

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME PORTELLA

**PROJETO DE IMPREGNADORA A VÁCUO PARA MANUTENÇÃO DE
ESTADORES EM MOTORES ELÉTRICOS**

GUARAPUAVA

2024

GUILHERME PORTELLA

**PROJETO DE IMPREGNADORA A VÁCUO PARA MANUTENÇÃO DE
ESTADORES EM MOTORES ELÉTRICOS**

**VACUUM IMPREGNATOR PROJECT FOR MAINTENANCE OF STATORS IN
ELECTRIC MOTORS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Henrique Holzmann.

GUARAPUAVA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GUILHERME PORTELLA

**PROJETO DE IMPREGNADORA A VÁCUO PARA MANUTENÇÃO DE
ESTADORES EM MOTORES ELÉTRICOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 28/junho/2024

Henrique Ajuz Holzmann
Membro 1
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

Raquel da Cunha Ribeiro da Silva
Membro 2
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

Ricardo Vinicius Bubna Biscaia
Membro 3
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava

GUARAPUAVA

2024

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar este trabalho primeiramente a Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho.

À minha esposa Tatiana e minha filha Giovana que me incentivaram nos momentos difíceis, me alegrando quando estava desanimado e que compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Aos meus pais e meu irmão, Jorge, Maristela e Tiago, que me guiaram e orientaram durante a vida, sempre presentes nos momentos difíceis ou felizes.

Ao meu prezado orientador, Professor Doutor Henrique Ajuz Holzmann, por todo o auxílio e conhecimento compartilhado para que fosse possível o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A impregnação consiste em submergir uma peça em resina ou verniz visando melhorar a resistência, durabilidade e propriedades mecânicas do componente. Tal processo é aplicado em peças porosas, como componentes eletrônicos, cerâmicas, compósitos e peças metálicas. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver o projeto de uma impregnadora a vácuo para impregnação de estatores em motores elétricos, com custo acessível e a capacidade de facilitar e aperfeiçoar o processo de impregnação de bobinas de estatores em motores elétricos, reduzindo as chances de retrabalho ou manutenção em garantia, e conseqüentemente, diminuindo desperdícios para a empresa que realiza esse tipo de manutenção. O trabalho incluiu uma pesquisa de mercado para levantamento dos componentes necessários para o projeto e suas especificações, além da elaboração do projeto utilizando o software Autodesk Inventor. Após uma análise técnica e econômica, foi constatado que a máquina projetada tem um custo total estimado entre R\$ 20.000,00 e R\$ 25.000,00, representando uma economia substancial de 75% a 80% em relação à máquina existente no mercado, cujo custo é de aproximadamente R\$ 100.000,00. Além disso, a substituição das válvulas manuais por válvulas de solenoide contribuiu para a automação do sistema, facilitando a operação e potencialmente aumentando a eficiência e a precisão do processo de impregnação. Este avanço tecnológico pode resultar em uma maior qualidade dos produtos finais e em um aumento na produtividade. Portanto, a construção de uma impregnadora de estatores de motores elétricos à vácuo conforme o projeto apresentado é não apenas viável, mas também vantajosa do ponto de vista econômico e operacional. A implementação deste projeto pode proporcionar às empresas do setor de manutenção de motores elétricos uma solução mais acessível e eficiente, promovendo inovações tecnológicas e otimizando recursos financeiros e produtivos.

Palavras-chave: impregnadora, vácuo, motores elétricos, estatores, impregnação.

ABSTRACT

Impregnation involves submerging a part in resin or varnish to improve the component's resistance, durability, and mechanical properties. This process is applied to porous parts such as electronic components, ceramics, composites, and metal parts. The present final paper aims to develop a vacuum impregnator project for impregnating stators in electric motors, with an affordable cost and the capability to facilitate and enhance the stator coil impregnation process in electric motors. That will reduce the chances of rework or warranty maintenance, and consequently minimizing waste for the company performing this type of maintenance. The study included market research to gather the necessary components for the project and their specifications, in addition to developing the project using Autodesk Inventor software. After a technical and economic analysis, it was found that the designed machine has a total estimated cost between R\$ 20,000.00 and R\$ 25,000.00, representing a substantial saving of 75% to 80% compared to the existing machine on the market provided by the company Vacuolu, whose cost is approximately R\$ 100,000.00. Moreover, the replacement of manual valves with solenoid valves contributed to system automation, facilitating operation and potentially increasing the efficiency and accuracy of the impregnation process. This technological advancement may result in higher quality final products and increased productivity. Therefore, the construction of a vacuum impregnator for electric motor stators as presented in the project is not only feasible but also advantageous from an economic and operational standpoint. The implementation of this project can provide companies in the electric motor maintenance industry with a more affordable and efficient solution, promoting technological innovations and optimizing financial and productive resources.

Keywords: vacuum impregnator, electric motor, stators, impregnation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – O Universo Tecnológico de Motores Elétricos | 15 |
| Figura 2 – Vista explodida de motor de indução trifásico WEG..... | 16 |
| Figura 3 – Estator bobinado | 17 |
| Figura 4 – Rotor | 18 |
| Figura 5 – Danos em enrolamentos de motores trifásicos WEG | 20 |
| Figura 6 – Processo de impregnação à vácuo por submersão total | 23 |
| Figura 7 - Impregnadora à vácuo Vacuolu I-355 | 25 |
| Figura 8 – Esquemática impregnadora à vácuo | 26 |
| Figura 9 - Disco de acoplamento inferior | 37 |
| Figura 10 - Disco de acoplamento superior | 38 |
| Figura 11 - Dimensões dos anéis de vedação | 39 |
| Figura 12 - Vistas frontal e lateral direita | 46 |
| Figura 13 - Vistas traseira e lateral esquerda | 46 |
| Figura 14 - Vista em perspectiva..... | 47 |
| Figura 15 - Desenho técnico da estrutura metálica, com vistas frontal e lateral esquerda | 49 |
| Figura 16 - Desenho técnico da estrutura metálica com vista superior | 49 |
| Figura 17 - Desenho técnico da chapa de aço frontal..... | 50 |
| Figura 18 - Desenho técnico da chapa de aço lateral esquerda | 50 |
| Figura 19 - Desenho técnico da chapa de aço lateral direita..... | 51 |
| Figura 20 - Desenho técnico da chapa de aço traseira | 51 |
| Figura 21 - Desenho técnico da chapa de aço de topo | 52 |
| Figura 22 - Desenho técnico da chapa de aço de base | 53 |
| Figura 23 - Desenho técnico do disco de acoplamento inferior | 55 |
| Figura 24 - Desenho técnico do disco de acoplamento superior | 55 |
| Figura 25 - Desenho técnico da flange de adaptação do tubo rígido com o disco de acoplamento inferior | 56 |
| Figura 26 - Desenho técnico do tanque de armazenamento de impregnante.... | 58 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Materiais para estrutura metálica | 30 |
| Tabela 2 - Materiais para sistema de vácuo | 31 |
| Tabela 3 - Materiais para tubulação | 32 |
| Tabela 4 - Materiais para o sistema elétrico..... | 35 |
| Tabela 5 - Discos de acoplamento e flange | 38 |
| Tabela 6 - Dimensões dos anéis de vedação..... | 39 |
| Tabela 7 - Códigos e valores de O-rings | 40 |
| Tabela 8 - Chapas de vedação para caixa de ligação do estator | 40 |
| Tabela 9 - Custos de fabricação dos anéis de vedação..... | 41 |
| Tabela 10 - Custo total da impregnadora à vácuo..... | 41 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 | OBJETIVO GERAL ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. | |
| 2.1 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS Erro! Indicador não definido. | |
| 3 | REFERENCIAL TEÓRICO..... | 15 |
| 3.1 | Motores elétricos..... | 15 |
| 3.2 | Causas de falhas em motores elétricos | 19 |
| 3.3 | Manutenção de motores elétricos..... | 21 |
| 3.3.1 | Impregnação à vácuo | 23 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 25 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 27 |
| 5.1 | Seleção dos componentes | 27 |
| 5.1.1 | Estrutura metálica..... | 27 |
| 5.1.2 | Sistema de vácuo | 27 |
| 5.1.3 | Sistema elétrico | 28 |
| 5.1.4 | Discos de acoplamento | 29 |
| 5.1.5 | Anéis e chapa de vedação do estator | 29 |
| 5.2 | Detalhamento dos componentes | 29 |
| 5.2.1 | Estrutura metálica..... | 29 |
| 5.2.2 | Sistema de vácuo | 30 |
| 5.2.3 | Sistema elétrico | 34 |
| 5.2.4 | Discos de acoplamento | 37 |
| 5.2.5 | Anéis e chapas de vedação do estator..... | 38 |
| 5.3 | Análise dos resultados | 41 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 42 |

1 INTRODUÇÃO

Motores elétricos são amplamente utilizados na indústria para transformar energia elétrica em energia mecânica e a manutenção desses equipamentos, sendo ela preventiva ou corretiva, gera grandes custos. Esse problema pode ser minimizado através da melhoria dos processos que compõe o rebobinamento do motor, que basicamente é a substituição das partes danificadas do motor elétrico, como bobinas do estator, rotor e componentes mecânicos.

Um dos processos do rebobinamento é o de impregnação, que consiste em preencher os espaços vazios entre as bobinas e o estator, fazendo com que as bobinas tenham maior resistência mecânica, melhor isolamento elétrico e uma melhor troca de calor. Esse processo pode ser realizado de diversas maneiras, sendo as principais por gotejamento, imersão e impregnação à vácuo.

O gotejamento consiste no derramamento de verniz sobre o estator rebobinado, até que o mesmo preencha todos os espaços necessários, este processo é um dos mais empregados na indústria devido ao seu custo, porém possibilita uma maior chance de ocorrência de umidade e vibração do bobinado. Já o processo de imersão consiste em submergir o estator com verniz, até que este ocupe todos os espaços, expelindo qualquer bolha de ar. Outro processo é o de impregnação à vácuo, objeto de estudo deste trabalho, que consiste em transformar a carcaça do motor em uma câmara à vácuo, substituindo todo o ar e umidade da cavidade por verniz, possibilitando um resultado final com melhores características físicas.

Porém, o equipamento para o envernizamento por impregnação a vácuo têm um custo elevado, fazendo com que empresas de pequeno porte não tenham condições de utilizar tal processo. Assim, este trabalho tem como objetivo elaborar um projeto virtual de uma envernizadora à vácuo para motores elétricos, com baixo custo.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade do projeto de uma impregnadora à vácuo para estatores de motores elétricos com um custo reduzido.

1.2 Objetivos específicos

- Analisar a impregnação de verniz em estatores de motores elétricos, no processo à vácuo;
- Desenvolvimento do projeto de envernizadora a vácuo de baixo custo;
- Levantamento e cotação dos componentes necessários a fabricação do projeto.

