluxo em uma determinada área. A vazão é originada a partir de um gerador, como as bombas que promovem uma movimentação no sistema, diretamente ligada a velocidade atingida pelo fluido.

Um sistema que tem objetivo reduzir sua pressão, deve, entretanto, aumentar a vazão de ar comprimido no sistema em relação à vazão de ar fornecido no interior do sistema, conforme concluído por Franzini (1999) em suas abordagens.

2.1.3 MASSA ESPECÍFICA

Massa específica, segundo Callister (2016) é o conceito que define a massa de um corpo pelo seu volume. Esta propriedade física permite comparar a “compactação” de diversos materiais, ao analisar quanto de massa está contida num determinado espaço.

A massa específica é um tema de discussão fundamental conforme afirmado por Callister (2016), a definição de seu valor altera as propriedades e comportamentos de um determinado material.

$$\rho = m/V$$

Onde cada variável representa a seguinte informação:

$\rho = \text{Massa específica [kg/m}^3\text{]}$

$m = \text{Massa [kg]}$

$V = \text{Volume [m}^3\text{]}$

2.1.4 PERDA DE CARGA

Segundo White (2008), a perda de carga é uma redução na pressão do fluido causado pela resistência ao fluxo, atrito e outras perdas de energia ao longo do sistema, afetando assim o desempenho eficiência.

Ainda segundo White (2008), podem ocorrer devido a vários fatores, incluindo:

- **Atrito com as paredes da tubulação:** Conforme o fluido flui através da tubulação, ele entra em contato com as paredes da tubulação, gerando atrito. Quanto mais áspera for a superfície interna da tubulação e quanto maior for a velocidade do fluido, maior será a perda de carga devido ao atrito;
- **Curvas, conexões e obstruções:** Em sistemas de tubulação, curvas, conexões, válvulas e outros componentes podem criar perturbações no fluxo do fluido, resultando em perda de carga localizada. A magnitude dessa perda de carga depende da geometria e do tipo de componente;
- **Comprimento da tubulação:** A perda de carga também está relacionada ao comprimento da tubulação. Quanto mais longo for o trecho da tubulação, maior será a perda de carga ao longo desse trecho.
- **Viscosidade do fluido:** A viscosidade do fluido afeta a perda de carga. Fluidos mais viscosos têm maior resistência ao movimento e, portanto, podem gerar maiores perdas de carga.

2.2 COMPONENTES PERIFÉRICOS

2.2.1 MANÔMETRO

Conforme apresentado por Morris (2015): sensores, tendências, mercados e aplicações, o instrumento usado para realizar medições de pressão de fluídos, líquidos ou gasosos, num ambiente fechado, como salas, recipientes, sistemas hidráulicos, de ar comprimido entre outras é o manômetro. Em suas dissertações, enumera vários tipos de manômetros no mercado, desde o mais simples composto por apenas um medidor com ponteiro, que não demanda energia elétrica para funcionar, até os mais modernos, digitais.

Figura 1 - Manômetro Baixa Pressão Tipo Diafragma Mod. P5500, de 160mm H²O até 25 Kgf/cm²



Fonte: <https://ashcroft.com.br/wp-content/uploads/2021/07/P5500-e-P6500-MP-026b-1.pdf>

Figura 2 - Manômetro digital CPG1500, até 10000 bar (150000 psi)

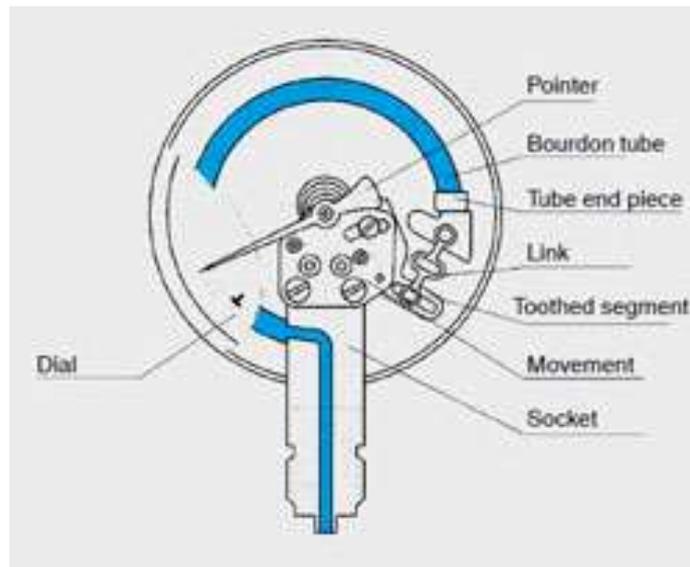


Fonte: <https://www.instrumatic.com.br/artigo/medicao-de-pessao-caracteristicas-tecnologias-e-tendencias>

Os manômetros ou medidores de pressão como explicados por Morris (2015), podem ser utilizados em sistema de baixa até alta pressão, sendo sua maioria aplicada no método de medição de Bourdon, formados por um tubo radial com uma seção transversal oval. A pressão do meio de medição atua no interior do tubo e produz um movimento linear no final do mesmo, gerando um movimento proporcional à medição da pressão indicada no ponteiro através de um sistema mecânico de movimento.

O tubo de Bourdon em formato de “C”, como apresenta Morris (2015), forma um ângulo de 250° aproximadamente, sendo possível a aplicação em até 60 bar e se necessário para pressões mais elevadas, são aplicados tubos de Bourdon com inúmeros enrolamentos sobrepostos no mesmo diâmetro angular (tubo helicoidal) ou com enrolamento espiral de uma camada.

Figura 3 - Manômetro com tubo de Bourdon



Fonte: https://www.wika.com.br/landingpage_bourdon_tube_pressure_gauge_pt_br.WIKA

2.2.2 ENGRENAGENS

Segundo Dudley (2016), engrenagem é um componente mecânico utilizado para transmitir movimento e potência entre objetos em máquinas e dispositivos. As engrenagens são rodas dentadas que se acoplam entre si de maneira que seus dentes encaixam e giram juntas. Ao girar uma engrenagem, transfere-se o movimento para a engrenagem acoplada, e isso pode ser usado para alterar a velocidade, o torque e a direção do movimento.

Conforme apresentado por Dudley (2016), engrenagens são utilizadas em uma ampla gama de aplicações, desde relógios até automóveis e maquinaria industrial. Existem vários tipos de engrenagens, cada uma projetada para cumprir diferentes funções e requisitos.

2.2.3 VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO

Uma válvula é um dispositivo mecânico projetado para controlar, direcionar ou regular o fluxo de fluidos (líquidos, gases ou misturas) através de um sistema ou tubulação. As válvulas desempenham um papel essencial em uma variedade de aplicações industriais, comerciais e domésticas, permitindo que o fluxo de fluidos seja

interrompido, ajustado ou direcionado de acordo com as necessidades do sistema, conforme descrito por Skousen (2011).

As válvulas desempenham um papel crítico em garantir a eficiência e a segurança de muitos sistemas industriais e de infraestrutura, tornando-as componentes fundamentais em engenharia mecânica, elétrica, química e civil, entre outras áreas, complementa Skousen (2011).

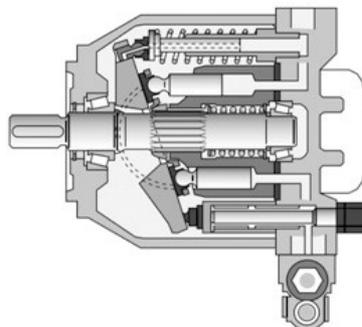
2.3 BOMBA VOLUMÉTRICA

Uma bomba volumétrica é um dispositivo mecânico utilizado para movimentar fluidos, como líquidos ou gases, por meio de um processo de deslocamento positivo, diz Baptista (2016). Diferentemente das bombas centrífugas, que funcionam por meio da força centrífuga e são mais adequadas para movimentar grandes volumes a baixa pressão, as bombas volumétricas trabalham gerando uma pressão positiva em uma câmara ou cavidade, o que permite movimentar um volume específico de fluido em cada ciclo.

Existem vários tipos de bombas volumétricas, entre as que se incluem:

- Bomba de pistão: Usa um pistão para deslocar o fluido dentro de um cilindro. Quando o pistão se move para trás, cria vácuo, permitindo que o fluido entre na câmara. Então, quando o pistão se move para trás, o fluido é expelido, intensifica Baptista (2016).

Figura 4 - Bomba de pistão



- Bomba de Engrenagens: Usa um par de engrenagens interligadas para capturar o fluido em movimento conforme as engrenagens giram, conforme apresenta Baptista (2016). O espaço entre os dentes da engrenagem cria uma câmara de volume variável que retém e desloca o fluido.

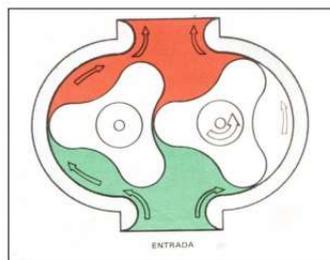
Figura 5 - Bomba de engrenagens



Fonte: <http://www2.pelotas.ifsul.edu.br/~andrea/lib/exe/fetch.php?media=bombasdeslocamentopositivo.pdf>

- Bomba de lóbulos: Conta com dois lóbulos giratórios que se engancham entre si, criando câmeras que prendem e liberam o fluido à medida que os lóbulos giram, dada pontuação de Baptista (2016).

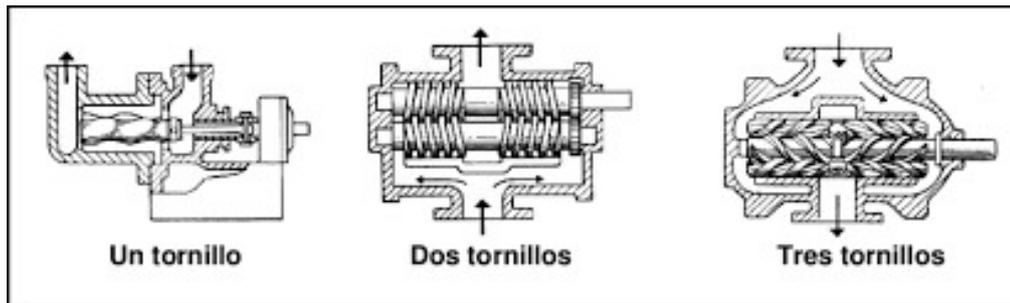
Figura 6 - Bomba de lóbulos



Fonte: <http://www2.pelotas.ifsul.edu.br/~andrea/lib/exe/fetch.php?media=bombasdeslocamentopositivo.pdf>

- Bomba de tornilho: Conforme apresenta Baptista (2016), a mesma consiste em um tornilho de Arquimedes giratório que transporta o fluido ao longo do seu eixo à medida que gira.

Figura 7 - Bomba de Tornilho



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/2-7-Bomba-Rotatoria-de-Tornillos_fig13_313674527

Estes são apenas alguns exemplos de bombas volumétricas, e cada tipo tem suas próprias aplicações e vantagens. As bombas volumétricas são especialmente úteis quando requerem um fluxo constante e controlado de fluido, mesmo em altas pressões e velocidades, conforme Mott (2021). É utilizado em uma variedade de indústrias, como a química, a petroquímica, a alimentícia, a farmacêutica e a manufatura, para movimentar e dosificar fluidos de maneira precisa.

2.4 DEFINIÇÃO DE REDUTOR

De acordo com Baptista (2016), os redutores de pressão são equipamentos projetados com intuito de reduzir a pressão gerada pelo fluxo de um determinado fluido dentro de um sistema. O processo ocorre através da passagem de fluido pela entrada do redutor até a saída, que dá retorno ao sistema.

Ainda segundo Baptista (2016), fluido durante esse percurso sofre com a ação de elementos como motores ou engrenagens que se movimentam de forma contrária ao fluxo, gerando assim a perda de carga, com essa perda, os fluidos retornam ao sistema com uma velocidade amena, conseqüentemente, com uma pressão reduzida.

2.4.1 TIPOS DE REDUTORES

2.4.1.1 VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO POR AÇÃO DIRETA

Tem por finalidade reduzir a pressão de água antes de um determinado ponto de instalação no sistema, para um valor desejado após o mesmo. Independente da vazão, por tanto, a pressão será constante de acordo com a regulagem, conforme apresentado por Baptista (2016). Sendo possível o acerto a qualquer momento, facilitando e agilizando manobras de manutenção, caso necessário.

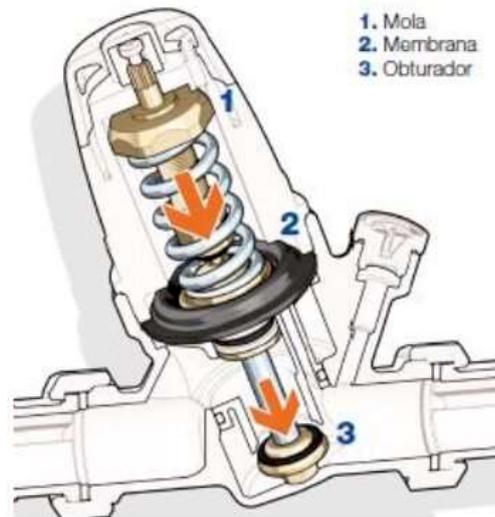
Figura 8 - VRF de ação direta



Fonte: *Catálogo BERMAD – Válvula Redutora de Pressão Modelo 42 LP (p. 1)*

Seu funcionamento se baseia na ação direta por uma mola regulável, uma membrana e um obturador, o qual fecha e abre. Sendo acionada com base no equilíbrio de duas forças que se opõem, fazendo com que a abertura para a passagem de água aumente ou se reduza a partir da tensão da mola sobre o obturador, sendo fechada com a pressão do líquido pós válvula no obturador, forçando o fechamento. O sistema se abre, quando a força sobre a membrana se reduz, deslocando o obturador para baixo de acordo com Baptista (2016).

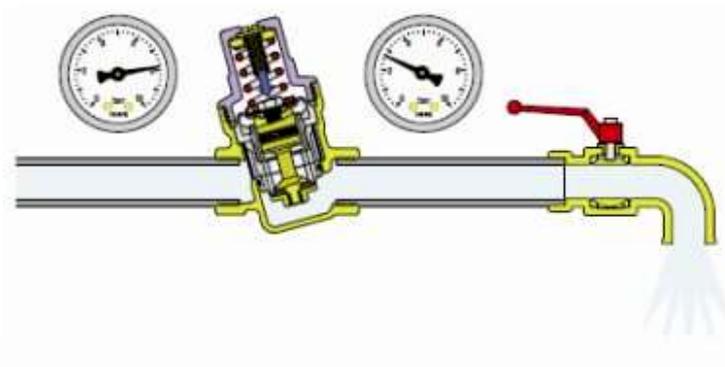
Figura 9 - Componentes VRF de ação direta



Fonte: Catálogo BERMAD – Válvula Redutora de Pressão Modelo 42 LP (p. 2)

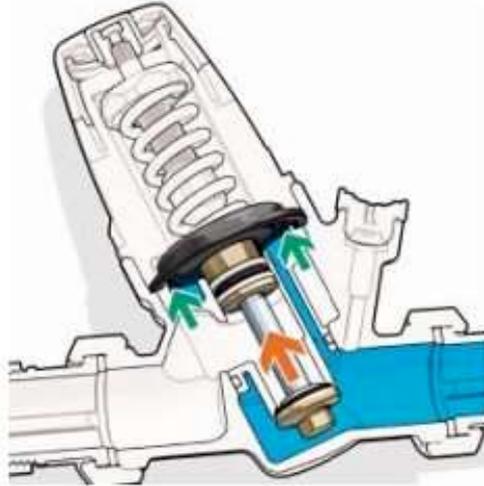
Ainda de acordo com Baptista (2016), pressão de saída é dada pelo ajuste da mola, menos a perda de carga que ocorre devido a vazão, logo quanto maior a demanda de água menor a pressão por baixo da membrana.