1.3 Justificativa

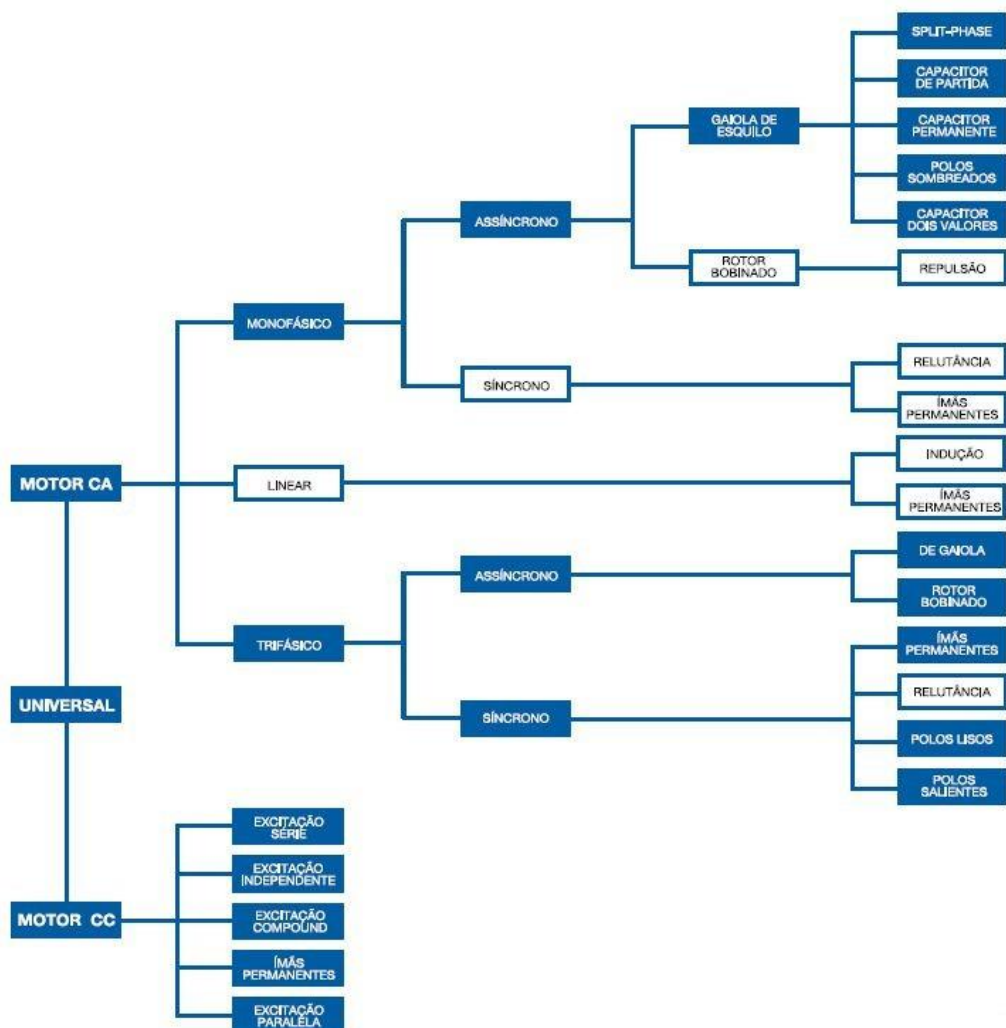
A análise de viabilidade de um projeto de impregnadora à vácuo é de extrema importância para possibilitar que empresas de pequeno porte tenham acesso à um processo que tem resultados muito superiores quando comparados à processos de impregnação mais simples, como por gotejamento. Assim reduzindo necessidade de retrabalho e manutenções em garantia, além da satisfação do cliente ao receber seu equipamento com uma vida útil maior. Esse processo fornece à empresa a capacidade de melhorar a qualidade do serviço prestado, conseqüentemente possibilitando que a mesma aumente seu faturamento através da redução de custos desnecessários, como desperdício de impregnante que ocorre em processos de impregnação mais simples, como o já citado anteriormente, além do aumento do valor cobrado do cliente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Motores elétricos

Motores elétricos são equipamentos que transformam energia elétrica em energia mecânica e auxiliam na automatização de processos na indústria. Esses equipamentos podem ser classificados em três grupos, que são os motores de corrente contínua (CC), corrente alternada (CA) e universais (CC e CA), como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – O Universo Tecnológico de Motores Elétricos



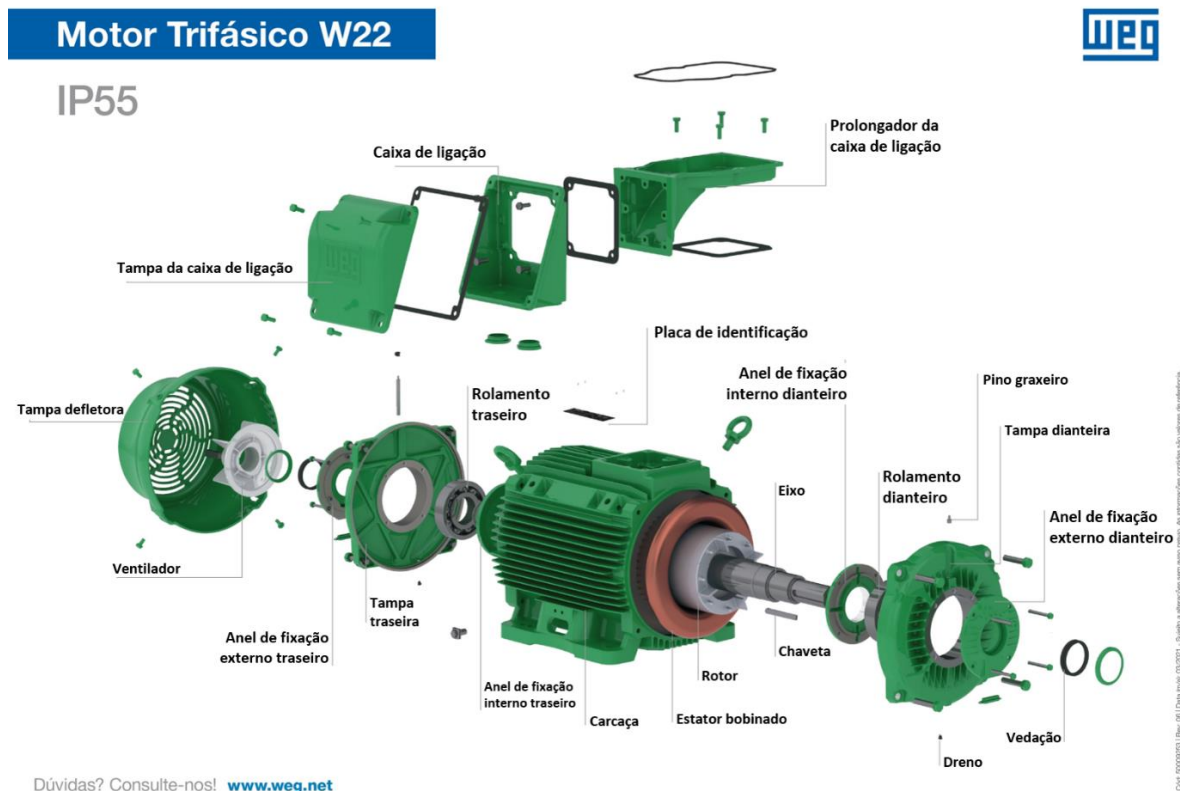
Fonte: Guia de especificação de motores elétricos WEG (2023)

Motores CC possuem um custo elevado, porém oferecem a versatilidade de controle de velocidade ajustável, necessitando ou de uma fonte de corrente contínua ou de um dispositivo que transforme corrente alternada em corrente contínua. Para o grupo de motores CC existem subgrupos, divididos em motores com excitação em

série, excitação independente, excitação *compound* (misto) e excitação paralela, baseados em relação à forma como estão ligadas as bobinas do indutor e da armadura (CHAPMAN, 2002).

Petruzella (2013) afirma que motores CA são os mais utilizados dentro da indústria, principalmente os de indução, devido ao seu baixo custo, resistência e construção simples. Dentro do grupo de motores CA existem subgrupos, como os motores monofásicos, utilizados em aplicações que exigem menor potência (3000KW ou inferior) com apenas uma fase e neutro.

Figura 2 – Vista explodida de motor de indução trifásico WEG



Fonte: Guia de especificação de motores elétricos WEG (2023)

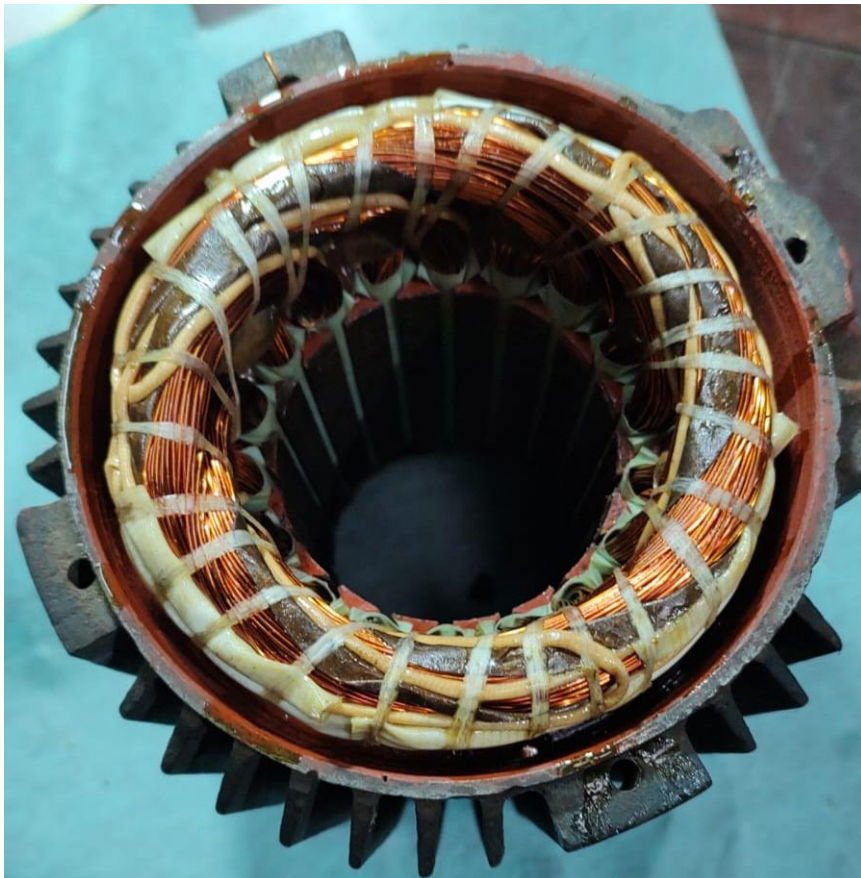
Outra classificação são os motores trifásicos, que possuem maior eficiência e suportam maiores esforços, trabalhando com 3 fases. Podendo ainda ser classificados como síncrono, que gira em velocidade constante independente da variação de carga ou assíncrono, que gira com uma velocidade menor do que a velocidade de rotação do campo do estator (HUGHES, 2006).

O motor elétrico trifásico tem algumas particularidades no seu funcionamento, pois utilizam o rotor que possui barramentos ou bobinas que se encontram curto-circuitados entre si. Quando submetidos ao grande campo magnético gerado pelo estator, são geradas correntes defasadas nos circuitos trifásicos do motor, assim gerando o movimento do motor sem a necessidade de alimentação direta do rotor (DUARTE, 2019).

Conforme a Figura 2, os principais componentes de um motor trifásico de corrente alternada são:

- Carcaça: responsável por dar sustentação ao estator e eixo, além de favorecer a refrigeração do motor por ser aletado;
- Estator bobinado: é constituído por chapas de aço em forma circular com ranhuras internas. Essas chapas são unidas pelo processo de empacotamento, que consiste em prensar as mesmas isoladas entre si formando um conjunto sólido. Dentro das ranhuras são alocadas as bobinas, geralmente fabricadas em fio de cobre (podendo ser também de alumínio);

Figura 3 – Estator bobinado



Fonte: Autoria propria (2023)

- Rotor: parte que sofre indução magnética e realiza o movimento de rotação. Neste caso é utilizado o rotor “gaiola de esquilo”, composto por lâminas circulares unidas também pelo processo de empacotamento em torno do eixo, com ranhuras externas, onde são inseridas barras condutoras ligadas em suas extremidades por anéis condutores, em curto-circuito;

Figura 4 – Rotor



Fonte: Autoria própria (2023)

- Tampas: fecham da carcaça, auxiliando na centralização do rotor, através de rolamentos;
- Rolamentos: possibilitam a rotação do eixo dentro da carcaça do motor, funcionando como mancais para a centralização do rotor;
- Anéis de fixação: tem como objetivo reforçar a centralização do rotor e impedir a entrada de impurezas no rolamento;
- Pinos graxeiros: permite que a graxa seja inserida nos rolamentos, sem necessidade de desmontar o motor;
- Drenos: permite o esgotamento da graxa que já não fornece a lubrificação adequada, sem necessidade de desmontar o motor;
- Vedações: evita a entrada de impurezas e saída de graxa da região do rolamento, propiciando uma maior durabilidade deste componente;
- Ventilador: fixado no eixo, utilizando a rotação do mesmo, propiciando a refrigeração do motor;
- Tampa defletora: canaliza o vento gerado pela rotação do ventilador no sentido das aletas do motor, tornando a refrigeração mais eficiente;
- Caixa de ligação: região do motor onde são alocados os cabos de ligação, que conectam as bobinas à rede elétrica;
- Prolongador de caixa de ligação: é um componente usado para estender ou aumentar o espaço disponível dentro da caixa de ligação do motor;

- Placa de identificação: é uma placa ou etiqueta fixada na carcaça do motor contendo as principais informações sobre o equipamento, como potência, tensão, corrente, frequência, rotação, fator de serviço, classe de isolamento e número de série.

2.2 Causas de falhas em motores elétricos

Na indústria busca-se trabalhar com manutenções preventivas e corretivas, mas nem sempre é possível. Em motores de indução trifásico, a manutenção preventiva consiste em limpar e analisar os componentes, verificando se há necessidade de troca para evitar possíveis danos que impossibilitem parcial ou totalmente o seu funcionamento (MARQUES e EGERT, 2016).

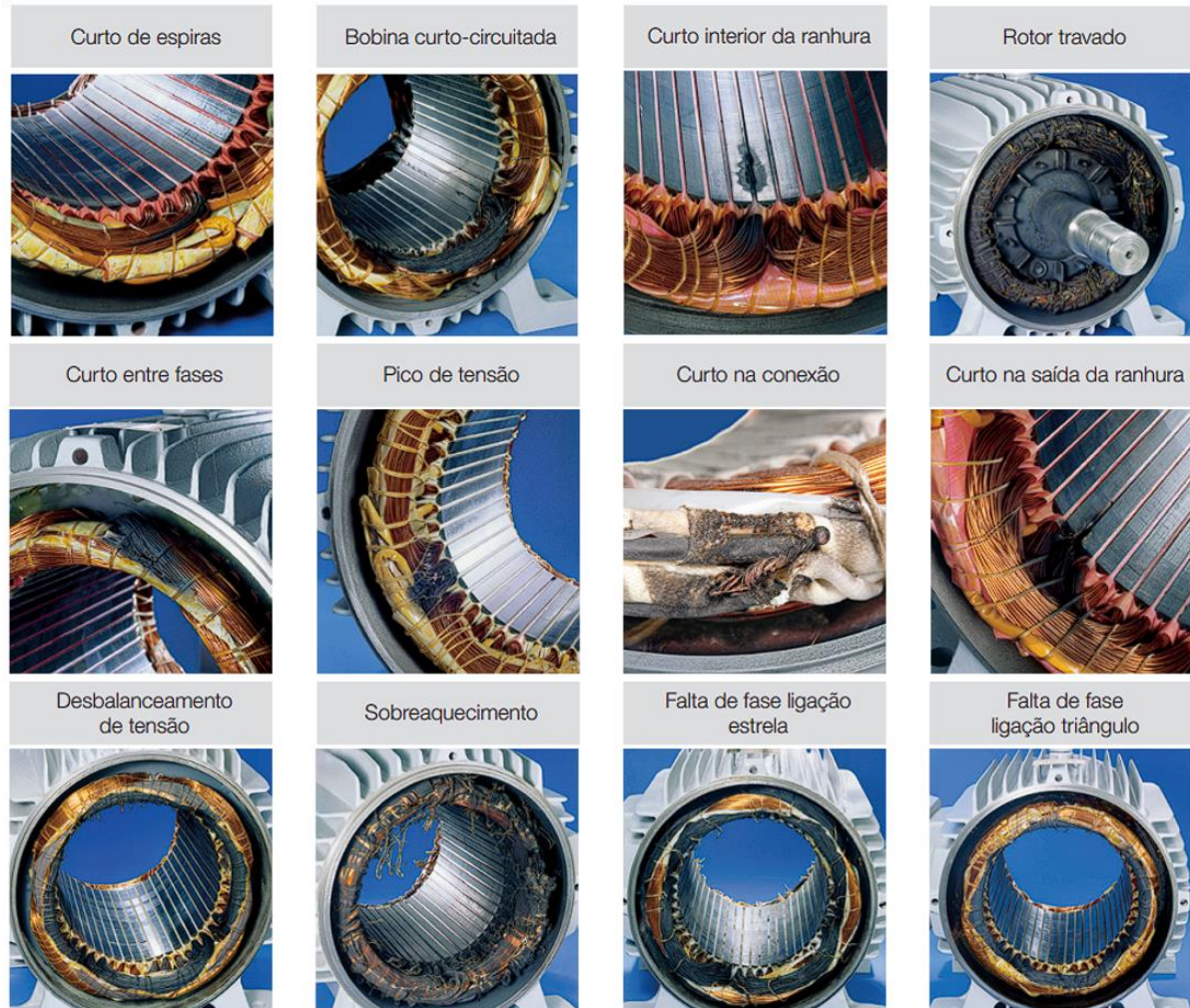
Segundo Siddique *et. al* (2005), cerca de 30% a 40% do total de avarias em motores elétricos provém de falhas no isolamento das bobinas do estator, sendo geralmente causadas por sobrecarga relacionada a picos de tensão ou bloqueio do rotor, seja por trabalhar com uma das fases em aberto, levando o motor a trabalhar com alimentação monofásica, por desequilíbrio das tensões de alimentação, por hiperaquecimento devido à problemas com ventilação ou até mesmo por qualquer outro problema que resulte no aumento de temperatura e por fim cause a falha do motor. Portanto, se realizada periodicamente, a manutenção preventiva evita maiores problemas e custos para a indústria quando comparada a manutenção corretiva.

Ilustrados pela Figura 5, estão os principais tipos de falhas em motores elétricos são:

- Sobrecarga: é um dos tipos de falhas mais comum, ocorrendo quando o motor é submetido à uma carga superior do que sua capacidade nominal, resultando em superaquecimento, danificando componentes internos;
- Curto-circuito: causado principalmente por falha no isolamento ou fios danificados, criando um caminho direto para a corrente entre os enrolamentos do estator, levando ao aumento repetido de corrente, danificando componentes elétricos do sistema;
- Falha do rolamento: sendo submetidos ao uso contínuo, vibração, sujeira e lubrificação inadequada, os rolamentos podem apresentar problemas como ruídos, vibração excessiva, por fim o travamento do eixo e parada do motor;

- Falha na partida: causado geralmente por problemas na fonte de alimentação, também conhecido como falta de fase, o que resulta na dificuldade em ligar o motor;
- Problema de isolamento: ao longo do tempo, o isolamento tende a sofrer avarias resultantes de temperaturas elevadas, umidade, vibração ou até mesmo por falhas no processo de fabricação do mesmo. Isso pode resultar em curto-circuito como citado anteriormente ou outros tipos de danos ao motor.

Figura 5 – Danos em enrolamentos de motores trifásicos WEG



Fonte: Danos em enrolamentos de motores trifásicos WEG (2019)

Cada tipo de dano ao enrolamento do estator possui características específicas, sendo que os principais tipos de curto-circuito são entre espiras, bobina curto-circuitada, curto entre fases, curto na conexão e curtos na saída ou no interior das ranhuras e geralmente são causados por contaminação no interior do motor e problemas com isolamento (esmalte do fio, verniz de impregnação, material isolante

dos cabos). Além de problemas como mal contato em conexões e rápidas oscilações na tensão de alimentação (TRACTIAN, 2023; WEG, 2019).

Já picos de tensão são caracterizados por problemas no acionamento do motor (como inversores de frequência) e/ou oscilações violentas relacionadas à descargas atmosféricas. O desbalanceamento de tensão pode ser definido por alguma instabilidade entre as fases, falha no banco de capacitores e/ou mal contato nas conexões (TRACTIAN, 2023).

Quando ocorre o travamento do rotor, pode-se supor que o motor está enfrentando dificuldades na partida, ocasionadas geralmente por elevada queda de tensão ou inércia e torque de carga muito elevados (TRACTIAN, 2023).

O processo de sobreaquecimento pode ser ocasionado por diversos motivos, como cabos de ligação muito longos e finos, conexão incorreta dos cabos de ligação no motor, excessivo número de partidas (aumento de corrente) em um curto espaço de tempo, excesso de carga na ponta do eixo, sobre ou subtensão na rede de alimentação e/ou ventilação deficiente. A falta de fase pode ocorrer quando existe mal contato em algum ponto da ligação, queima de uma fase do transformador de tensão para alimentação (caso o motor dependa deste equipamento), queima de um fusível ou até mesmo rompimento do cabo alimentador (WEG, 2019).

2.3 Manutenção de motores elétricos

Uma das formas mais empregadas é a manutenção corretiva de um motor trifásico, que consiste principalmente na desmontagem, remoção do isolamento antigo através de ferramentas e solventes, limpeza minuciosa de todos os componentes, incluindo carcaça e estator, nesta etapa é possível verificar quais peças e componentes devem ser trocados. Após a troca das peças danificadas, é realizado o processo de rebobinamento. Depois de finalizado o rebobinamento, o motor é remontado e testes são realizados para verificar a eficiência do motor (Furtado, 2016).

O rebobinamento consiste na substituição do isolamento do estator, enrolamento das bobinas e instalação das mesmas dentro do estator e por fim é realizado o processo de impregnação, objeto de estudo deste trabalho. Na impregnação é utilizado verniz específico para o isolamento e dissipação de calor das bobinas de motores elétricos. Este processo tem como objetivo fazer com que o verniz ocupe cada cavidade entre as bobinas do estator, reduzindo a possibilidade de vibração, curtos elétricos e também auxiliar na dissipação de calor (Furtado, 2016).

Para isso existem diferentes tipos de processos, desde processos simples como o de gotejamento e imersão, até processos mais complexos como o de impregnação à vácuo. Furtado (2016), classifica os tipos de processos de impregnação de estatores de motores elétricos mais utilizados na indústria como:

- Gotejamento: Nesse método, o verniz isolante é aplicado gotejando diretamente sobre as bobinas e o estator. Geralmente, o estator é colocado em uma posição vertical e o verniz é aplicado em uma taxa controlada para permitir a penetração adequada. O excesso de verniz é drenado e recolhido para reutilização.