Figura 10 - Regulagem de pressão antes e depois da VRP



Fonte: Catálogo BERMAD – Válvula Redutora de Pressão Modelo 42 LP Light (p. 2)

Figura 11 - Diminuição da demanda e fechamento do obturador da VRP



Fonte: Catálogo BERMAD – Válvula Redutora de Pressão Modelo 42 LP (p. 3)

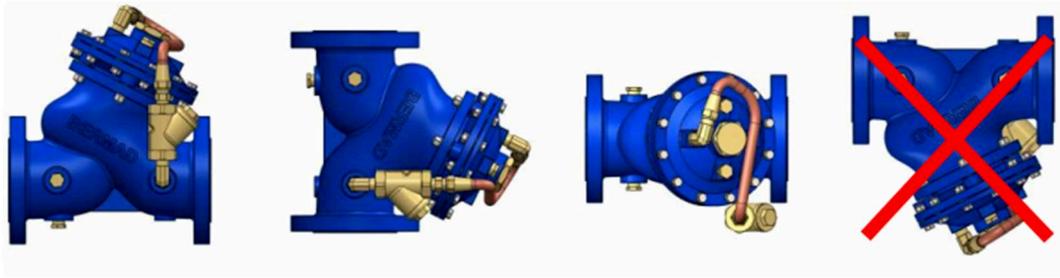
2.4.1.2 VÁLVULA REDUTORA DE PRESSÃO PROPORCIONAL

Este tipo de válvula se baseia no funcionamento no princípio de pascal, onde diz que a pressão é comunicada igualmente por todos os pontos de um fluido em equilíbrio, conforme apresenta Baptista (2016).

A Válvula Redutora de Pressão Proporcional, se mantém fechada quando não há consumo, possibilitando que a pressão depois do ponto instalado, não permaneça maior que a permitida em norma. Seu funcionamento se baseia num pistão flutuante, que se move conforma existe a variação do fluxo do fluido, sendo assim o movimento causado quando há fluido no sistema, gera uma diferença de pressão que puxa o embolo e obriga o pistão a se movimentar no sentido do fluxo, logo quanto maior a vazão, maior a abertura, exemplifica Baptista (2016).

Por ausência de regulagem, a precisão da pressão de saída, sendo regulada conforme o fluxo de fluido do sistema, assim seu projeto é inteiramente voltado as informações do comportamento do sistema, no qual será aplicada (vazão e velocidade) conforme apresenta Baptista (2016).

Figura 12 - Instalação da VRP proporcional



Fonte: Válvula Redutora de Pressão Modelo 720 PD-V (p. 3)

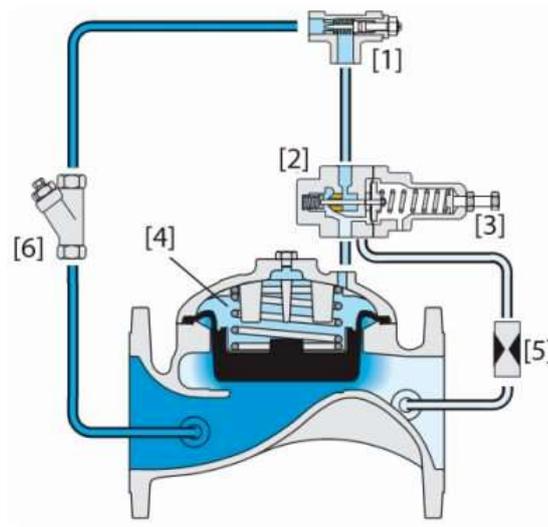
2.4.1.3 VÁLVULA REDUTORA DE PRESSÃO PILOTADA

Este tipo de válvula tem como princípio, reduzir a pressão de saída de forma constante, não sendo afetada por variações normais de vazão e pressão do sistema, conforme Baptista (2016).

O dispositivo, apresenta: uma válvula de água, um piloto redutor ajustável, parafuso de regulagem, uma câmara, uma placa de orifício e um filtro. Seu funcionamento se baseia em monitorar a pressão de saída do sistema através do piloto redutor ajustável, utilizando a pressão de entrada através de um filtro e de uma válvula de agulha que regula a velocidade com que a válvula fecha, assim complementado por Baptista (2016).

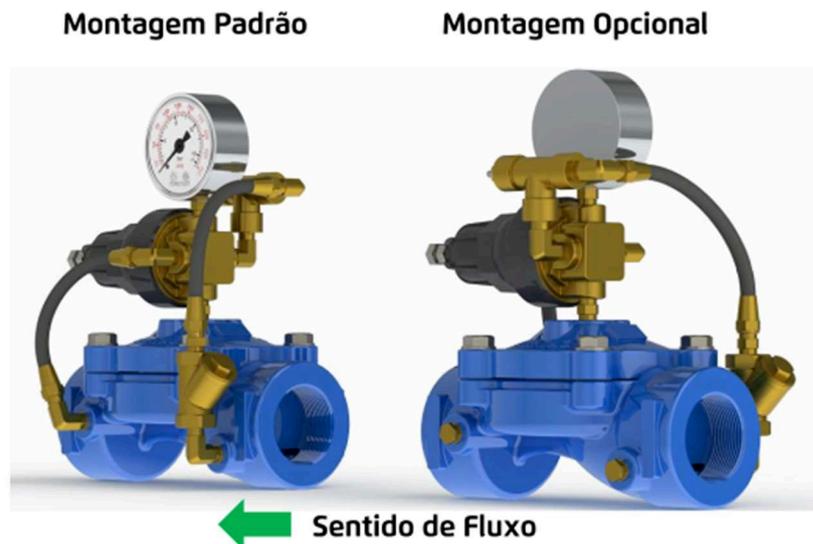
O piloto apresenta um diafragma que está submetido à pressão da mola por cima e à pressão de saída em sua câmara inferior, a variação de pressão de saída movimenta o eixo do piloto, injetando água na câmara da válvula para fechar ou drenar, escoando através de uma placa de orifício que controla a velocidade com que ela abre, de forma geral tendo sua pressão de saída controlada pelo ajuste do parafuso que ajusta a mola do piloto, assim apresentado por Baptista (2016).

Figura 13 - Componentes da VRP pilotada



Fonte: Válvula Redutora de Pressão Modelo 420 (p. 4)

Figura 14 - Sentido do fluxo de água da VRP pilotada

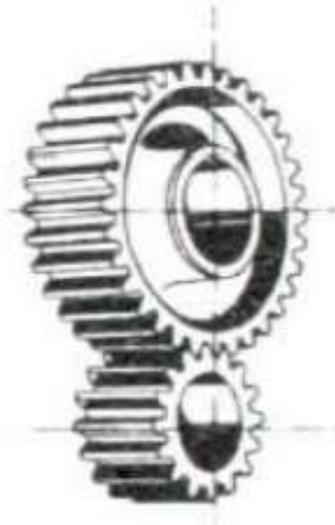


Fonte: Válvula Redutora de Pressão Modelo 420 (p. 4)

2.4.2 TIPOS DE ENGRENAGENS POR REDUTORES

- Engrenagem Cilíndrica de dente reto: utilizada na transmissão entre eixos paralelos, tem seu dimensionamento mais simples, admite grandes relações de transmissões. Seu rendimento é alto 98-99%, transmite cargas radiais, exigem, portanto, mancais que suportem apenas esse tipo de carregamento, segundo Mott (2021).

Figura 15 - Engrenagem cilíndrica



Fonte: [http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC025/Aulas/5-Engrenagens/5-1-Engrenagens+Lei do Engrenamento.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC025/Aulas/5-Engrenagens/5-1-Engrenagens+Lei_do_Engrenamento.pdf)

- Engrenagem Cilíndrica de Dente Helicoidal: Segundo Mott (2021) é usada em transmissão de eixos paralelos, apropriadas para cargas e velocidades elevadas. Trabalham de modo mais Armonico se comparado a de dente reto. Devido ao dente helicoidal gera carregamento axial sobre os mancais além dos radiais. Rendimento alto.

Figura 16 - Engrenagem cilíndrica de Dente Helicoidal



Fonte: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC025/Aulas/5-Engrenagens/5-1-Engrenagens+Lei do Engrenamento.pdf>

- Engrenagem Cônica: usada na transmissão entre eixos ortogonais ou concorrentes com distintos ângulos entre eles. Podem apresentar dentes oblíquos ou retos, neste caso com velocidade restrita e com transmissão limitada de acordo com Mott (2021).

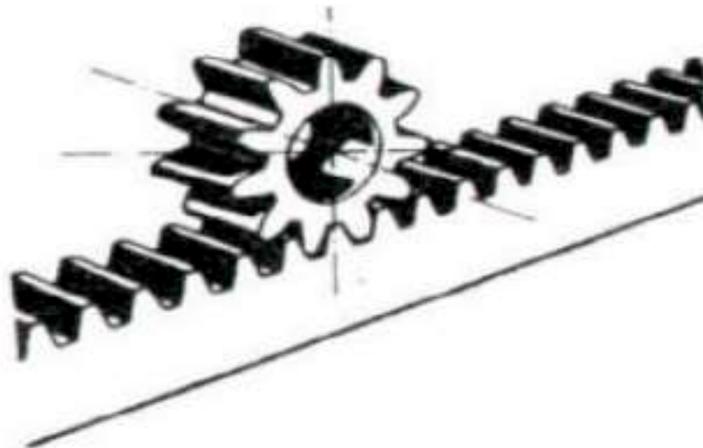
Figura 17 - Engrenagem Cônica



Fonte: [http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC025/Aulas/5-Engrenagens/5-1-Engrenagens+Lei do Engrenamento.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC025/Aulas/5-Engrenagens/5-1-Engrenagens+Lei%20do%20Engrenamento.pdf)

- Cremalheira: de acordo com Mott (2021), a mesma é utilizada para transformar um movimento de rotação numa translação, podendo ser de dente reto ou helicoidal.

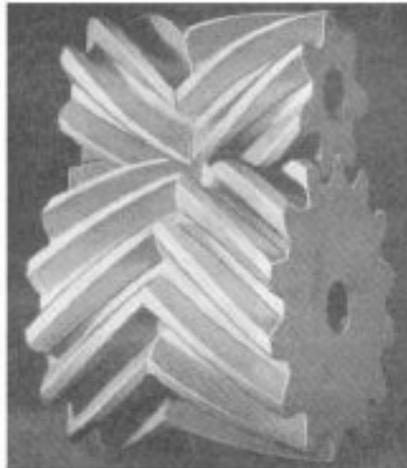
Figura 18 - Cremalheira



Fonte: [http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC025/Aulas/5-Engrenagens/5-1-Engrenagens+Lei do Engrenamento.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC025/Aulas/5-Engrenagens/5-1-Engrenagens+Lei%20do%20Engrenamento.pdf)

- Engrenagem helicoidal dupla: transmite grandes carregamentos sem gerar carga axial nos mancais, pois a hélice tem direção oposta, dado Mott (2021). É possível atingir este efeito unindo duas engrenagens helicoidais opostas em relação a outra.

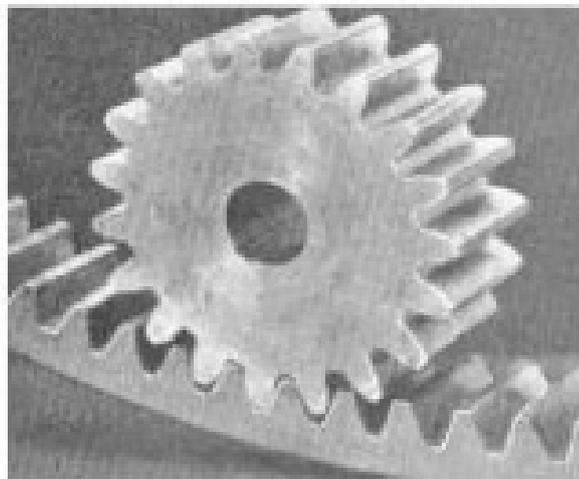
Figura 19 – Engrenagem Helicoidal Dupla



Fonte: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC025/Aulas/5-Engrenagens/5-1-Engrenagens+Lei do Engrenamento.pdf>

- Engrenagem cilíndrica de dente interno: Segundo Mott (2021) são utilizadas em sistemas com limitação de espaço ou quando tem intenção de proteger os dentes da engrenagem. Ambos apresentam o mesmo sentido de rotação, apresenta excelente relação transmissão x espaço.

Figura 20 - Engrenagem cilíndrica de dente interno



Fonte: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC025/Aulas/5-Engrenagens/5-1-Engrenagens+Lei do Engrenamento.pdf>

2.4.3 FUNCIONAMENTO DO REDUTOR

De acordo com Crittenden (2022), a distribuição de água intercepta diversos projetos desde sua fonte natural até o destino final, usualmente a água é inserida no sistema de transporte através da ação de bombas que geram força para que o fluido se movimente e crie um fluxo, capaz de conduzi-lo pelo sistema.

No fluxo, o sistema acompanha a formação territorial do local, considerando alterações de elevação, pressão, temperatura e intempéries, conforme apresentado por Crittenden (2022). Esses fatores influenciam o fluxo do sistema, portanto, ao longo das tubulações, equipamentos engenheirados e calculados para cada ambiente são posicionados para auxiliar o fluxo no sistema.

No caso de falta de pressão, bombas são instaladas para criar pressão para o fluido, um exemplo citado de bomba é a bomba volumétrica, que trabalha com engrenagens, responsáveis por deslocar fluidos positivamente, conforme explicado por Baptista (2016). Em contrapartida, a alta pressão dentro de um sistema também o torna obsoleto, para manter o sistema funcionando de forma a reduzir falhas, os redutores de pressão são inseridos para reduzir tal pressão.

Os redutores de pressão são inseridos no sistema como as bombas, inseridos junto as tubulações flangeadas e devidamente vedadas, permitindo que o fluido atravesse a carcaça do redutor e sofra com a movimentação de seus componentes. A movimentação do fluido no interior de um redutor por engrenagens, como estudado neste trabalho, trabalhará de forma oposta à bomba volumétrica, as engrenagens do redutor se movimentarão de forma contrária ao fluxo, através de dispositivos elétricos, gerando a perda de carga no fluido, fazendo com que a passagem do fluido será reduzida na saída do redutor e conseqüentemente a pressão no sistema se reduzirá, comparada a pressão encontrada na entrada do redutor, segundo Baptista (2016). Para que o sistema funcione de forma correta, alguns critérios devem ser considerados para montagem, instalação, testes e sensores.

3. METODOLOGIA

Para desenvolvimento e estudo do trabalho foram elaborados os modelos 3D a partir do *software* Inventor (2024), com intuito de simular o sistema hidráulico com aplicação do regulador de pressão. Os componentes abordados no sistema foram:

- Tubulação (ASTM A36);
- Flanges de ligação conforme norma ABNT NBR 7675 classe PN10;
- Regulador de pressão e manômetro;
- Vedação entre regulador e acionamento;
- Acionamento das engrenagens do regulador;

Os componentes de acionamento do regulador não foram especificados especialmente para o sistema, considerando que os mesmos dependem de uma especificação do fornecedor.

As dimensões do sistema como um todo, foram adotadas para aplicação em cálculos e conclusões do funcionamento do sistema, considerando normas de flanges e espessuras de chapas comerciais.

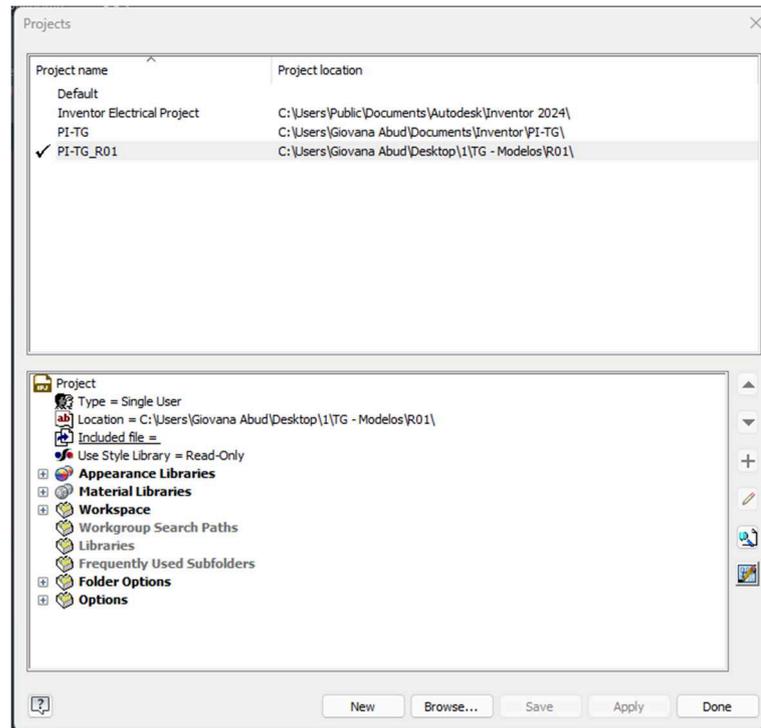
3.1 TUBULAÇÃO

3.1.1 TUBULAÇÃO PRINCIPAL

A tubulação do sistema principal foi projetada para um sistema DN400 PN10 com espessura das paredes de 8mm.

Para início do projeto, foi criado um ambiente de trabalho do *software*, que se compara como uma pasta de trabalho no formato “.IPJ” conforme ilustrado na figura 21.

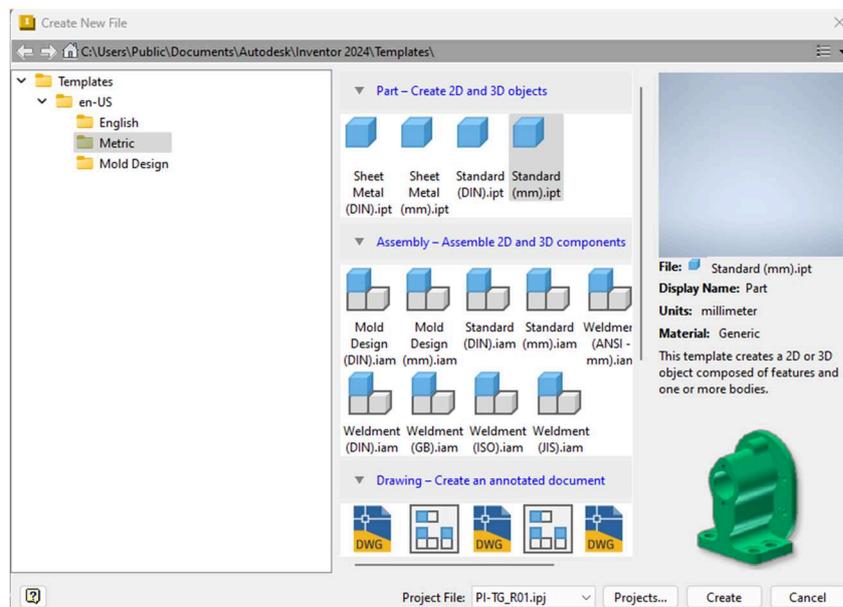
Figura 21 - Ambiente de trabalho Inventor



Fonte: Próprio autor.

Dentro desse ambiente de trabalho, foram selecionados os formatos para os modelos, utilizando o sistema de medidas em milímetros (*Standard – mm*), conforme figura 22.

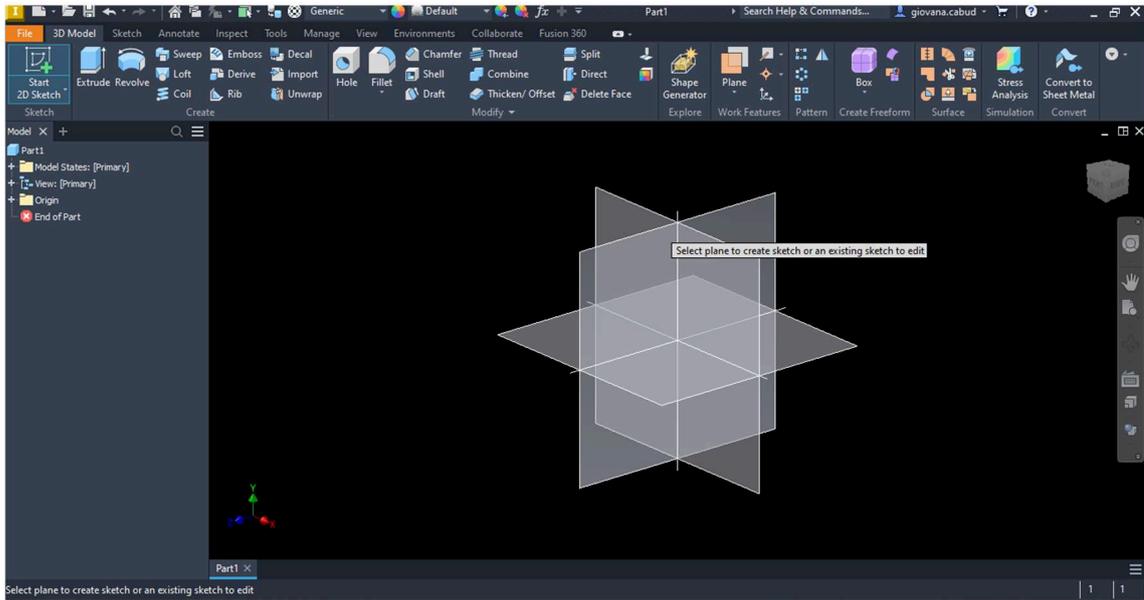
Figura 22 - Formatos Inventor



Fonte: Próprio autor

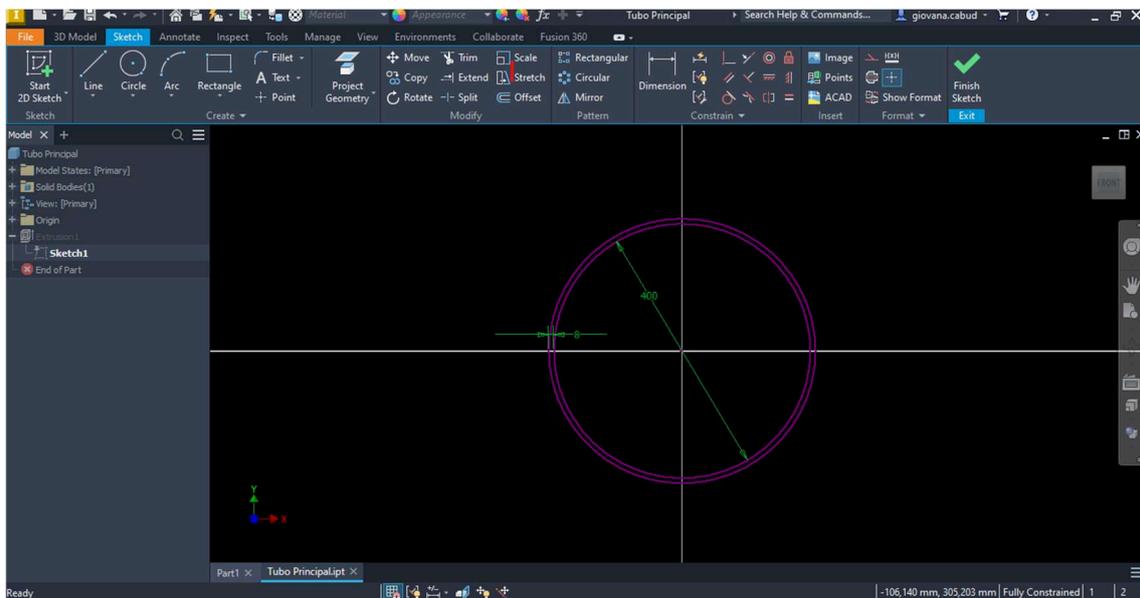
Dentro do modelo *Standard* – mm, foi criada uma *sketch* 2D com as cotas principais do modelo a ser criado, conforme figuras 23 e 24.

Figura 23 - Plano de criação da *sketch*



Fonte: Próprio autor

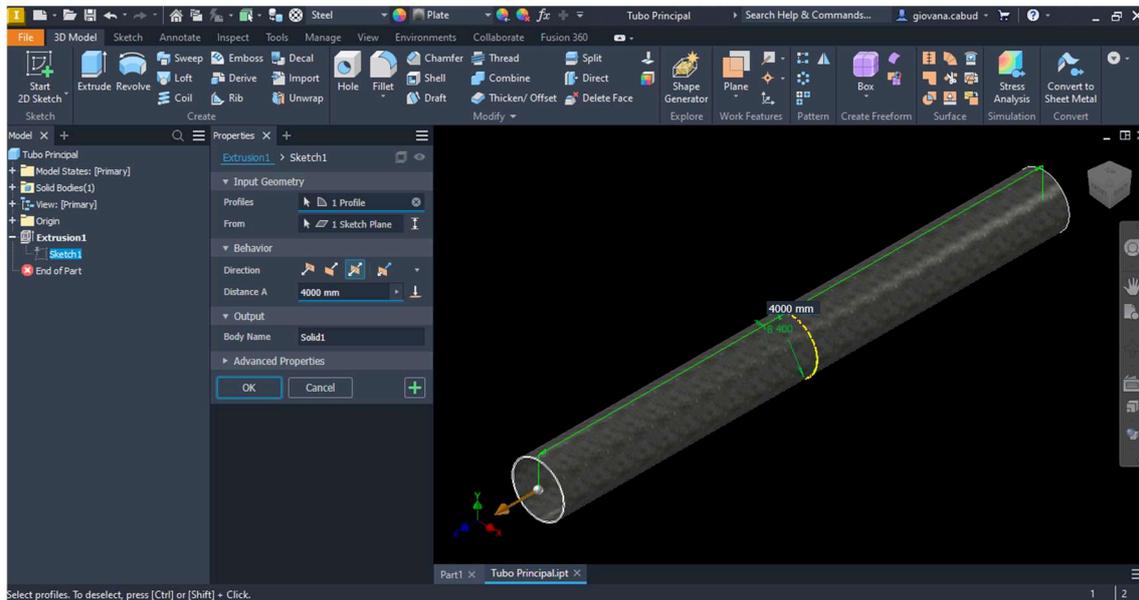
Figura 24 - *Sketch* 2D



Fonte: Próprio autor

Após definição do diâmetro da tubulação e sua espessura, para transformar a *sketch* 2D em um modelo 3D, o comando *Extrude* foi usado, colocando o comprimento da peça, conforme figura 25:

Figura 25 - Comando *Extrude*



Fonte: Próprio autor.

Utilizando as ferramentas do *software*, podemos conferir ou alterar as dimensões do modelo de forma automática, sem precisar editar as *sketches* de forma separada, através da tela de parâmetros do modelo, conforme figura 26.

Figura 26 - Parâmetros do modelo

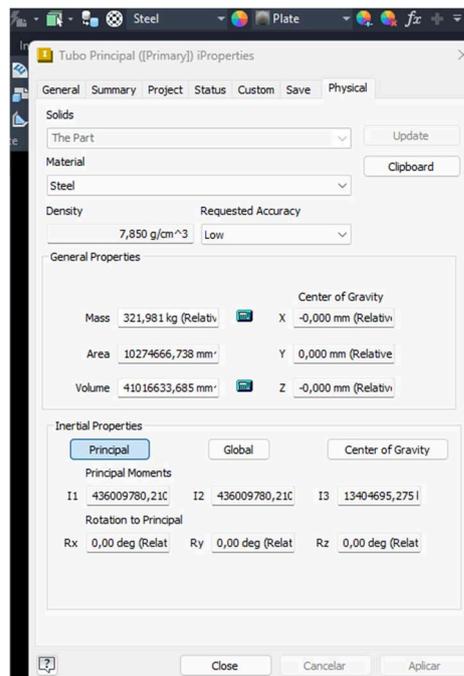
Parameter Name	Consumed by	Unit/Type	Equation	Nominal Value	Toleran	Model Value	Key		Comment
Model Parameters									
DN	Sketch1	mm	400 mm	400,000000	<De	400,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Esp	Sketch1	mm	8 mm	8,000000	<De	8,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Comprimento	Extrusion 1	mm	4000 mm	4000,000000	<De	4000,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d3	Extrusion 1	deg	0,00 deg	0,000000	<De	0,000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
User Parameters									

Immediate Update

Fonte: Próprio autor

Para finalizar o modelo, a escolha do material foi determinada através da biblioteca do *software*, colocando as propriedades do material escolhido e a aparência do mesmo de acordo com as definições do Aço ASTM A36, conforme figura 27.

Figura 27 - Material do modelo



Fonte: Próprio autor

Com a tubulação principal do sistema definida, a elaboração da tubulação secundária foi iniciada, seguindo os passos iniciais da tubulação principal, alterando os comandos executados.