- Imersão: o estator é colocado em um tanque com verniz até que todo o ar entre as espiras das bobinas seja expelido de suas cavidades, após isso, o estator é retirado do mesmo e colocado em uma estufa para a cura do impregnante.

- Inundação: semelhante ao processo de imersão, porém neste caso o estator é colocado em uma câmara que será inundada até que todo o ar seja expelido, a partir deste ponto o verniz é drenado e o processo de cura também é executado.

- *Roll Dip* (“imersão giratória”): neste caso, o estator é pré-aquecido, preso à um eixo ligado à uma castanha de torno, que com parte do estator submerso em verniz realiza a rotação lenta do estator até que todas as cavidades sejam preenchidas pelo impregnante.

- Fluxo contínuo: Esse tipo de impregnação consiste no pré-aquecimento do estator, posteriormente o mesmo é fixado com uma angulação de 15° e rotacionado lentamente. Além disso o impregnante é inserido na cabeça da bobina (extremidade da bobina que fica para a parte de fora da carcaça) que está mais elevada e no início da ranhura do estator, fazendo com que o impregnante preencha todo o espaço necessário. Posteriormente o estator é posicionado na horizontal e é feita a impregnação das duas cabeças das bobinas simultaneamente e segue para cura em estufa.

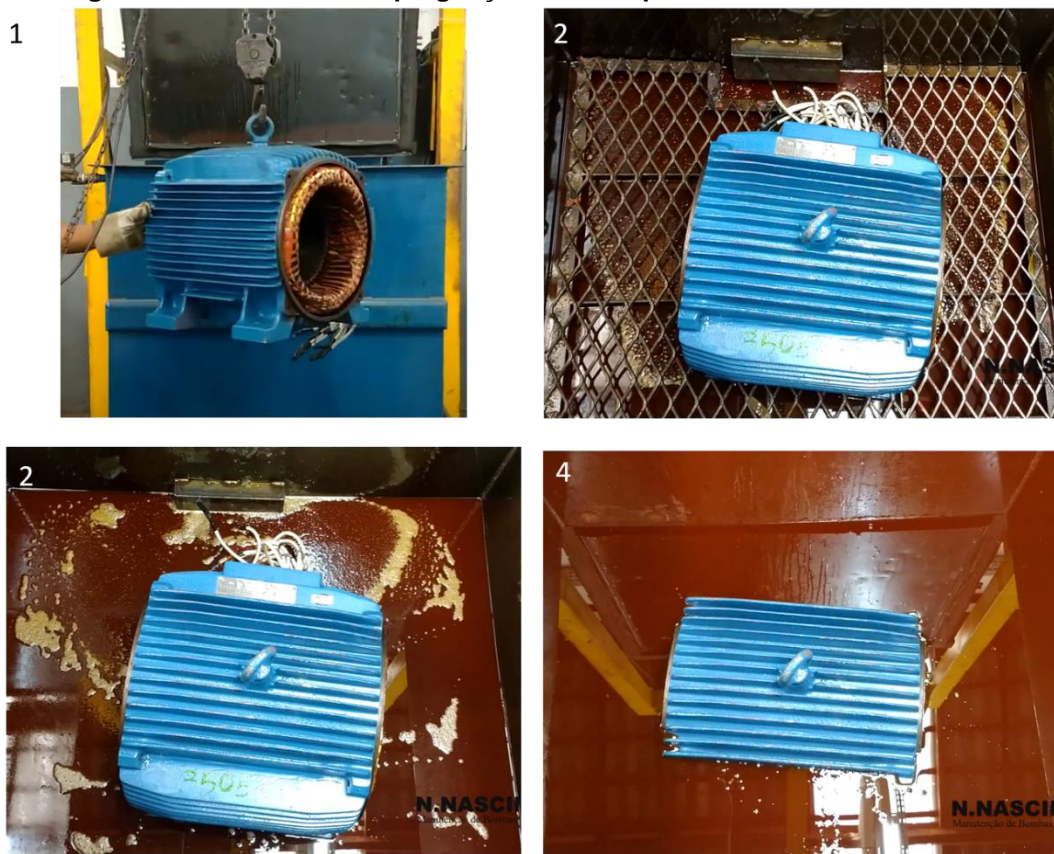
- Impregnação à vácuo: Processo que consiste na impregnação das bobinas do estator utilizando vácuo e será detalhado o item seguinte

Também é possível fazer alguns desses processos com o pré-aquecimento do estator e do verniz a uma temperatura ideal (dependendo do verniz selecionado), diminuindo a viscosidade do fluido e aumentando assim sua penetração entre os fios das bobinas.

2.3.1 Impregnação à vácuo

Este processo consiste em remover todo o ar presente dentro de uma câmara através de uma bomba de vácuo, substituindo-o pelo impregnante (neste caso verniz), fazendo com que esse atinja todas as cavidades do estator bobinado, expelindo inclusive qualquer umidade pré-existente, pois com a redução da pressão pela bomba de vácuo, reduz-se o ponto de ebulição da maioria das substâncias e permite que os líquidos evaporem em temperaturas mais baixas (City Machine Technologies, 2020). O processo pode ser realizado de duas formas, a primeira consiste em submeter o estator à uma câmara de vácuo onde a carcaça é sub-mergida completamente (Figura 4), fazendo com que o impregnante atinja todas as cavidades do motor, inclusive as indesejáveis, como roscas e juntas de vedação. Aguarda-se então até que o verniz ocupe totalmente espaços entre as bobinas, reduzindo as chances da permanência de ar ou umidade (LN Electric, 2020).

Figura 6 – Processo de impregnação à vácuo por submemersão total



Fonte: N NASCIMENTO SERVICE (2019)

Outra forma de realizar esse processo, é submeter somente a parte interna do motor ao vácuo, através de uma base e tampa, que através do vácuo, vedam

totalmente a parte interna do equipamento, fazendo com que somente a região do estator seja submetida ao vácuo e entre em contato com o verniz. Desta forma, não haverá necessidade de limpeza da parte externa, roscas e juntas de vedação da carcaça, tornando o processo mais eficiente e econômico (City Machine Technologies, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste projeto, primeiramente serão avaliados os benefícios e dificuldades de otimizar o processo de impregnação de estatores de motores elétricos. Para esta etapa será utilizada ferramenta de engenharia reversa, buscando levantar informações sobre os equipamentos disponíveis no mercado e as novas tecnologias com possibilidade de utilização.

Através desta pesquisa, foi encontrada no mercado, uma máquina que possui a capacidade de realizar impregnação somente o interior da carcaça do motor, onde se encontra o estator, da empresa Vacuolu.

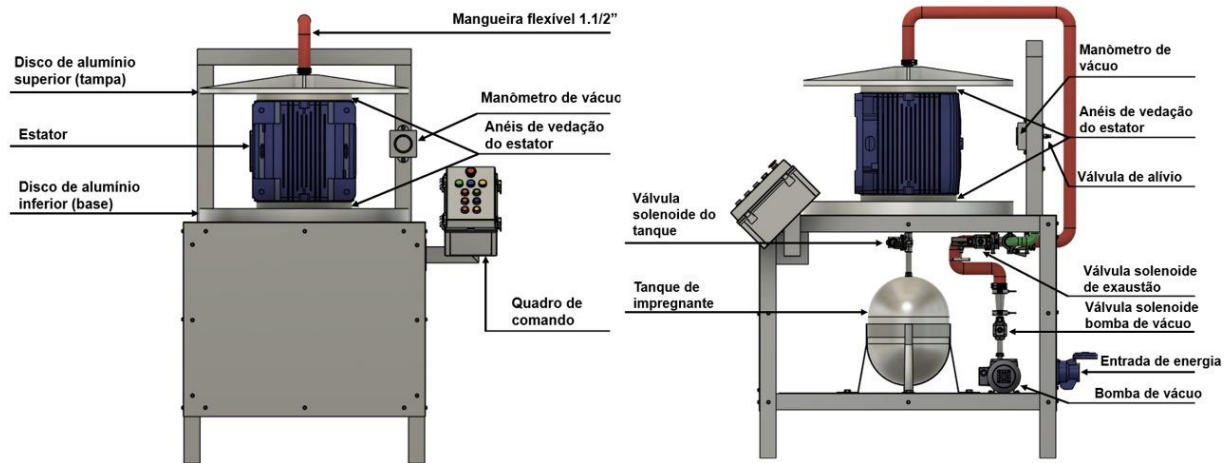
Figura 7 - Impregnadora à vácuo Vacuolu I-355



Fonte: Vacuolu (2021)

No levantamento inicial verificou-se os componentes básicos do sistema para desenvolver o projeto da máquina.

Figura 8 – Esquemática impregnadora à vácuo



Fonte: Autoria própria (2024)

Baseado na esquemática da máquina apresentada na Figura 7, foram identificados os seguintes componentes:

- Câmara de vácuo que neste projeto será a própria carcaça do motor, podendo variar entre os modelos W22: 63, 71, 80, 90L, 90S, 100M, 100L, 112M, 132M, 132S, 160L, 160M, 180L, 180M e 200;
- Sistema de vácuo constituído pela bomba de vácuo de simples estágio de 1cv, válvulas solenoide, válvula de alívio, tubulações rígidas e flexíveis, abraçadeiras, conexões tri-clamp para fixação das tubulações e um manômetro;
- Sistema de controle elétrico simples composto com caixa para painel elétrico, botoeiras para ligamento e desligamento do equipamento, lâmpadas para indicar o funcionamento, contadores, relés e bobinas solenoides para acionar válvulas;
- Tanque fabricado em aço inoxidável para armazenar o impregnante;
- Estrutura metálica fabricada com tubulações de metal de perfil quadrado e chapas de metal para fazer o fechamento e acabamento.

Para a elaboração do projeto virtual, será utilizado o *software* Autodesk Fusion 360, que possibilitará o desenvolvimento dos desenhos técnicos de cada componente e da montagem do equipamento.

Após o desenvolvimento do projeto será possível cotar cada componente através de catálogos e fornecedores já existentes no mercado. Com a cotação em mãos, será estabelecido um valor de custo total final para a máquina, e assim, analisar a viabilidade do projeto comparando com o valor de mercado encontrado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através de pesquisa, foi possível constatar que mercado nacional são encontrados poucos modelos de impregnadoras no sistema proposto pelo trabalho, sendo o principal deles o I-355, da empresa Vacuolu. Porém esse equipamento, como já mencionado, por possuir um alto custo, impossibilita que empresas de pequeno porte acessem tal tecnologia do processo. Além do baixo custo, o trabalho visa um equipamento com manutenção simples.

4.1 Seleção dos componentes

Para detalhar melhor as características necessárias para a construção deste equipamento, o mesmo será dividido em subsistemas, como estrutura metálica, sistema de vácuo, sistema elétrico, discos de acoplamento e anéis de vedação.

4.1.1 Estrutura metálica

Para atender as necessidades de resistência e durabilidade à um baixo custo, foram selecionados materiais metálicos, como tubos quadrados e chapas fabricados em aço SAE J4031010, identificação referente ao aço com baixa concentração de carbono.

4.1.2 Sistema de vácuo

O sistema de vácuo é composto por uma bomba de vácuo, manômetro, tubulações rígidas e flexíveis, conexões, válvulas, tanque de armazenamento de impregnante.