3.1.2 TUBULAÇÃO SECUNDÁRIA

A criação do modelo da tubulação secundária, seguiu os passos da principal, com criação do formato, *sketches*, entretanto sofreu uma alteração de comando, o comando responsável por transformá-la em um modelo 3d foi o *Sweep*.

Através desse comando a face do tubo foi desenvolvida em um primeiro *sketch* e o percurso pelo qual o tubo iria percorrer feito por um eixo em *sketches* com diferentes planos, o comando então, seleciona a face do tubo e cria o 3d de acordo com o eixo definido, conforme figura 28.

Figura 28 - Comando Sweep



Fonte: Próprio autor.

3.2 FLANGES

Os flanges foram modelados com as informações da norma ABNT NBR 7675 (1988) que define as dimensões ideais para cada DN de tubulação e também define as dimensões baseadas na pressão. As dimensões adotadas foram escolhidas para atender as dimensões de um flange DN400 PN10.

As dimensões previstas pela norma são conforme tabela 1.

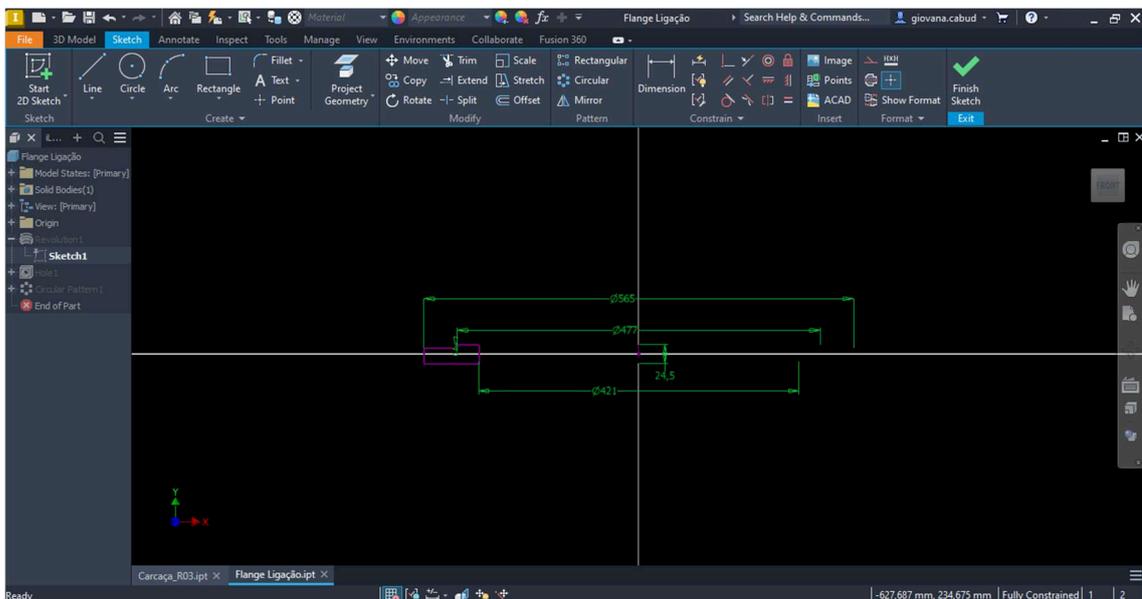
Tabela 1 - Dimensões Flange

DN	D	C	g	a	b	c	s	Qf	d	Dp	M
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	n	mm	mm	kg
400	565	515	477	24,5	20,5	4	19,5	16	28	24	16,3

Fonte: Próprio autor.

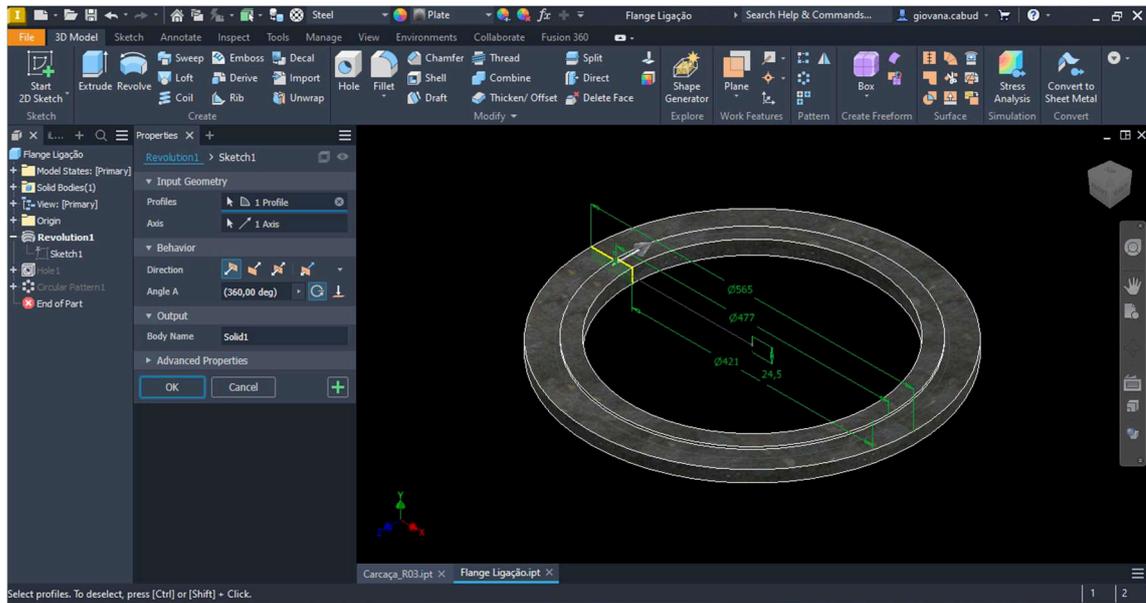
Para desenvolvimento do modelo, foi criado novamente um formato Standard (mm) e iniciada um *sketch* 2d, entretanto, o comando *Revolve* foi utilizado para transformar a *sketch* 2d em um 3d, conforme mostrado na figura 29 e 30.

Figura 29 - Sketch 2D flange



Fonte: Próprio autor

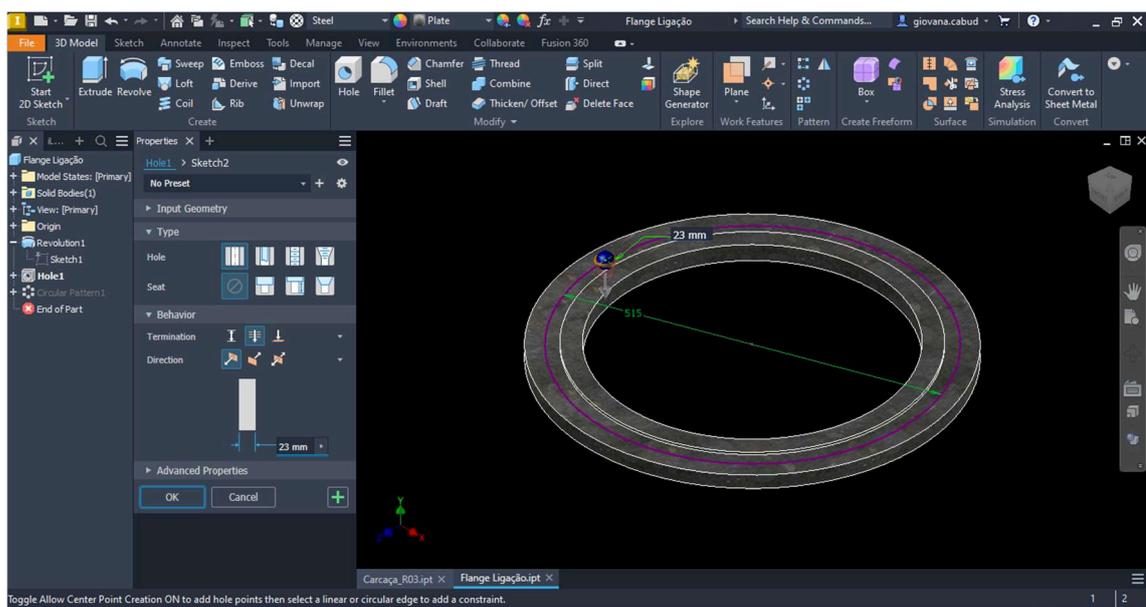
Figura 30 - Comando Revolve



Fonte: Próprio autor

Após o comando *revolve*, outro *sketch 2d* foi criada para realizar os furos dos parafusos que iram fixar o flange no regulador de pressão, o comando *Hole* foi utilizado para realizar o processo, conforme figura 31.

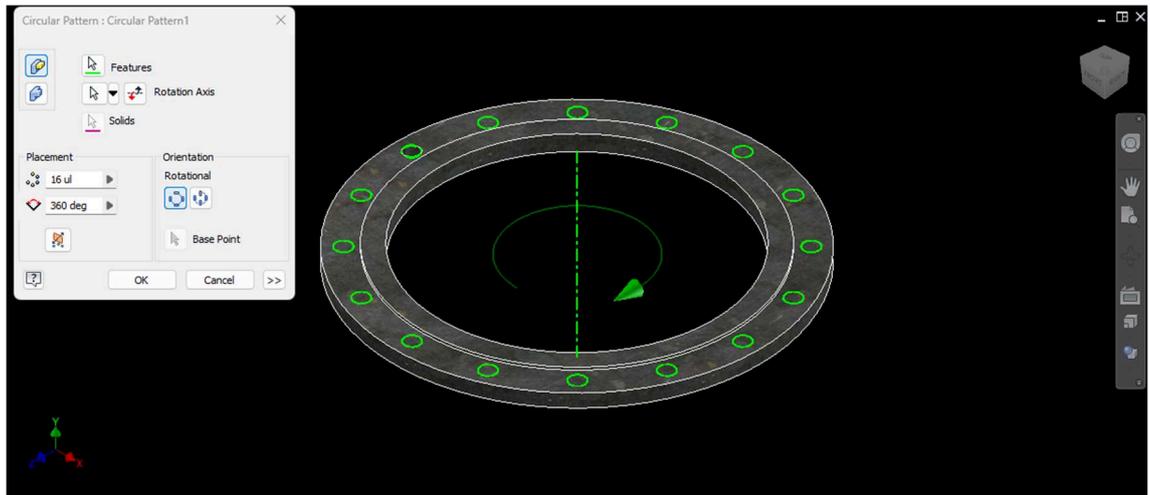
Figura 31 - Comando Hole



Fonte: Próprio autor

Para finalizar o modelo do flange, o comando *Pattern* foi utilizado, com intuito de transformar um furo em um padrão sequencial de 16 furos, conforme solicitado por norma, ilustrado na figura 32.

Figura 32 - Comando Pattern



Fonte: Próprio autor.

As dimensões foram salvas na aba *Parameters* e apresentam as dimensões conforme norma.

Figura 33 - Parâmetros utilizados nos flanges

Parameter Name	Consumed by	Unit/Type	Equation	Nominal Value	Toleran	Model Value	Key		Comment
Model Parameters									
D	Sketch1	mm	565 mm	565,000000	<De	565,000000			
g_	Sketch1	mm	477 mm	477,000000	<De	477,000000			
a	Sketch1	mm	24,5 mm	24,500000	<De	24,500000			
c_	Sketch1	mm	4 mm	4,000000	<De	4,000000			
x	Sketch1	mm	421 mm	421,000000	<De	421,000000			
C_	Sketch2	mm	515 mm	515,000000	<De	515,000000			
d	Hole1	mm	28 mm	28,000000	<De	28,000000			
Qf	Circular Pat...	ul	16 ul	16,000000	<De	16,000000			
d15	Circular Pat...	deg	360 deg	360,000000	<De	360,000000			
User Parameters									

Fonte: Próprio autor.

3.3 REGULADOR DE PRESSÃO

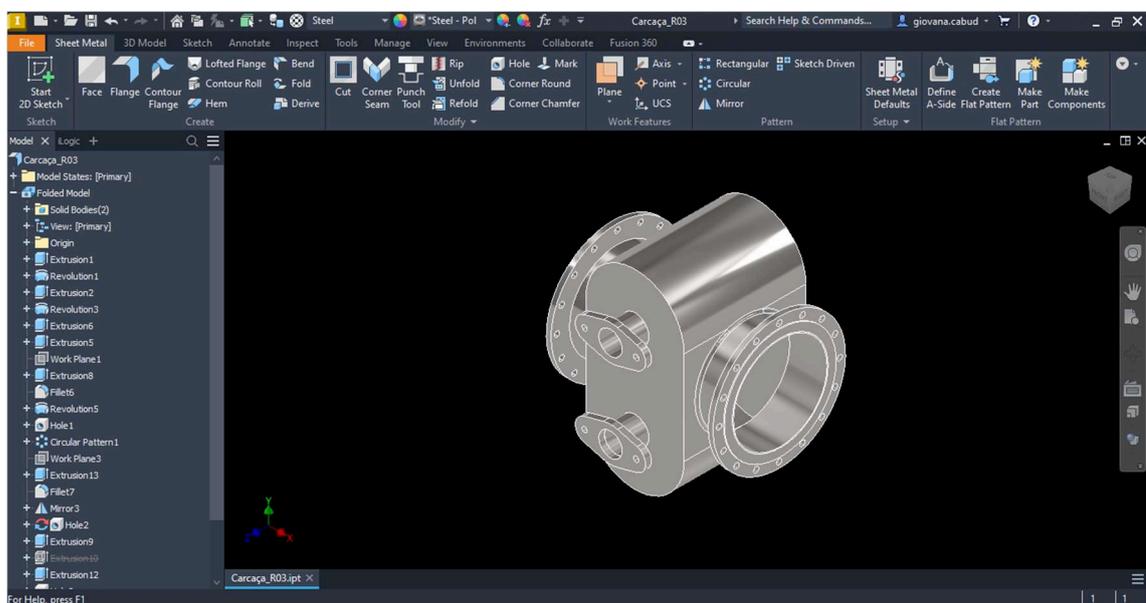
O modelo do regulador de pressão, ilustrado à figura 34, foi elaborado em duas partes distintas no formato “.ipt”, partes essas unidas através de uma montagem no formato “iam” com auxílio de restrições de fixação. O modelo do redutor divide-se em:

- Carcaça
- Sistema Engrenagens

3.3.1 CARCAÇA

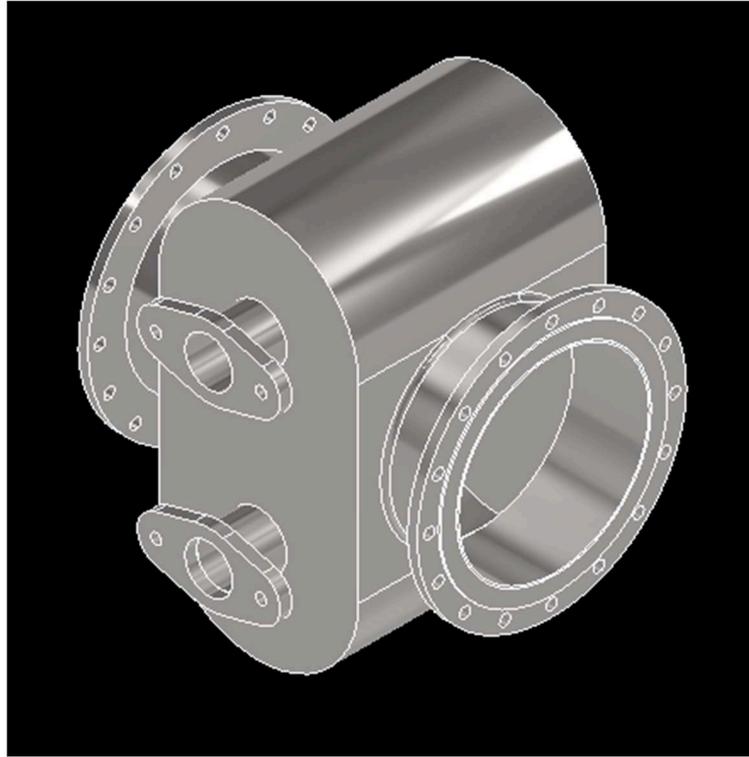
O modelo do corpo do regulador de pressão foi elaborado utilizando as ferramentas mencionadas do *software*, considerando a entrada e saída do corpo com flanges para ligação com as tubulações, considerando também o espaço e a geometria necessária para o encaixe das engrenagens em seu interior.

Figura 34 - Vista do regulador 3D



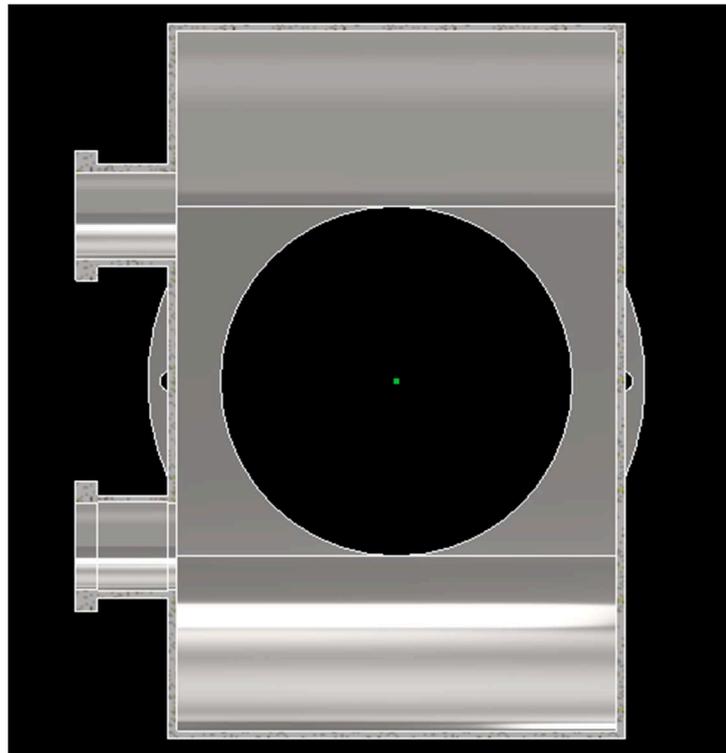
Fonte: Próprio autor.

Figura 35 - Vista do regulador



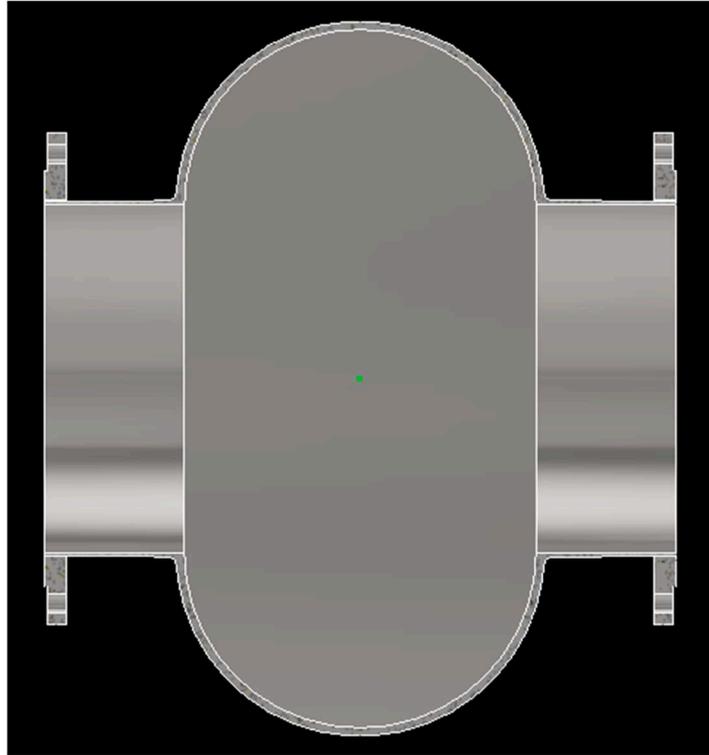
Fonte: Próprio autor.

Figura 36 – Vista em corte no plano X



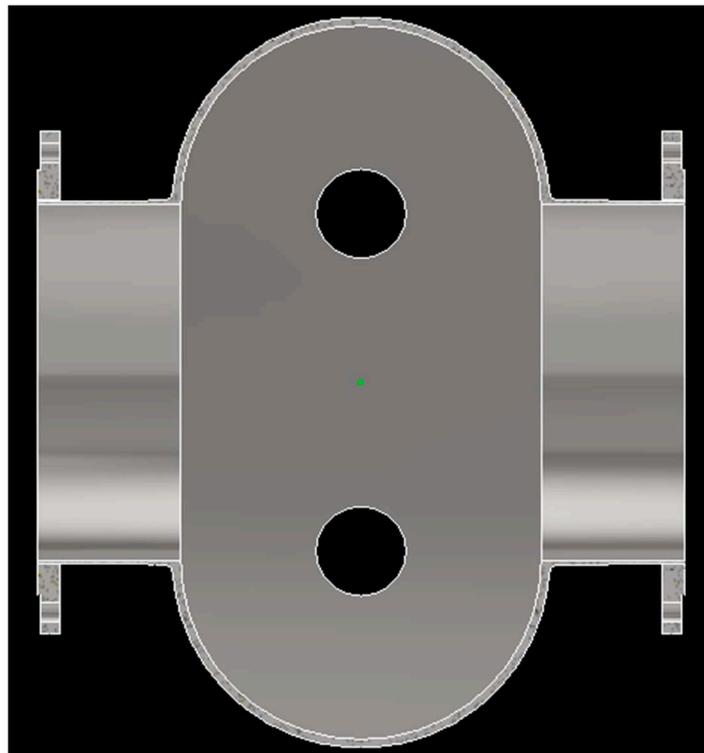
Fonte: Próprio autor.

Figura 37 - Vista em corte no plano Z



Fonte: Próprio autor.

Figura 38 - Vista em corte no plano Z



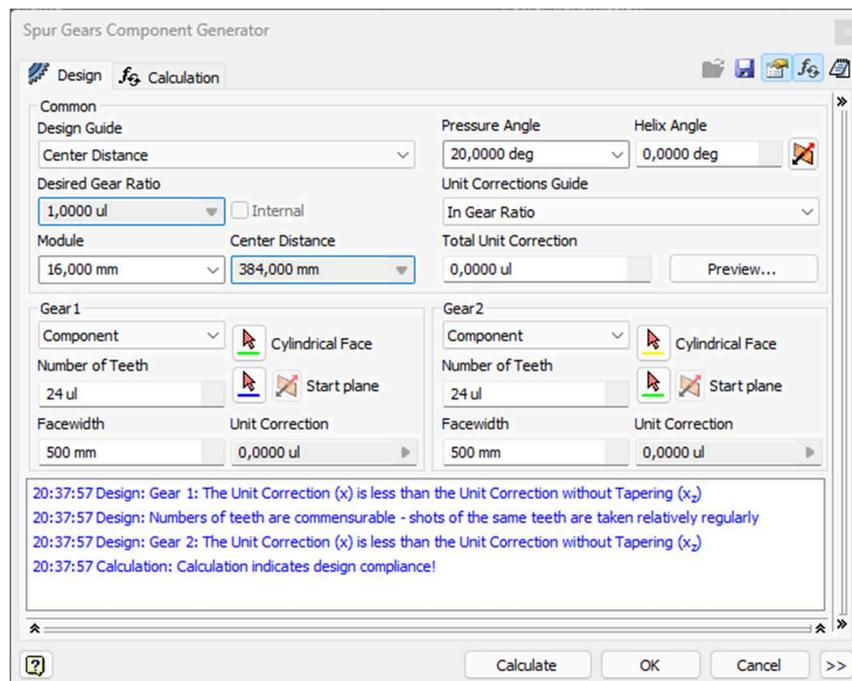
Fonte: Próprio autor.

3.3.2 SISTEMA DE ENGRENAGENS

3.3.2.1 ENGRENAGENS RETAS

Para desenvolvimento do modelo das engrenagens retas, o *software* Inventor Professional (2024) permite que engrenagens sejam criadas a partir de cálculos automáticos, o comando é chamado *Spur Gear* que solicita os dados de entrada conforme figura 39.

Figura 39 - Comando Spur Gear



Fonte: Próprio autor

Após preencher os dados de entrada, o *software* elabora os cálculos necessários para dimensionamento, rotação e encaixe das engrenagens, demonstrado na figura 40.

Figura 40 - Cálculos Engrenagem

Spur Gears Component Generator

Design **Calculation**

Method of Strength Calculation
ISO 6336:1996

Loads

	Gear 1	Gear 2
Power	P 1,000 kW	0,980 kW
Speed	n 1000,00 rpm	1000,00 rpm
Torque	T 9,549 N m	9,358 N m
Efficiency	η 0,980 ul	

Material Values

Gear 1 User material

Gear 2 User material

Bending Fatigue Limit	σ_{Flim} 352,0 MPa	352,0 MPa
Contact Fatigue Limit	σ_{Hlim} 1140,0 MPa	1140,0 MPa
Modulus of Elasticity	E 206000 MPa	206000 MPa
Poisson's Ratio	μ 0,300 ul	0,300 ul
Heat Treatment	2 ul	2 ul

Required Life L_h 10000 hr

Factors Accuracy

Calculate OK Cancel >>

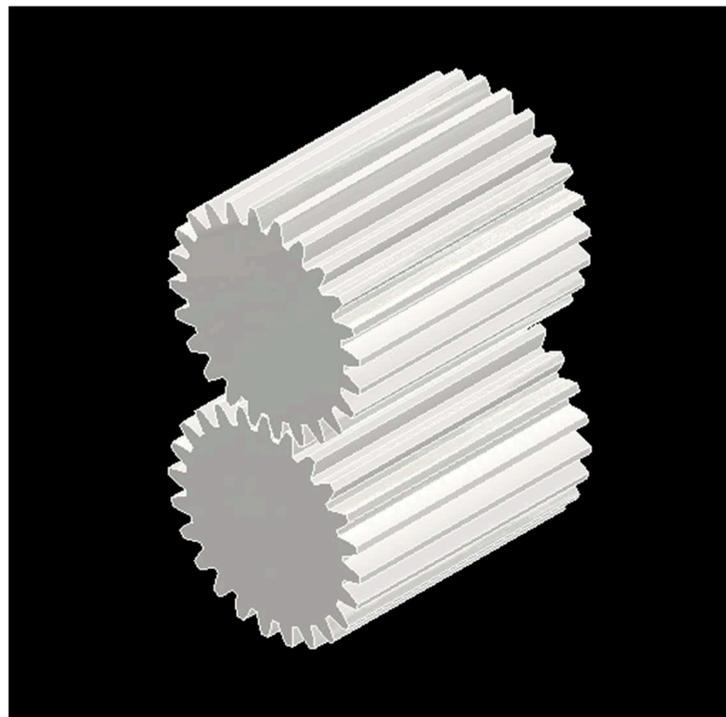
Results

F_t	49,736 N
F_r	18,102 N
F_a	0,000 N
F_n	52,928 N
v	20,106 mps
n_{E1}	3531,047 rpm
Gear 1	
S_H	19,435 ul
S_F	703,710 ul
S_{Hst}	16,470 ul
S_{Fst}	1649,426 ul
Gear 2	
S_H	19,435 ul
S_F	703,710 ul
S_{Hst}	16,470 ul
S_{Fst}	1649,426 ul

Fonte: Próprio autor

Caso o comando não apresente erros com os dados de entrada, o modelo é elaborado de forma automática conforme figura 41.

Figura 41 - Modelo 3D das engrenagens



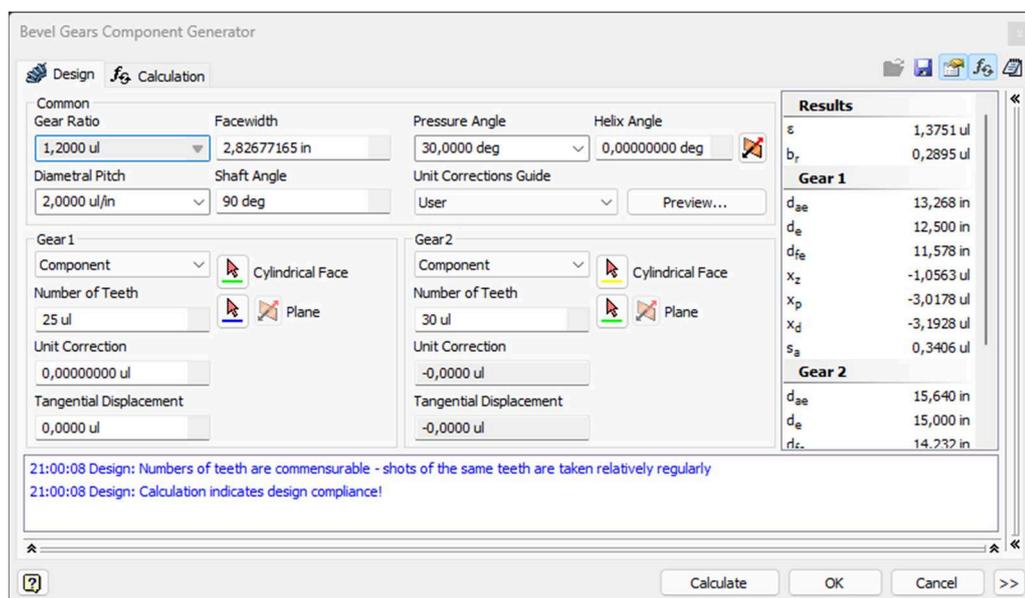
Fonte: Próprio autor

Para que o sistema de engrenagens ficasse completo, a elaboração de engrenagens cônicas para conexão com o acionamento foi elaborada seguindo a mesma sequência de comandos.

3.3.2.2 ENGRENAGENS CÔNICAS

O *software* permite a elaboração de engrenagens cônicas com o comando *Bevel Gear*, que solicita as informações de entrada conforme figura 42.