Existem no mercado diversos modelos de bombas de vácuo, como bombas de palhetas rotativas, de anel líquido, de diafragma, de difusão, entre outras. A grande vantagem desse sistema é que a bomba de vácuo pode ser de um tipo mais simples, como a bomba de vácuo de palhetas rotativas de simples estágio, possuindo apenas um estágio de compressão do ar antes de expulsá-lo, afinal a câmara de vácuo é a cavidade do próprio estator do motor elétrico, que é pequena, portanto, é necessário evacuar apenas cerca de 30 litros de ar, incluindo a tubulação, para o maior estator utilizado nesse estudo.

O manômetro de vácuo é um instrumento usado para medir a pressão, sendo projetado para medir pressões abaixo da pressão atmosférica, como as encontradas em sistemas de vácuo. Os tipos mais comuns no mercado são:

- Tubo de Bourdon: onde se utiliza um tubo curvado e tende a se endireitar de acordo com a pressão aplicada sobre ele;
- Membrana: formado por uma membrana que deforma com a pressão aplicada sobre ela;
- Pirani: mede a condutividade térmica do gás, que diminui com aplicação do vácuo.

Para o projeto, serão utilizadas tubulações rígidas fabricadas em aço inoxidável 304, que possui 18% de cromo e 8% de níquel, proporcionando-lhe alta resistência à corrosão, sendo ideal para o trabalho com produtos químicos como solvente e verniz. Também é possível a utilização do aço inoxidável 316, que além de possuir 16% de cromo e 10 % níquel em sua composição, recebe também um complemento de 2% de molibdênio, o que lhe confere uma maior resistência à corrosão, apesar de ter um custo mais elevado. A tubulação flexível ideal para projeto é a mangueira de policloreto de vinil (PVC) sanfonada com espiral de aço, possuindo assim, grande flexibilidade e ao mesmo tempo resistência para suportar os esforços devido ao vácuo.

As conexões e válvulas indicadas para este projeto, também são as de fabricação em aço inoxidável 304, para conceder ao sistema a mesma resistência e segurança. O diâmetro de $\frac{1}{2}$ polegada para tubulações e conexões são as mais utilizadas. Mas podem variar dependendo da bomba de vácuo selecionada para o projeto.

O tanque de armazenamento do impregnante deve ser fabricado em aço inoxidável, visando resistência e durabilidade, afinal deverá suportar a pressão negativa ao qual será submetido ao vácuo.

4.1.3 Sistema elétrico

O sistema elétrico desta máquina é composto por painel de comando elétrico, botões de comando, relés, contadores, válvula solenoide, cabos e conectores.

4.1.4 Discos de acoplamento

Para fazer a conexão entre a impregnadora e o estator, devem ser utilizados discos de acoplamento. O disco inferior é a base, colocado sobre o tampo da estrutura metálica da máquina, o outro é a tampa, sendo posicionada acima do estator. Estes discos devem ser fabricados em alumínio devido a sua resistência à corrosão e usinabilidade, além de ser um material leve, afinal a tampa será manuseada pelo operador da máquina durante a realização do processo.

4.1.5 Anéis e chapa de vedação do estator

Para assegurar que não haverá falhas no sistema de vácuo, é necessário a fabricação de dois anéis de vedação para as extremidades do estator e uma chapa para a vedação da abertura da caixa de ligação do estator. Os anéis serão posicionados entre os discos de alumínio e o estator do motor. Esses anéis devem ser produzidos em ferro fundido usinado, com cavidades para alocar três o-rings, sendo dois na parte superior, em contato com os discos de alumínio e o terceiro entre o anel de vedação e o encaixe da tampa do estator do motor. A chapa utilizada para esta parte do projeto será a mesma utilizada na estrutura da máquina.

4.2 Detalhamento dos componentes

Para determinar a viabilidade do projeto, foram selecionados componentes de acordo com o propósito, visando um bom desempenho no processo de impregnação com um custo reduzido.

4.2.1 Estrutura metálica

Os tubos foram utilizados para construção do “esqueleto” do equipamento, sendo selecionado o tubo de aço, com seção quadrada, com 60 milímetros de aresta e 2 milímetros de espessura, esse material pode ser encontrado na indústria em barras de 1, 2 e 6 metros, considerando que no projeto serão usados no mínimo 14 metros, considerando possíveis perdas durante o processo de construção, é indicado a compra de 3 tubos de 6 metros de comprimento.

Para a proteção dos componentes internos e acabamento, foi selecionada a chapa de aço fina laminadas em temperaturas que variam entre 900°C a 1300°C, proporcionando ao mesmo tempo resistência e maleabilidade, atendendo às

necessidades do projeto com um custo menor do que chapas laminadas à frio. Esse produto pode ser encontrado em chapas com espessuras variadas, com medidas de arestas de 1,2 metro por 2, 3 ou 6 metros e 1,5 metro por 6 metros. Para este projeto, é indicado a utilização da chapa com espessura de 2,65 milímetros, com 1,2 metro de largura por 6 metros de comprimento.

Tabela 1 - Materiais para estrutura metálica

| Imagem | Componente | Marca | Qtd. | Valor (Un.) |
|--|---|-------------------|------|-------------|
|  | Tubo de Aço Industrial 6591 – 60mm X 60mm X 2,0mm X 6m | Arcelor Mittal | 3 | R\$ 200,00 |
|  | Chapa de Aço Fina Quente - 1,2m x 6m x 2,65mm | Arcelor Mittal | 1 | R\$ 1150,00 |

Fonte: Autoria propria (2024)




4.2.2 Sistema de vácuo

O sistema de vácuo além de ser o mais importante, também possui os componentes de maior custo para o equipamento. Assim, a bomba ideal, visando custo-benefício, deve possuir 1 cavalo de potência, deslocamento de ar nominal de 300 litros por minuto, com a capacidade de atingir o nível de vácuo efetivo de 640 mmHG, que se refere à pressão residual alcançada em um sistema de vácuo, indicando quão próximo ele está do vácuo absoluto. Portanto, foi selecionada a bomba de vácuo modelo SC-16, da marca DVP, possuindo as especificações técnicas mencionadas anteriormente, com 1700 rotações por minuto, com conexões de sucção e descarga de ½ polegada.

Para fazer a aferição de pressão durante o processo, foi selecionado o manômetro de tubo de Bourdon, pois atende às necessidades do projeto, possuindo uma precisão aceitável, robustez e um valor acessível. Também se faz necessário uma válvula de segurança, também conhecida como válvula de alívio regulável, em que uma mola ajustável mantém o diafragma ou pistão pressionado contra o assento da válvula, selando-a. Quando a pressão do vácuo cai abaixo do ponto de alívio ajustado, a mola abre a válvula, permitindo a entrada de ar para aumentar a pressão.

Quando a pressão se normaliza, a válvula se fecha novamente, mantendo a operação segura do sistema.

Tabela 2 - Materiais para sistema de vácuo

| Imagem | Componente | Marca | Qtd. | Valor (Un.) |
|--|---|----------|------|---------------|
|  | Bomba de vácuo 1 CV – 1700 rpm | DVP | 1 | R\$ 10.290,00 |
|  | Manômetro de vácuo – tubo de Bourdon | genérico | 1 | R\$ 150,00 |
|  | Válvula de alívio 1/4" | genérico | 1 | R\$ 300,00 |

Fonte: Autoria própria (2024)

Para a tubulação rígida foram selecionados tubos, conexões e uniões fabricados em aço inoxidável 304, seguindo as seguintes especificações:




- 2 tubos de aço inox 304 com 1/2" de diâmetro e 75 milímetros de comprimento, com roscas externas BSP nas duas extremidades;
- 1 tubos de aço inox 304 com 1/2" de diâmetro e 100 milímetros de comprimento, com roscas externas BSP nas duas extremidades;
- 1 conexão em t de aço inox 304 tri-clamp com 1" de diâmetro, marca Webinox;
- 1 conexão em t de aço inox 304 tri-clamp com redução de 1.1/2" para 1" de diâmetro;
- 1 redução concêntrica inox 304 tri-clamp de 1.1/2" para 1" de diâmetro, marca Webinox;
- 2 niple de aço inox 304 tri-clamp adaptador 1" - 1.1/2" com rosca BSP macho 1/2", marca Webinox;
- 1 niple de aço inox 304 tri-clamp 1" – 1.1/2" adaptador para mangueira com 1" de diâmetro interno, marca Webinox;

- 3 niple de aço inox 304 tri-clamp 1" – 1.1/2" adaptador para mangueira com 1.1/2" de diâmetro interno, marca Webinox;
- 7 abraçadeiras de aço inox 304 tri-clamp para diâmetros de tubos de 1" até 1 ½", marca Webinox;
- 12 abraçadeiras reguláveis de aço inox 304 para fixação das mangueiras flexíveis, podendo ser ajustadas de 27 à 51 milímetros de diâmetro;
- 3 anéis de vedação de EPDM (Ethylene Propylene Diene Methylene Rubber) para abraçadeira tri-clamp com 1" de diâmetro;
- 3 anéis de vedação de EPDM (Ethylene Propylene Diene Methylene Rubber) para abraçadeira tri-clamp com 1.1/2" de diâmetro;
- 1 anel de vedação de EPDM (Ethylene Propylene Diene Methylene Rubber) para adaptação tri-clamp com 1.1/2" para 1" de diâmetro;




Para a tubulação flexível foram selecionados dois itens:

- Mangueira flexível PVC reforçada com espiral de aço 1" de diâmetro com 1 metro de comprimento, marca América Mangueiras e Artefatos de Borracha;
- Mangueira flexível PVC reforçada com espiral de aço 1.1/2" de diâmetro com 3 metros de comprimento, marca América Mangueiras e Artefatos de Borracha;

Tabela 3 - Materiais para tubulação

| Imagem | Componente | Marca | Qtd. | Valor (Un.) |
|---|---|----------|------|-------------|
|  | Tubos de aço inox 304 com ½" de diâmetro e 75 milímetros de comprimento, com roscas externas BSP | genérico | 2 | R\$ 23,90 |
|  | Tubos de aço inox 304 com ½" de diâmetro e 100 milímetros de comprimento, com roscas externas BSP | genérico | 1 | R\$ 29,90 |
|  | Conexão em T de aço inox 304 tri-clamp de 1" | Webinox | 1 | R\$ 139,95 |

| | | | | |
|---|---|----------|----|------------|
|  | Conexão em t de aço inox tri-clamp com redução de 1.1/2" para 1" de diâmetro | genérico | 1 | R\$ 150,00 |
|  | Redução concêntrica inox 304 tri-clamp de 1.1/2" para 1" de diâmetro | Webinox | 1 | R\$ 88,10 |
|  | Niple de aço inox tri-clamp adaptador 1" - 1.1/2" com rosca BSP macho 1/2" | Webinox | 2 | R\$ 65,05 |
|  | Niple de aço inox 304 tri-clamp 1" – 1.1/2" adaptador para mangueira com 1" de diâmetro interno | Webinox | 1 | R\$ 56,00 |
|  | Niple de aço inox 304 tri-clamp 1" – 1.1/2" adaptador para mangueira com 1.1/2" de diâmetro interno | Webinox | 3 | R\$ 65,00 |
|  | Abraçadeira de aço inox 304 tri-clamp para diâmetros de tubos de 1" até 1 1/2" | Acepil | 7 | R\$ 22,33 |
|  | Abraçadeira regulável de aço inox 304 para fixação das mangueiras flexíveis com 27 à 51 mm | genérico | 12 | R\$ 12,77 |
|  | Anel de vedação para abraçadeira tri-clamp 1" | Webinox | 3 | R\$ 3,74 |
|  | Anel de vedação para abraçadeira tri-clamp 1.1/2" | Webinox | 3 | R\$ 3,74 |

| | | | | |
|---|--|---------|---|--|
|  | Anel de vedação para abarçadeira tri-clamp adaptação 1.1/2" para 1" | Webinox | 1 | R\$ 3,74 |
|  | Mangueira flexível PVC reforçada com espiral de aço 1" de diâmetro com 1 metro de comprimento | América | 1 | $\frac{\text{R\$ } 43,53}{\text{metro}}$ |
|  | Mangueira flexível PVC reforçada com espiral de aço 1.1/2" de diâmetro com 3 metros de comprimento | América | 3 | $\frac{\text{R\$ } 55,94}{\text{metro}}$ |