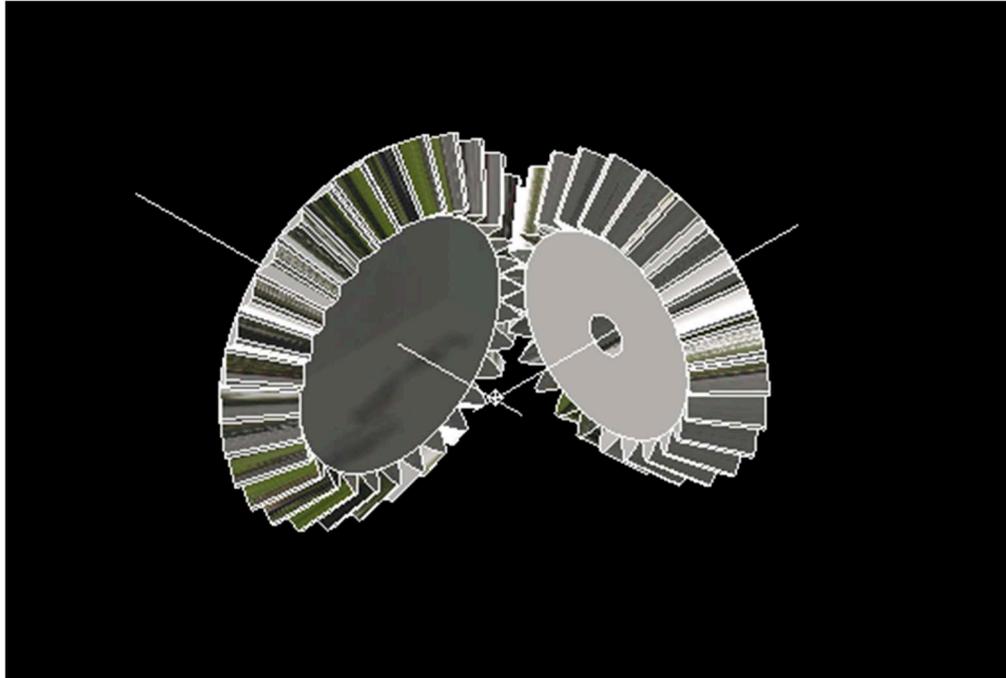
Figura 42 - Comando *Bevel Gear*



Fonte: Próprio autor.

Com os dados de entrada o modelo das engrenagens é elaborado, seguindo as condições de encaixe, geometria e rotação conforme figura 43.

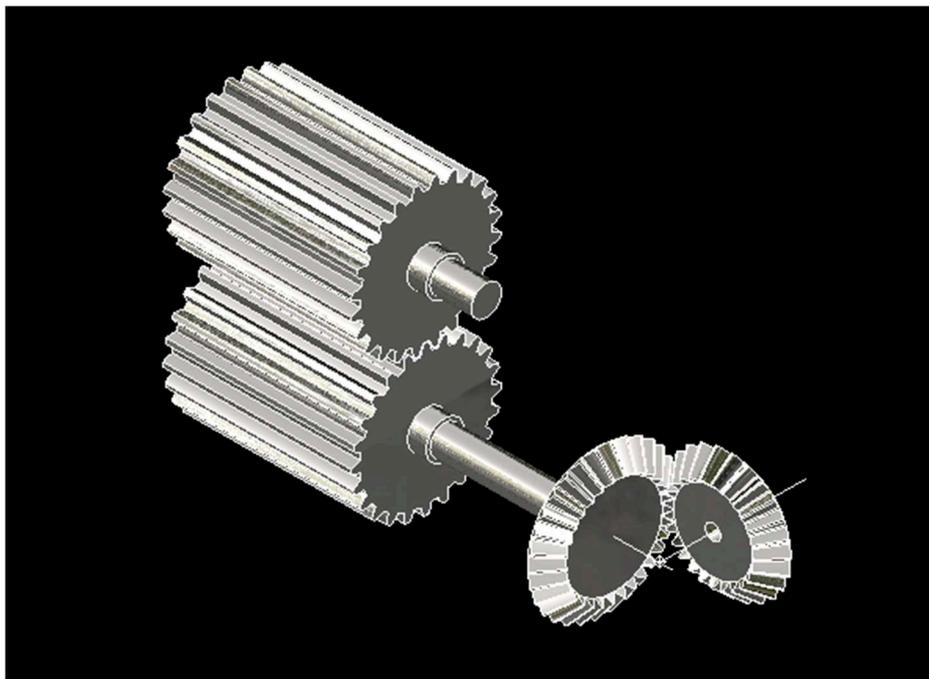
Figura 43 - Modelo 3D engrenagem cônica



Fonte: Próprio autor.

Para conectar as duas engrenagens, um eixo foi acoplado em uma extremidade à engrenagem reta e a outra à engrenagem cônica, alcançando o modelo final ilustrado na figura 44.

Figura 44 - Montagem 3D das engrenagens



Fonte: Próprio autor.

3.3.3 MANÔMETRO

O modelo do manômetro, ilustrado na figura 45, foi retirado de um catálogo de fornecedor para ser aplicado no início da tubulação principal e também no final da tubulação, após a saída do regulador de pressão, para que o mesmo faça a medida da pressão e comprove sua redução no sistema principal.

Figura 45 - Modelo 3D do manômetro



Fonte: Próprio autor.

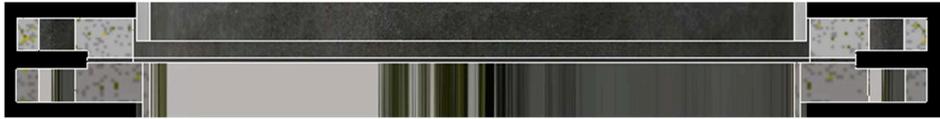
3.4 VEDAÇÃO

O modelo de vedação elaborado teve como objetivo vedar a conexão regulador de pressão-tubulação e também a saída do regulador de pressão com o eixo das engrenagens, foram elaboradas dividindo-as conforme indicadas abaixo:

- Junta de vedação
- Gaxetas
- Preme da gaxeta

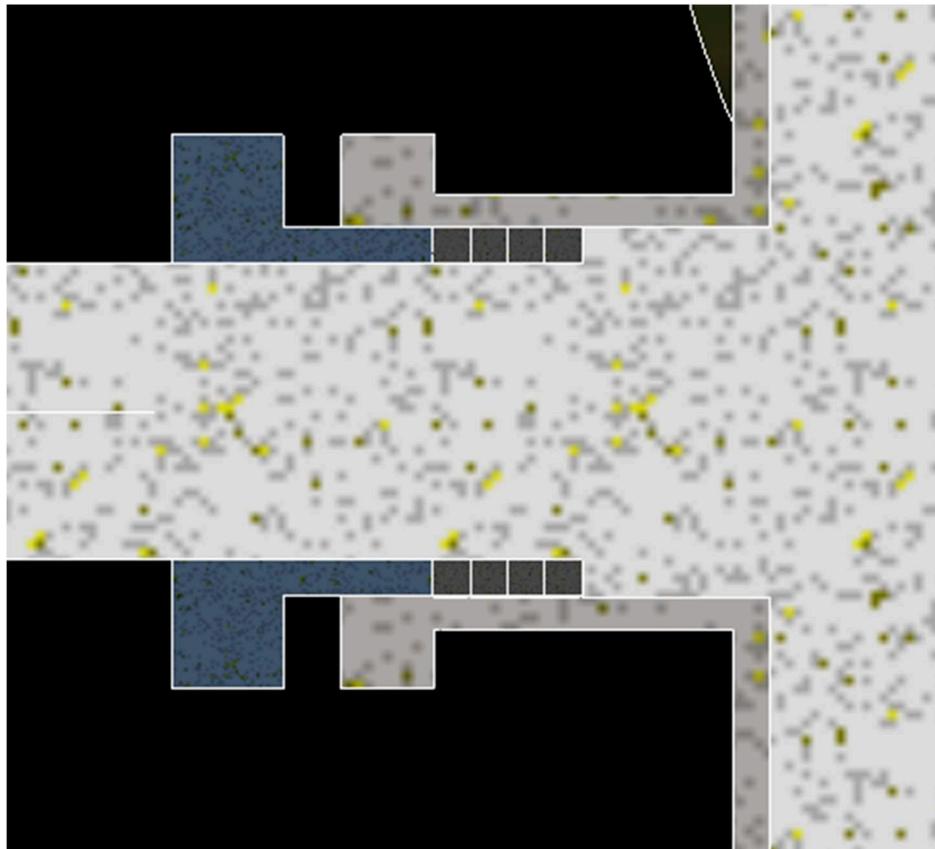
A junta de vedação obedeceu às dimensões dos flanges para ser montada corretamente, assim como as gaxetas e o preme da gaxeta, projetados para garantir a vedação da carcaça com o eixo das engrenagens.

Figura 46- Modelo 3D da Junta de vedação



Fonte: Próprio autor.

Figura 47 – Modelos 3D das gaxetas e preme da gaxeta

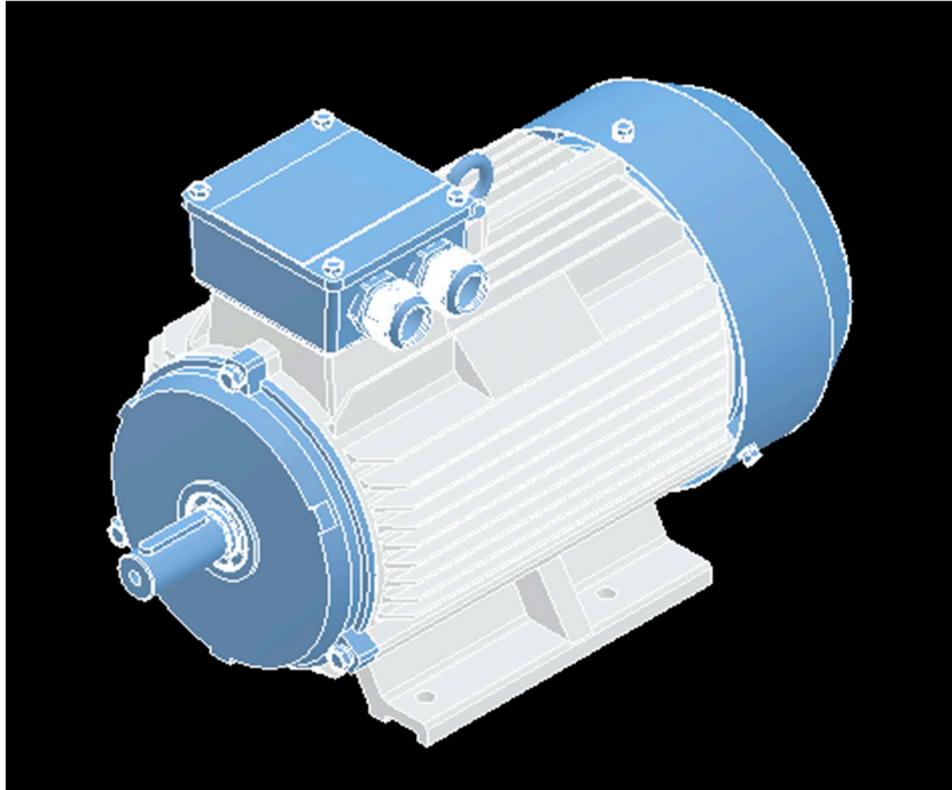


Fonte: Próprio autor.

3.5 SISTEMA DE ACIONAMENTO

O sistema de acionamento foi projetado juntamente com as engrenagens cônicas, unindo-as a um motor. O motor foi obtido através de um modelo padrão conforme figura 48.

Figura 48 - Modelo 3D do motor

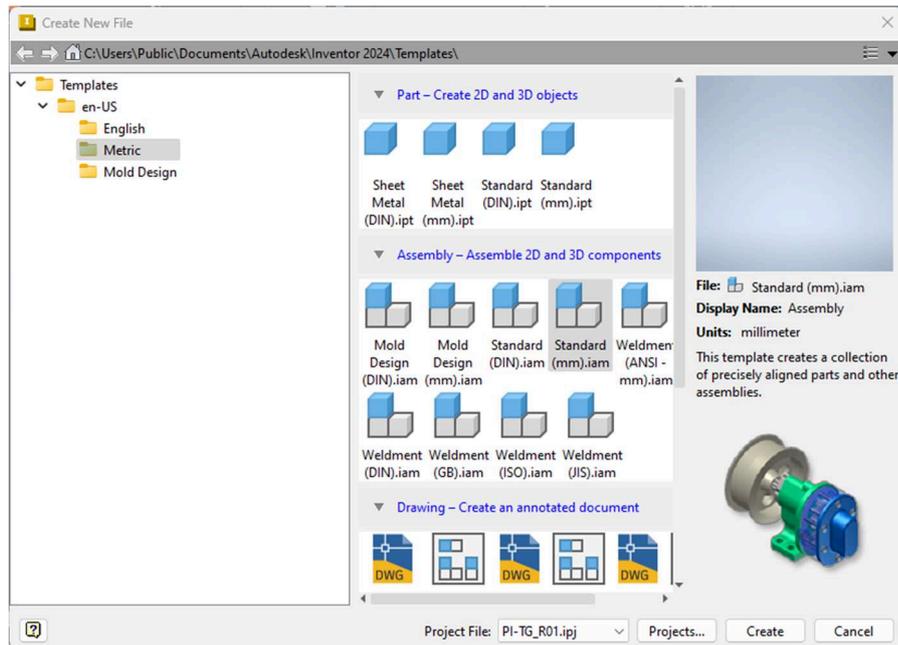


Fonte: Próprio autor.

3.6 SISTEMA COMPLETO

O sistema completo foi elaborado através do formato *Standard* (mm) “.iam”, montagem do *software* que permite a junção de todos os modelos criados nos formatos “.ipt” e “.iam” em uma só montagem “.iam”. Os modelos são unidos através de restrições denominadas de *Constrains* que permitem travar cada elemento na posição correta.

Figura 49 - Ambiente de trabalho para montagens



Fonte: Próprio autor.

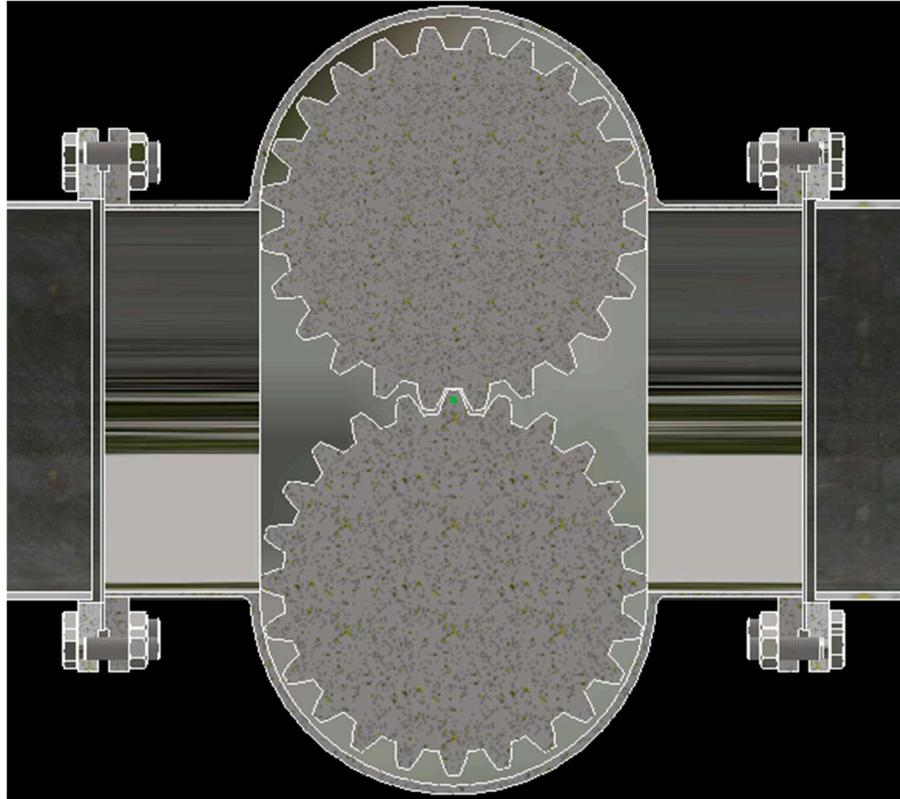
Figura 50 - Modelo 3D do sistema completo



Fonte: Próprio autor.

Dentro da Implantação do sistema, as engrenagens foram posicionadas dentro da carcaça do regulador de pressão e seus eixos encaixados na furação correspondente, as gaxetas foram montadas na posição e prensadas com a prensa da gaxeta.

Figura 51 - montagem 3D do regulador de pressão



Fonte: Próprio autor.

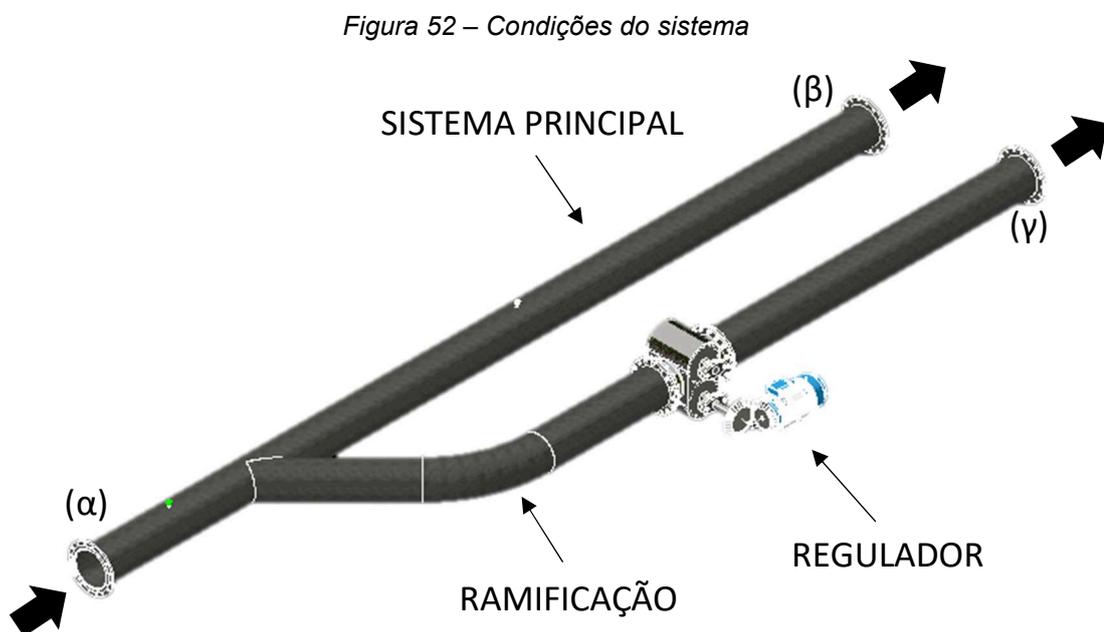
As engrenagens retas, conforme ilustradas na figura 51, foram unidas ao eixo que se conectou as engrenagens cônicas e ao motor. O regulador de pressão foi colocado na tubulação secundária, mantendo a tubulação principal livre e diminuindo a pressão na mesma. A tubulação secundária age então como um desvio do fluxo principal, diminuindo sua pressão através da perda de carga do sistema secundário.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise realizada através do estudo teve como objetivo a criação de um mecanismo ativo para obtenção de diferentes pressões no sistema, trabalhando com a rugosidade do material, aplicação de uma ramificação e a inclusão de um regulador de pressão ativo, para isso, cálculos foram realizados para comparar as pressões de saída sem a ramificação e com a ramificação colocando o regulador em sua sequência, além disso, tinha-se o objetivo de controlar a pressão do sistema.

Como forma de organizar os cálculos, o sistema foi dividido em três condições, a condição inicial considerando somente a tubulação principal (α) e (β), a segunda incluindo a ramificação (α), (β) e (γ) para definição da vazão e a terceira (α), (β) e (γ) considerando a rotação do regulador para controle da pressão de saída do sistema principal (α) e (β).

As três condições permitiram criar três pontos de referência para análise do sistema e desenvolvimento dos cálculos, conforme ilustrado na figura 52.



Fonte: Próprio autor.

4.1 PRIMEIRA CONDIÇÃO

A primeira condição considera um tubo de aço comercial DN400 com comprimento de 10 m, sem ramificações e com pressão no ponto de entrada de 10 bar. Com essas informações foi possível calcular a pressão na saída desse tubo, a partir da equação abaixo:

$$\frac{P_{\alpha}}{\rho} + \frac{v_{\alpha}^2}{2} + gZ_{\alpha} = \frac{P_{\beta}}{\rho} + \frac{v_{\beta}^2}{2} + gZ_{\beta} + \frac{\Delta_p}{\rho} \quad (2)$$

Onde cada variável representa a seguinte informação:

P_{α} = Pressão na entrada do sistema [Pa]

P_{β} = Pressão na saída do sistema [Pa]

ρ = massa específica da água [kg/m^3]

$v_{\alpha} = v_{\beta}$ = velocidade do fluido [m/s]

g = aceleração da gravidade [m/s^2]

$Z_{\alpha} = Z_{\beta}$ = altura do fluxo até o ponto de referência [m]

Δ_p = Perda de carga do sistema [Pa]

Considerando a pressão de entrada de 10 bar, as velocidades v_{α} e v_{β} e as alturas Z_{α} e Z_{β} iguais na entrada e saída do sistema, é possível simplificar a equação até obter a equação abaixo:

$$P_{\alpha} = P_{\beta} + \Delta_p \quad (3)$$

Para cálculo da perda de carga proveniente pelo material da tubulação, a seguinte equação foi realizada:

$$\Delta_p = \left(f * \frac{L}{D} \right) * \left(\frac{v^2}{2} \right) * \rho \quad (4)$$

Onde cada variável representa a seguinte informação:

f = coeficiente de atrito

$L = \text{comprimento da tubulação [m]}$

$D = \text{diâmetro da tubulação [m]}$

$v = \text{velocidade do fluido [m/s}^2]$

Para eliminar as variáveis desconhecidas, calcularemos o coeficiente de atrito seguindo sua fórmula e considerando os valores constantes para um material de aço carbono comercial e o fluido de água, através da fórmula abaixo:

$$f = \left(\frac{1}{1,14 + 2 \log \left(\frac{D}{e} \right) - 2 \log \left[1 + \frac{9,3}{R_e * \frac{e}{D} * \sqrt{f}} \right]} \right)^2 \quad (5)$$

Onde cada variável representa a seguinte informação:

$e = \text{rugosidade [m]}$

$R_e = \text{Número de Reynolds}$

A variável desconhecida nesse caso, número de Reynolds foi calculado através da seguinte fórmula:

$$R_e = \frac{v * D * \rho}{\mu} \quad (6)$$

Onde cada variável representa a seguinte informação:

$\mu = \text{massa específica do fluido [Pa]}$

Resolvendo as equações apresentadas obtivemos os seguintes resultados:

- Número de Reynolds: Inserindo os valores na equação (6)

$$R_e = \frac{2 * 0,4 * 1000}{0,001}$$

$$R_e = 800.000$$

- Coeficiente de atrito: Inserindo os valores na equação (5)

$$f = \left(\frac{1}{1,14 + 2 \log \left(\frac{0,4}{0,000046} \right) - 2 \log \left[1 + \frac{9,3}{800000 * \frac{0,000046}{0,4} * \sqrt{0,02}} \right]} \right)^2$$

Para alcançar uma certa exatidão para o valor do coeficiente, o primeiro valor de f na fórmula foi de 0,02 até atingir o valor consistente apresentado abaixo.

$$f = 0,003731$$

- Perda de carga: Inserindo os valores na equação (4)

$$\Delta_p = \left(0,003731 * \frac{10}{0,4} \right) * \left(\frac{2^2}{2} \right) * 1000$$

$$\Delta_p = 186,5612 \text{ Pa}$$

- Cálculo da pressão de saída: Inserindo os valores na equação (3)

$$1 * 10^6 = P_\beta + 186,5612$$

$$P_\beta = 999813,4 \text{ Pa} = 9,99 \text{ bar}$$

Com esse resultado, podemos concluir que a pressão no sistema se mantém praticamente a mesma na entrada (α) e na saída (β), como forma de reduzir a pressão na saída (β), a ramificação com o regulador de pressão foi instalada, iniciando a segunda condição para cálculo.

4.2 SEGUNDA CONDIÇÃO

Para a segunda condição, utilizamos os três pontos de referência, a entrada (α) do sistema, a saída do sistema principal (β) e também a saída da ramificação (γ) após o regulador de pressão. Para definirmos a nova pressão de saída do sistema principal (β), iremos calcular a vazão nesses três pontos.

Para esses cálculos, foram considerados os seguintes dados de entrada, rotação do regulador de pressão de 10 rpm, área interna de sua carcaça de 3 m^2 e uma espessura de $0,5 \text{ m}$ e também uma vazão de entrada (α) do sistema de $3 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$Vol = A * Esp \quad (7)$$

$$Vol = 3 * 0,5 = 1,5 \text{ m}^3$$

Onde cada variável representa a seguinte informação:

$$Vol = \text{volume} [\text{m}^3]$$

$$A = \text{área} [\text{m}^2]$$

$$Esp = \text{espessura} [\text{m}]$$

Considerando que o regulador transporte $1,5 \text{ m}^3$ de água de um lado para o outro em 1 minuto e convertendo as unidades de medida aplica-la na fórmula, teremos uma rotação [ω] de $1,0472 \text{ rad/s}$.

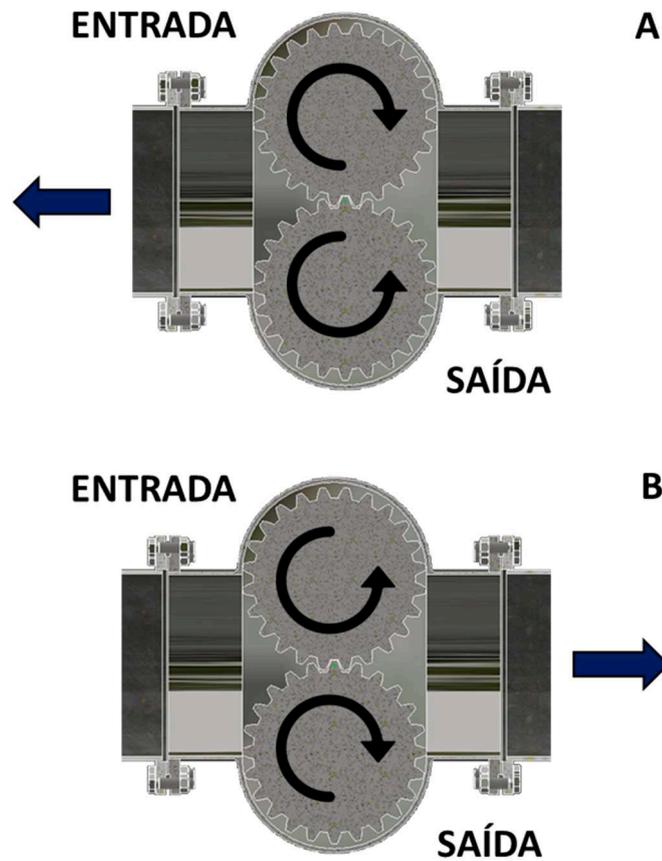
$$Q_\gamma = \omega * Vol \quad (8)$$

$$Q_\gamma = 1,0472 * 1,5$$

$$Q_\gamma = 1,5708 \text{ m}^3/\text{s}$$

Com o resultado da vazão na saída da ramificação (γ), podemos obter a vazão no ponto de saída do sistema principal (β) de duas formas, considerando que o regulador opere no sentido do fluxo ou contra ele.

Figura 53 - Orientação de rotação do Regulador de Pressão



Fonte: Próprio autor.

Conforme ilustrado na figura 53 a entrada e saída do fluido ocorrem da esquerda para a direita, entretanto temos duas condições:

- Condição A: Engrenagens rotacionando no sentido oposto ao fluido que gera um contrafluxo na entrada e um aumento da vazão em β .

$$Q_{\beta} = Q_{\alpha} + Q_{\gamma} = 3 + 1,5708 = 4,5708 \text{ m}^3/\text{s} \quad (9)$$

- Condição B: Engrenagens rotacionando no sentido a favor do fluido, que gera uma redução de vazão em β .

$$Q_{\beta} = Q_{\alpha} - Q_{\gamma} = 3 - 1,5708 = 1,4292 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10)$$

4.3 TERCEIRA CONDIÇÃO

Para finalizar esta nova condição e definir uma nova pressão na saída do sistema principal (β) com a ramificação e o regulador de pressão instalado, adotamos as vazões calculadas para definir as novas velocidades do sistema, conforme equação:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (11)$$

Considerando a área da tubulação obtemos o seguinte valor:

$$A_{tub} = \pi * r^2 = \pi * 0,2^2 = 0,12566 \text{ m}^2 \quad (12)$$

Aplicando os valores de área e vazão na equação (11) foi possível estabelecer os valores das velocidades: inicial (v_α) e final (v_β) nas duas condições apresentadas:

$$v_\alpha = \frac{3}{0,12566} = 23,87 \text{ m/s}$$

- Condição A – Figura 54: Inserindo os valores na equação (11)

$$v_\beta = \frac{4,5708}{0,12566} = 36,3732 \text{ m/s}$$

- Condição B – Figura 54: Inserindo os valores na equação (11)

$$v_\beta = \frac{1,4292}{0,12566} = 11,3732 \text{ m/s}$$

Através das velocidades da entrada e saída calculadas é possível obter a pressão na saída após a instalação da ramificação, considerando a perda de carga abaixo:

$$P_{perda} = \frac{V_\beta^2 * \rho}{2} * (0,4) * \left[\left(1 - \frac{v_\beta}{V_\alpha} \right)^2 \right] \quad (13)$$

$$P_{perda} = \frac{36,3732^2 * 1000}{2} * (0,4) * \left[\left(1 - \frac{36,3732}{23,8732} \right)^2 \right]$$

$$P_{perda} = 72542,38 \text{ Pa}$$

Calculando por fim, a pressão no ponto de saída do sistema principal, considerando que a perda de carga pelo material da tubulação é desprezível, obtemos os seguintes resultados:

$$\frac{P_{\alpha}}{\rho} + \frac{v_{\alpha}^2}{2} = \frac{P_{\beta}}{\rho} + \frac{v_{\beta}^2}{2} + \frac{\Delta p}{\rho} \quad (14)$$

- Condição de redução de pressão na saída (β), utilizando parâmetros da velocidade A:

$$\frac{1000000}{1000} + \frac{23,8732^2}{2} = \frac{P_{\beta}}{1000} + \frac{36,3732^2}{2} + \frac{72542,375}{1000}$$

$$P_{\beta} = 550730 \text{ Pa} = 5,51 \text{ bar}$$

- Condição para aumento da pressão na saída (β), utilizando parâmetros da velocidade B:

$$\frac{1000000}{1000} + \frac{23,8732^2}{2} = \frac{P_{\beta}}{1000} + \frac{11,3732^2}{2} + \frac{72542,375}{1000}$$

$$P_{\beta} = 1147562 \text{ Pa} = 11,48 \text{ bar}$$

4.4 CONDIÇÕES GERAIS

De forma geral, os resultados obtidos, confirmam que o projeto elaborado atende as condições desejadas, realizando a regulação de pressão conforme orientação das engrenagens do regulador e conforme a pressão de entrada (α).