Fonte: Autoria própria (2024)

Para a fabricação do tanque, deve-se utilizar chapa de aço inoxidável 304 com 1 milímetro de espessura, visando atender todos os requisitos de resistência do projeto e ao mesmo tempo obter um recipiente leve e compacto. O material é importante para não haver contaminação do impregnante por oxidação das paredes internas do tanque devido ao contato com produtos químicos, além de facilitar o processo de limpeza, sendo possível utilizar solventes sem danificar o mesmo. O custo para a fabricação de um tanque com 25 litros de capacidade, seguindo as especificações deste projeto, em média, é de R\$ 1250,00. O suporte para o tanque deve ser fabricado utilizando a chapa de aço da estrutura metálica, reduzindo assim o custo e aproveitando o material restante da mesma.





4.2.3 Sistema elétrico

O sistema elétrico foi dimensionado visando a facilidade na operação da máquina utilizando válvulas solenoides ao invés de válvulas manuais, porém com uma construção enxuta, para reduzir custos. Para o funcionamento e segurança dos dispositivos elétricos, foram selecionados os seguintes componentes:

- 3 Válvulas solenoide 2/2 vias, 1/2", NF, inox 304 220v, marca LAB;
- 3 Relés de Estado Sólido SSR-4810 - 10A 480Vca, marca Novus;
- 1 Contator Tripolar 12A 1NA+1NF 230VCA LC1D12P7, marca Schneider;

- 1 Botão de painel pulsante NA 22mm diâmetro verde, marca Stark Eletric;
- 1 Botão de painel pulsante NA 22mm diâmetro azul, marca Stark Eletric;
- 1 Botão de painel pulsante NA 22mm diâmetro amarelo, marca Stark Eletric;
- 3 Botões de painel pulsante NF 22mm diâmetro vermelho, marca Stark Eletric;
- 1 Botão de emergência 22mm com 2 contatos NF vermelho, marca Stark Eletric;
- 1 Sinaleiro led 22mm 220V com proteção IP65 verde, marca Stark Eletric;
- 1 Sinaleiro led 22mm 220V com proteção IP65 azul, marca Stark Eletric;
- 1 Sinaleiro led 22mm 220V com proteção IP65 amarelo, marca Stark Eletric;

Tabela 4 - Materiais para o sistema elétrico

| Imagem | Componente | Marca | Qtde. | Valor (Un.) |
|---|---|---------------|-------|-------------|
|  | Válvula solenoide 2/2 vias, 1/2", NF, inox 304 220v | LAB | 3 | R\$ 285,00 |
|  | Relé de Estado Sólido SSR-4810 - 10A 480Vca | Novus | 3 | R\$ 75,00 |
|  | Contator Tripolar 12A 1NA+1NF 230VCA LC1D12P7 | Schneider | 1 | R\$ 241,29 |
|  | Botão de painel pulsante NA 22mm diâmetro verde | Stark Eletric | 1 | R\$ 15,90 |

| | | | | |
|---|---|---------------|---|-----------|
|  | Botão de painel pulsante NA 22mm diâmetro azul | Stark Eletric | 1 | R\$ 15,90 |
|  | Botão de painel pulsante NA 22mm diâmetro amarelo | Stark Eletric | 1 | R\$ 15,90 |
|  | Botão de painel pulsante NF 22mm diâmetro vermelho | Stark Eletric | 3 | R\$ 15,90 |
|  | Botão de emergência 22mm com 2 contatos NF | Stark Eletric | 1 | R\$ 26,90 |
|  | Sinaleiro led 22mm 220V com proteção IP65 verde | Stark Eletric | 1 | R\$ 12,90 |
|  | Sinaleiro led 22mm 220V com proteção IP65 azul | Stark Eletric | 1 | R\$ 12,90 |
|  | Sinaleiro led 22mm 220V com proteção IP65 amarelo | Stark Eletric | 1 | R\$ 12,90 |



Cabo 4mm x 50 metros

Teenflex

1

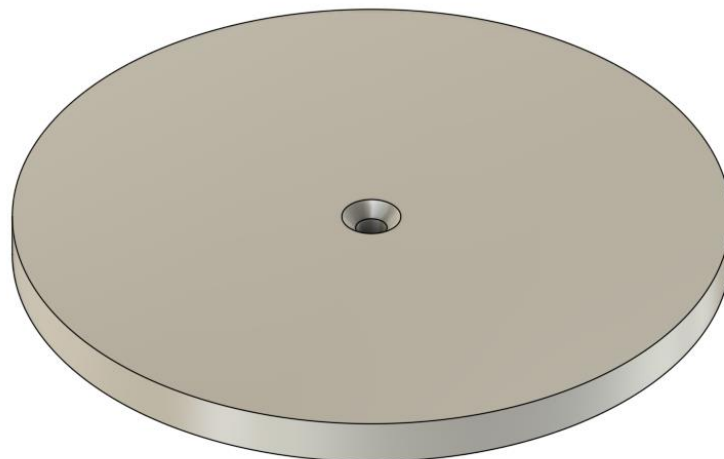
R\$ 61,99

Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.4 Discos de acoplamento

Os discos de alumínio devem ser fabricados de acordo com as especificações deste projeto para atender todos os modelos de estatores mencionados no trabalho. Primeiramente a base deve ser mais robusta para suportar a carga exercida pelo estator que será colocado sobre ela, possuindo 50 milímetros de espessura, 780 milímetros de diâmetro externo, também deve ser realizado um furo com diâmetro de 1.1/2" no centro do disco que fará a conexão com o tanque de impregnante posicionado abaixo da base. Além dessas cavidades, devem ser feitos 4 furos com rosca M14 e 15 milímetros de comprimento ao redor do furo central para fixação de uma flange com furo central de 1/2" e rosca interna. Também um chanfro no furo central para facilitar o retorno do impregnante ao tanque ao final do processo.

Figura 9 - Disco de acoplamento inferior

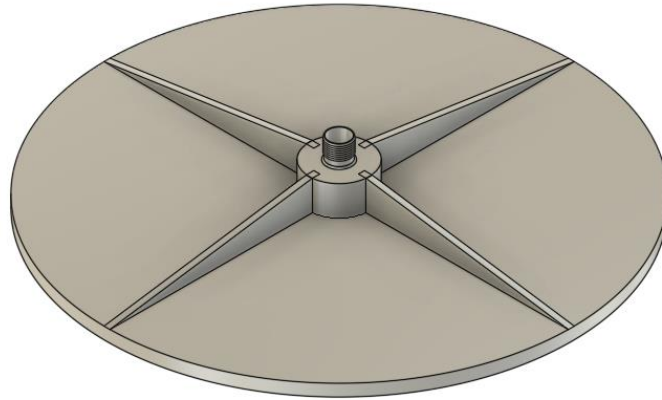


Fonte: Autoria própria (2024)

Já o disco superior deve ser fabricado com uma espessura menor, neste caso 20 milímetros, visando reduzir o seu peso, com um cilindro central de 100 milímetros

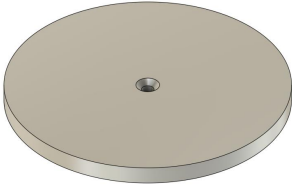
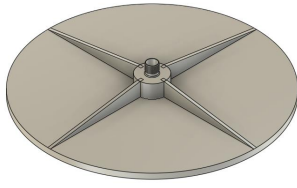
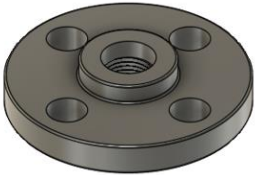
de diâmetro e 50 milímetros de altura no centro do disco, logo acima desse disco, uma adaptação para o encaixe da mangueira.

Figura 10 - Disco de acoplamento superior



Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 5 - Discos de acoplamento e flange

| Imagem | Componente | Marca | Qtd. | Valor (Un.) |
|---|--|----------|------|-------------|
|  | Base para estator fabricada em alumínio | | 1 | R\$ 630,00 |
|  | Tampa para estator fabricada em alumínio com conexão para mangueira flexível de 1.1/2" | | 1 | R\$ 420,00 |
|  | Flange de aço inoxidável 304 com rosca interna de 1/2" | genérica | 1 | R\$ 250,00 |

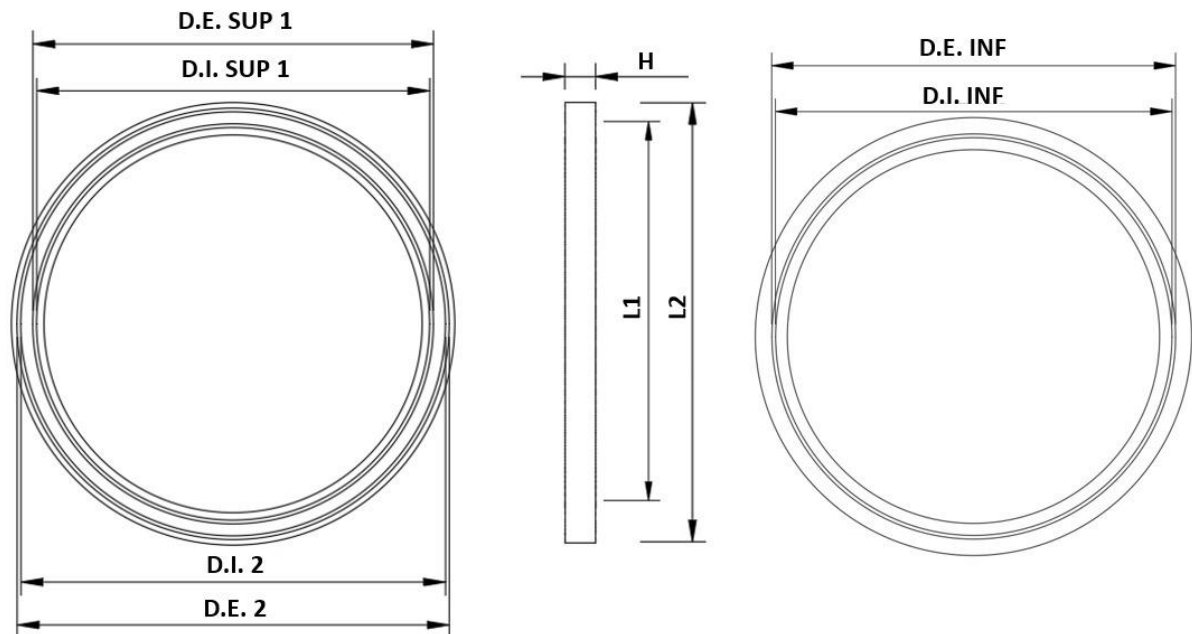
Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.5 Anéis e chapas de vedação do estator

Para cada modelo de estator devem haver dois anéis de vedação fabricados em ferro fundido usinado com cavidades para O-rings com o objetivo de fazer a

vedação entre a carcaça do estator e os discos de acoplamento. Portanto, os seguintes modelos foram desenvolvidos a partir das dimensões de cada estator.

Figura 11 - Dimensões dos anéis de vedação



Fonte: Autoria própria (2024)

Comparando o desenho acima com a tabela a seguir, é possível identificar as medidas para cada anel de vedação para fabricação.

Tabela 6 - Dimensões dos anéis de vedação

| Estator WEG | Acoplamento | | | Ranuras superiores | | | | Ranura inferior | |
|-------------|-------------|-------|----|--------------------|--------|--------|--------|-----------------|---------------|
| | L1 | L2 | H | D.I. 1 | D.E. 1 | D.I. 2 | D.E. 2 | D.I. INFERIOR | D.E. INFERIOR |
| 63 | 92 | 120,6 | 25 | 101,32 | 103,1 | 107,67 | 109,45 | 101 | 105 |
| 71 | 104 | 134 | 25 | 114,02 | 115,8 | 126,72 | 128,5 | 114 | 118 |
| 80 | 116 | 146 | 25 | 126,67 | 129,29 | 139,37 | 141,99 | 126 | 131,5 |
| 90L, 90S | 132 | 172 | 25 | 142,47 | 146 | 158,34 | 161,87 | 142 | 149,5 |
| 100L | 150 | 190 | 25 | 151,99 | 155,52 | 164,69 | 168,22 | 151 | 158,5 |
| 112M | 174 | 214 | 25 | 183,74 | 187,27 | 196,44 | 199,97 | 183,5 | 191 |
| 132M, 132S | 212 | 252 | 25 | 221,84 | 225,37 | 234,54 | 238,07 | 221,5 | 229 |
| 160L, 160M | 256 | 296 | 25 | 266,29 | 269,82 | 278,99 | 282,52 | 266 | 273,5 |
| 180L, 180M | 281 | 321 | 25 | 291,69 | 295,22 | 304,69 | 308,22 | 291,5 | 299 |
| 200L, 200M | 304,85 | 357 | 25 | 316,87 | 320,4 | 342,27 | 345,8 | 324,5 | 330,5 |

Fonte: Autoria própria (2024)

Através das medidas apresentadas anteriormente, é possível encontrar no mercado O-rings com tamanhos padrão e caso necessário a fabricação com medidas personalizadas, como é possível verificar na seguinte tabela.

Tabela 7 - Códigos e valores de O-rings

| ESTATOR WEG | Código O-ring | Valor (Un.) | Qtde. | Custo total |
|--------------------|----------------------|--------------------|--------------|--------------------|
| 63 | 2045 | R\$ 4,29 | 2 | R\$ 13,30 |
| | 2046 | R\$ 4,72 | 1 | |
| 71 | 2047 | R\$ 5,36 | 2 | R\$ 17,15 |
| | 2049 | R\$ 6,43 | 1 | |
| 80 | 2159 | R\$ 7,51 | 2 | R\$ 23,47 |
| | 2161 | R\$ 8,45 | 1 | |
| 90L, 90S | 2255 | R\$ 11,31 | 2 | R\$ 34,95 |
| | 2259 | R\$ 12,33 | 1 | |
| 100L | 2258 | R\$ 12,22 | 2 | R\$ 37,31 |
| | 2260 | R\$ 12,87 | 1 | |
| 112M | 2263 | R\$ 15,01 | 2 | R\$ 47,18 |
| | 2265 | R\$ 17,16 | 1 | |
| 132M, 132S | 2269 | R\$ 22,52 | 2 | R\$ 69,06 |
| | 2271 | R\$ 24,02 | 1 | |
| 160L, 160M | 2275 | R\$ 28,68 | 2 | R\$ 90,87 |
| | 2276 | R\$ 33,51 | 1 | |
| 180L, 180M | 2277 | R\$ 38,34 | 2 | R\$ 118,50 |
| | 2278 | R\$ 41,82 | 1 | |
| 200L, 200M | Sob medida | R\$ 52,47 | 1 | R\$ 162,75 |
| | Sob medida | R\$ 56,36 | 1 | |
| | Sob medida | R\$ 53,92 | 1 | |

Fonte: Autoria própria (2024)

Além dos anéis, também se faz necessário a vedação da abertura de saída dos cabos das bobinas para a caixa de ligação do motor, posicionada na lateral do estator. Para isso, deve ser utilizada a mesma chapa da estrutura metálica, utilizando a própria borracha de vedação já existente na carcaça do motor, sendo necessário utilizar cinta do tipo catraca de 1" de largura por 2 metros de comprimento. Como o custo da chapa já foi considerado na estrutura da máquina, será necessário apenas contabilizar o custo de duas cintas.

Tabela 8 - Chapas de vedação para caixa de ligação do estator

| ESTATOR WEG | ALTURA | COMPRIMENTO | Valor (Un.) |
|------------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| 63, 71, 80, 90L, 90S, 100L | 85 mm | 85 mm | - |
| 112M, 132M, 132S | 110 mm | 110 mm | - |
| 160L, 160M, 180L, 180M, 200L, 200M | 160 mm | 160 mm | - |
| Cinta catraca 1" x 2m | 1" | 2 m | R\$ 22,99 |

Fonte: Autoria própria (2024)

A fabricação dos anéis passa por duas etapas, fundição e usinagem, assim é possível obter uma estimativa de custo para esses componentes, deve-se levar em

conta que cada estator necessita de dois anéis, portanto o valor apresentado na tabela já considera este fator:

Tabela 9 - Custos de fabricação dos anéis de vedação

| ESTATOR WEG | CUSTO FUNDIÇÃO | CUSTO USINAGEM | CUSTO TOTAL |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| 63 | R\$ 26,00 | R\$ 5,50 | R\$ 31,50 |
| 71 | R\$ 31,00 | R\$ 6,40 | R\$ 37,40 |
| 80 | R\$ 33,00 | R\$ 8,00 | R\$ 41,00 |
| 90L, 90S | R\$ 52,00 | R\$ 9,70 | R\$ 61,70 |
| 100L | R\$ 58,00 | R\$ 10,00 | R\$ 68,00 |
| 112M | R\$ 66,00 | R\$ 11,20 | R\$ 77,20 |
| 132M, 132S | R\$ 79,00 | R\$ 15,20 | R\$ 94,20 |
| 160L, 160M | R\$ 94,00 | R\$ 19,60 | R\$ 113,60 |
| 180L, 180M | R\$ 102,00 | R\$ 22,00 | R\$ 124,00 |
| 200L, 200M | R\$ 147,00 | R\$ 26,00 | R\$ 173,00 |

Fonte: Autoria própria (2024)

4.3 Análise dos resultados

Após realizar uma ostensiva pesquisa de mercado verificando os melhores componentes visando sempre reduzir o custo dentro das possibilidades que o projeto apresenta, foi possível chegar a uma estimativa do custo para a construção do equipamento, ilustrada pela seguinte tabela.

Tabela 10 - Custo total da impregnadora à vácuo

| Parte do sistema | Custo |
|--------------------------------------|----------------------|
| Estrutura metálica | R\$ 1.750,00 |
| Sistema de vácuo | R\$ 13.709,57 |
| Sistema elétrico | R\$ 1.544,28 |
| Discos de acoplamento | R\$ 1300,00 |
| Anéis e chapas de vedação | R\$ 1481,94 |
| Mão de obra e serviços terceirizados | R\$ 3.000,00 |
| Custo total | R\$ 22.785,79 |

Fonte: Autoria própria (2024)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade da construção de uma impregnadora de estatores de motores elétricos à vácuo, comparando-a com a máquina existente no mercado fornecida pela empresa Vacuolu, cujo custo é aproximadamente R\$ 100.000,00. Através de uma avaliação detalhada dos sistemas componentes da máquina — estrutura metálica, sistema de vácuo, sistema elétrico, discos de acoplamento e anéis de vedação — foi possível desenvolver um projeto que não só reduz significativamente os custos, mas também automatiza o processo utilizando válvulas solenoide no lugar das válvulas manuais.

Após a análise técnica e econômica, verificou-se que a máquina projetada neste estudo, incluindo todos os componentes e considerando possíveis custos com terceirização de serviços como fundição, usinagem e solda, tem um custo total estimado entre R\$ 20.000,00 e R\$ 25.000,00. Representando uma economia substancial de 75% a 80% em relação ao custo da máquina oferecida pela Vacuolu. Essa redução se deve majoritariamente pois foram considerados apenas os custos com componentes e mão de obra para a construção do equipamento, dispensando custos, como a elaboração de um projeto detalhado.

Além do aspecto econômico, a substituição das válvulas manuais por válvulas de solenoide contribui para a automação do sistema, facilitando a operação e potencialmente aumentando a eficiência e a precisão do processo de impregnação. Este avanço tecnológico pode resultar em uma maior qualidade dos produtos finais e em um aumento na produtividade.

Portanto, a construção de uma impregnadora de estatores de motores elétricos à vácuo conforme o projeto apresentado é não apenas viável, mas também vantajosa do ponto de vista econômico e operacional. A implementação deste projeto pode proporcionar às empresas do setor de manutenção motores elétricos uma solução mais acessível e eficiente, promovendo inovações tecnológicas e otimizando recursos financeiros e produtivos.

REFERÊNCIAS

- PETRUZELLA, Frank D. **Motores elétricos e acionamentos. (Tekne)**. Porto Alegre: Grupo A, 2013.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5ª edição. Porto Alegre: Grupo A, 2013.
- UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7ª edição. Porto Alegre: Grupo A, 2014.
- BIM, Edson. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 4ª edição. São Paulo: Grupo GEN, 2018.
- DUARTE, A. **Manual de Motores Elétricos**. São Paulo: Editora Técnica, 2019.
- HUGHES, A. **Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications**. 3ª edição. Oxford: Newnes, 2006.
- NASAR, S. A.; BOLDEA, I. **Electric Machines and Drives: A First Course**. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- TRACTIAN. **Motor em curto-circuito, como saber?**, 2023. Disponível em: <https://tractian.com/>. Acesso em: 15 jun. 2023.
- MARQUES, Luiz Felipe Baldo; EGERT, Fabrício Antônio. **Manutenção preditiva de motores trifásicos de indução através da análise de assinatura de corrente e fluxo magnético**. Anais do Salão de Ensino e de Extensão, 2016. Disponível em: https://online.unisc.br/acadnet/anais/index.php/salao_ensino_extensao/article/view/15417. Acesso em: 19 jun. 2023.
- NASCIMENTO SERVICE, N. **Impregnação de motor a vácuo**. Youtube. 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gkuNiUcx7A>. Acesso em: 4 mar. 2023.
- DUARTE, Bruno F. **Análise da Condição e Diagnóstico de Avarias em Motores Elétricos para Efeitos de Manutenção Preventiva**. Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Nova Lisboa, Lisboa, 2019. p. 32-33.
- FURTADO, Henrique S. **Supervisão E Controle De Um Processo De Impregnação De Estatores Para Motores Elétricos**. Monografia (graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. p. 14-18.
- SIDDIQUE, A., YADAVA, G. S., & SINGH, B. **A review of stator fault monitoring techniques of induction motors**. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20 (2005). p. 01.
- CITY MACHINE TECHNOLOGIES. **Two varnish processes available for motors: Dip and Bake and Vacuum Pressure Impregnation**. 2020. Disponível em: <https://www.cmtcompanies.com/2020/02/two-varnish-processes-available-for-motors-dip-and-bake-and-vacuum-pressure-impregnation>. Acesso em: 26 jun. 2023.