Considerando que a rotação do regulador possa ser ajustada durante o funcionamento do sistema, as vazões seriam recalculadas e as pressões finais (β) teriam valores diferentes, como forma de complementar o estudo, os cálculos foram elaborados para obter variações da pressão conforme tabela a seguir:

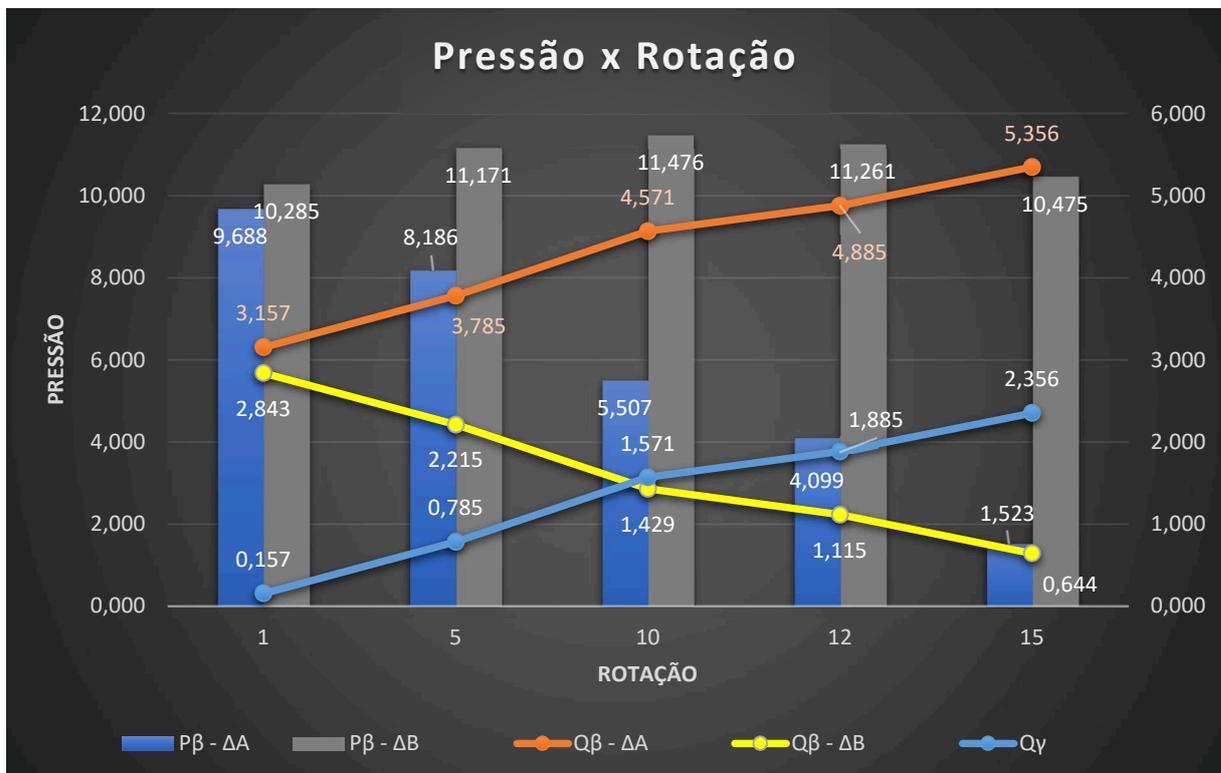
Tabela 2 - Valores de Rotação, Vazão e Pressão (variando em condição A e B).

ω [rpm]	Q_γ [m^3/s]	$Q_\beta \Delta A$ [m^3/s]	$Q_\beta \Delta B$ [m^3/s]	$P\beta - \Delta A$ [bar]	$P\beta - \Delta B$ [bar]
1	0,157	3,157	2,843	9,688	10,285
5	0,785	3,785	2,215	8,186	11,171
10	1,571	4,571	1,429	5,507	11,476
12	1,885	4,885	1,115	4,099	11,261
15	2,356	5,356	0,644	1,523	10,475

Fonte: Próprio autor.

Através das informações encontradas na tabela, foi possível elaborar um gráfico “Pressão x Rotação” com as informações de vazão do regulador, as vazões calculadas na saída do sistema com intuito de aumentá-la ou reduzi-la e as pressões encontradas em cada uma delas, conforme indicado no gráfico abaixo:

Gráfico 1 - Pressão x Rotação



Fonte: Próprio autor.

Inicialmente, os parâmetros principais, como pressão de entrada (α), tipo de material, ângulo de ramificação e dimensionamento do regulador, foram considerados como valores fixos de entrada para análise de seu funcionamento. Estes parâmetros poderiam ser variados para obtenção de resultados que comprovassem o funcionamento do equipamento. Através dos cálculos realizados a partir das variações dos valores da rotação do regulador, foi possível comprovar a ideia inicial de um sistema com pressões variáveis.

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho de graduação apresentou como objetivo principal elaborar um projeto que regulasse a pressão na saída de um sistema principal, através da instalação do regulador de pressão na ramificação do sistema. Utilizando o software Autodesk Inventor foi possível modelar o sistema principal e o equipamento a ser instalado para tal controle.

Primeiramente foi elaborada a tubulação e os flanges para o sistema principal, durante o processo foram definidas as informações de diâmetro e comprimento da tubulação, importantes para os cálculos realizados. Na sequência foi realizado o modelo 3D da ramificação, definindo o ângulo da mesma e do regulador, definindo o formato de sua carcaça, engrenagens e informações como área do regulador para ser utilizada na elaboração dos cálculos.

Com os modelos prontos, foi realizada a montagem, criando um ambiente real, com inserção de porcas e parafusos, juntas de vedação, gaxetas, preme de gaxeta, engrenagens, eixos e o motor. A vantagem de gerar os modelos 3D, além da melhor visualização da ideia como um todo, as informações de área e peso dos equipamentos são geradas de forma automática após definição dos materiais utilizados, além de melhorar a visualização de possíveis falhas de encaixe ou projeto.

Os cálculos foram elaborados seguindo as fórmulas apresentadas e os valores convertidos conforme necessidade, as fórmulas foram aplicadas no Excel para realização dos cálculos que preencheram as tabelas deste trabalho, o que permitiu a elaboração do gráfico comparativo.

Considerando a divisão dos cálculos em três condições defendidas neste trabalho, é possível afirmar que o sistema principal, sem a presença da ramificação, manteve a mesma pressão inicial e final, já que a perda de carga do sistema era muito baixa, ao considera-la somente relacionada ao material da tubulação, na primeira condição.

O projeto da ramificação, entretanto, mudou este cenário, a partir da segunda condição de cálculo, foi possível encontrar o valor da vazão da saída da ramificação, o que resultou na mudança de velocidade do fluido. Com as novas velocidades

calculadas, o sistema enfrentou a perda de carga gerada pela ramificação na saída da tubulação principal.

Os cálculos realizados na terceira condição, permitiram obter pressões diferentes das iniciais. Utilizando a equação de Bernoulli e substituindo os valores encontrados na segunda condição, o sistema então, confirmou a regulação de pressão na saída.

De forma geral, foi possível concluir que o equipamento apresentado regulou a pressão do sistema a partir do sentido de rotação de suas engrenagens. Conforme apresentado pelo cálculo ao rotacionar as engrenagens a favor do fluxo, a pressão de saída do sistema principal foi aumentada. Além disso, comprovou-se que ao inverter o sentido de rotação das engrenagens (contra o fluxo) a pressão de saída do sistema principal foi reduzida, quando comparada a pressão de entrada.

Através dos resultados obtidos pelos cálculos realizados, foi possível concluir que o objetivo do trabalho foi alcançado, além de identificar uma nova possibilidade de funcionamento do sistema, onde o regulador de pressão possa atuar não somente na redução de pressão, mas também no aumento da mesma.

Como sugestões para próximos trabalhos é indicado o aperfeiçoamento do modelo 3D do sistema como um todo, a consideração de mais variáveis que influenciam o fluxo do sistema, como por exemplo a utilização de outros tipos de materiais, com rugosidades diferentes, angulações diferentes na ramificação e diferentes velocidades do fluxo, estendendo também à elaboração do modelo físico, para provar sua eficiência real. Outra sugestão é o estudo dos materiais para definir qual melhor se adapta aos equipamentos citados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Fabrício. Vazão mássica e vazão volumétrica. Automação, 2018 . Disponível em: <https://automacaoecartoons.com/2018/09/16/vazao-massica-vazao-volumetrica/> . acesso em: Novembro de 2023.

ASHCROFT. Manômetro de Processo Baixa Pressão Tipo Diafragma: Modelos P5500 e P6500. ASHCROFT, 2023. Disponível em: <https://ashcroft.com.br/wp-content/uploads/2021/07/P5500-e-P6500-MP-026b-1.pdf>. Acesso em: Outubro de 2023.

BAPTISTA, Márcio. Fundamentos da Engenharia Hidráulica. Editora UFMG, 4ª edição, 1 de janeiro de 2016. Páginas de 1 – 477.

CALLISTER, William. Ciência e engenharia de materiais. LTC; 9ª edição, 26 de julho e 2016. Páginas de 1 – 912.

CRITTENDEN, John. Stantec's Water Treatment: Principles and Design. Wiley; 3ª edição, 8 de novembro de 2022. Páginas de 1 – 1951.

DIETER, George. Mechanical Metallurgy. McGraw-Hill, 1 de janeiro de 1989. Páginas 1 – 774.

DOUGHTY, S.. Mechanics of Machines. New York: John Wiley, 1988. Capítulo 5

DRAUSUISSE. Relação vazão x pressão em sistemas hidráulicos: você sabe o que é?. DRAUSUISSE, 2023. Disponível em: <https://drausuisse.com.br/blog/relacao-vazao-x-pressao-em-sistemas-hidraulicos-voce-sabe-o-que-e/> . Acesso em: Novembro de 2023.

DUDLEY, Darle. Gearing: Theory and Practice. Springer, 1ª edição, 23 de agosto de 2016. Páginas de 1 – 450.

ERTHAL, Jorge. Mecanismos: Engrenagens. UFPR, 2022. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC025/Aulas/5-Engrenagens/5-1-Engrenagens+Lei+do+Engrenamento.pdf> . Acesso em: Outubro de 2023.

Instrumatic: instrumentation experts!. Medição de pressão: Características, Tecnologias e tendências. Instrumatic: instrumentation experts!, 2012. Disponível em: <https://www.instrumatic.com.br/artigo/medicao-de-pressao-caracteristicas-tecnologias-e-tendencias#:~:text=Press%C3%A3o%20diferencial%3A%20%C3%A9%20a%20diferen%C3%A7a,diz%2Dse%20medir%20press%C3%A3o%20diferencial>. Acesso em: Setembro de 2023.

MORRIS, Alan. Measurement and Instrumentation: Theory and Application. Academic Press, 2ª edição, 22 de setembro de 2015. Páginas de 1 – 726.

MOTT, Robert. Applied Strength of Materials. CRC Press, 7ª edição, 5 de julho de 2021. Páginas de 1 – 1172.

NICHELE, Daniel. Você sabe a diferença entre Pressão e Vazão ao utilizar ar comprimido?. Dynamic Air. Disponível em: <https://www.solucoesdynamicair.com.br/blog/pressao-e-vazao-em-sistemas-de-transporte-pneumatico#:~:text=Para%20aumentar%20a%20press%C3%A3o%2C%20%C3%A9,pela%20vaz%C3%A3o%20de%20ar%20consumida>. Acesso em Setembro de 2023.

NORTON, R. L.. Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos. Porto Alegre: Bookman, 2010. Capítulo 9.

SKOUSEN, Philip L. Valve Handbook. McGraw-Hill, 3ª edição, 5 maio de 2011. Páginas de 1 – 470.

THÓRUS ENGENHARIA. Válvula redutora de pressão: o que é, como funciona, aonde usar, como escolher, como dimensionar, exemplo e muito mais!. Thórus Engenharia, 2020. Disponível em: <https://thorusengenharia.com.br/valvula-redutora-de-pressao-o-que-e-como-funciona-aonde-usar-como-escolher-como-dimensionar-exemplos/>. Acesso em: Outubro de 2023.

TIMOSHENKO, Stephen. Theory of Elasticity. Penguin Books Ltd, 1 de julho de 2017. Páginas de 1 – 541.

USP, Departamento de Engenharia Mecânica. Projetos Mecânicos de Elementos de Máquinas: Terminologia e conceitos básicos de engrenagens. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5417422/mod_resource/content/1/Aula%2013%20Engrenagens.pdf. Acesso em: Outubro de 2023.

WHITE, Frank. Mecânica de Fluidos, 2008. McGraw-Hill Interamericana de Espanha S.L. 7 de Março de 2008. Páginas de 1 – 896.

WIKA. Manômetro com tubo Bourdon. WIKA, 2023. Disponível em: https://www.wika.com.br/landingpage_bourdon_tube_pressure_gauge_pt_br.WIKA
Acesso em: outubro de 2023.

WOLER. Manômetro de pressão: O que é o manômetro de pressão. WOLER, 2023. Disponível em: <https://www.woler.com.br/manometro-pressao>. Acesso em: Outubro de 2023.