LN ELECTRIC. **What you need to know about electrical motors and VPI.** 2020. Disponível em: <https://www.lnelectric.com/2020/11/what-you-need-to-know-about-electrical-motors-and-vpi>. Acesso em: 26 jun. 2023.

CITY MACHINE TECHNOLOGIES. **What is VPI? What is dip and bake?**. 2015. Disponível em: <https://www.cmtcompanies.com/2015/07/what-is-vpi-what-is-dip-and-bake>. Acesso em: 26 jun. 2023.

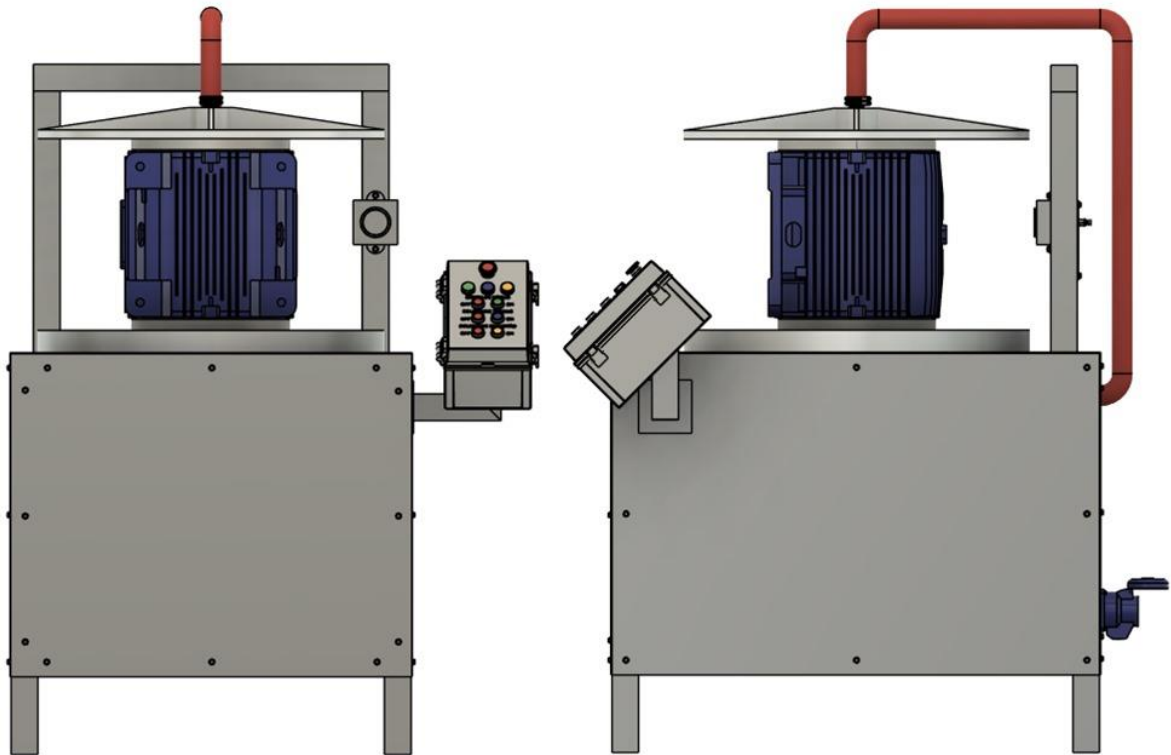
WEG. **Motores Elétricos** - 5ª Edição Atualizada. 2019.

WEG. **Motores elétricos: guia de especificação.** 2023.

WEG. **Danos em enrolamentos de motores trifásicos.** 2023.

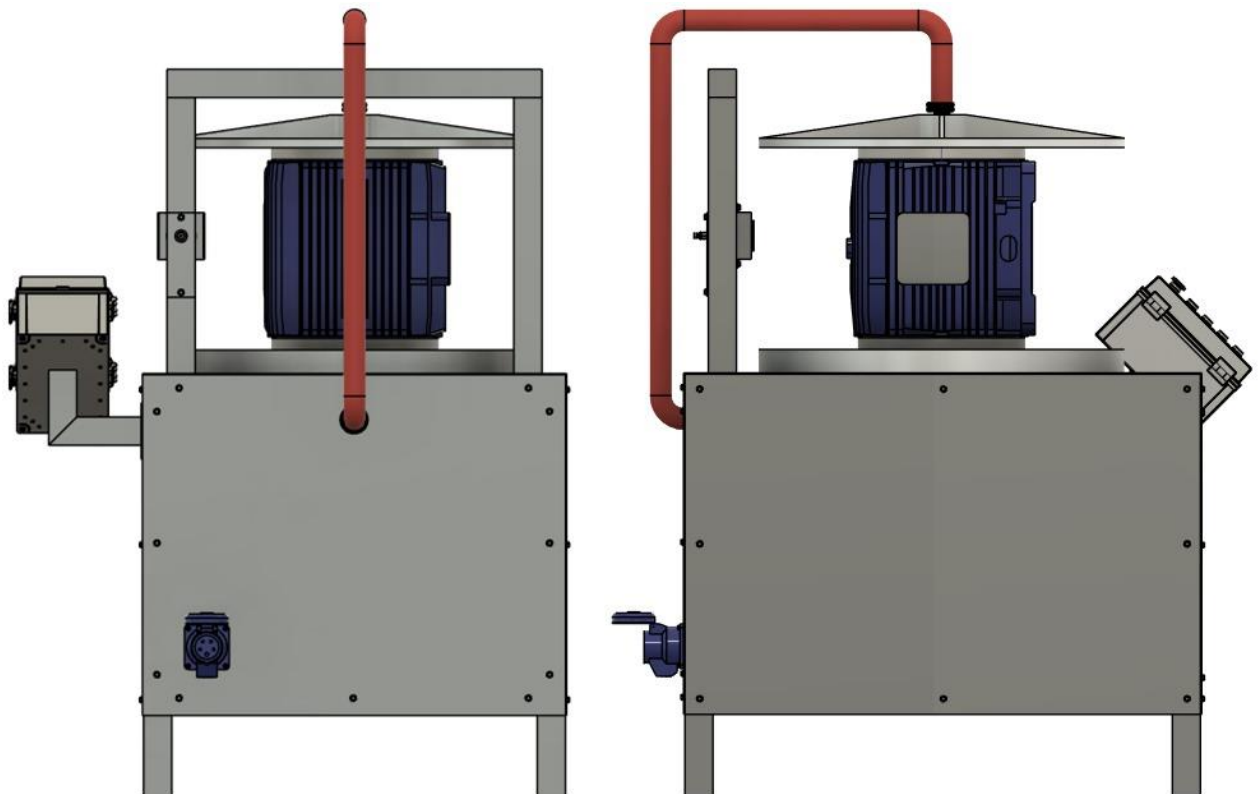
APÊNDICE A – Vistas do conjunto da máquina.

Figura 12 - Vistas frontal e lateral direita



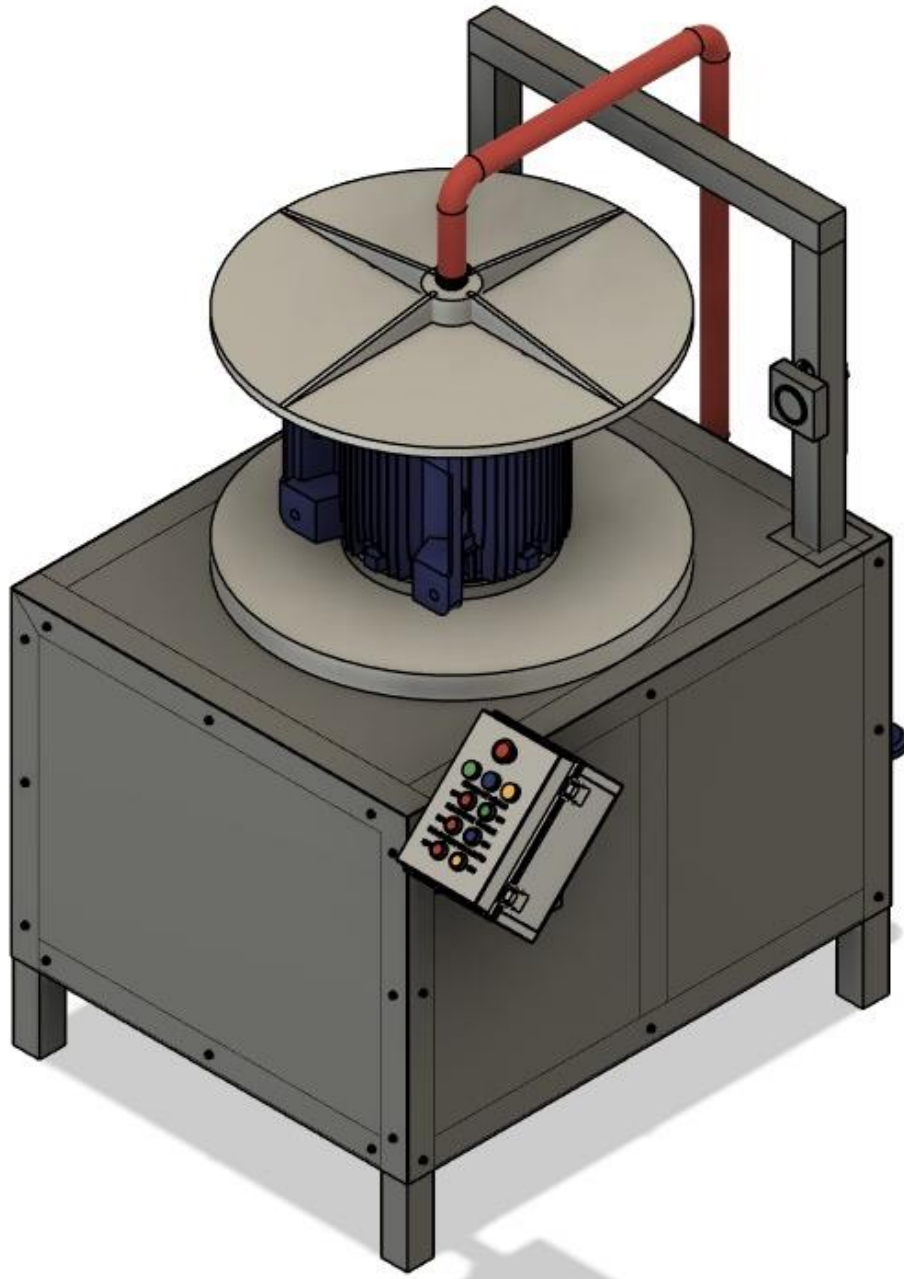
Fonte: Aatoria própria (2024)

Figura 13 - Vistas traseira e lateral esquerda



Fonte: Aatoria própria (2024)

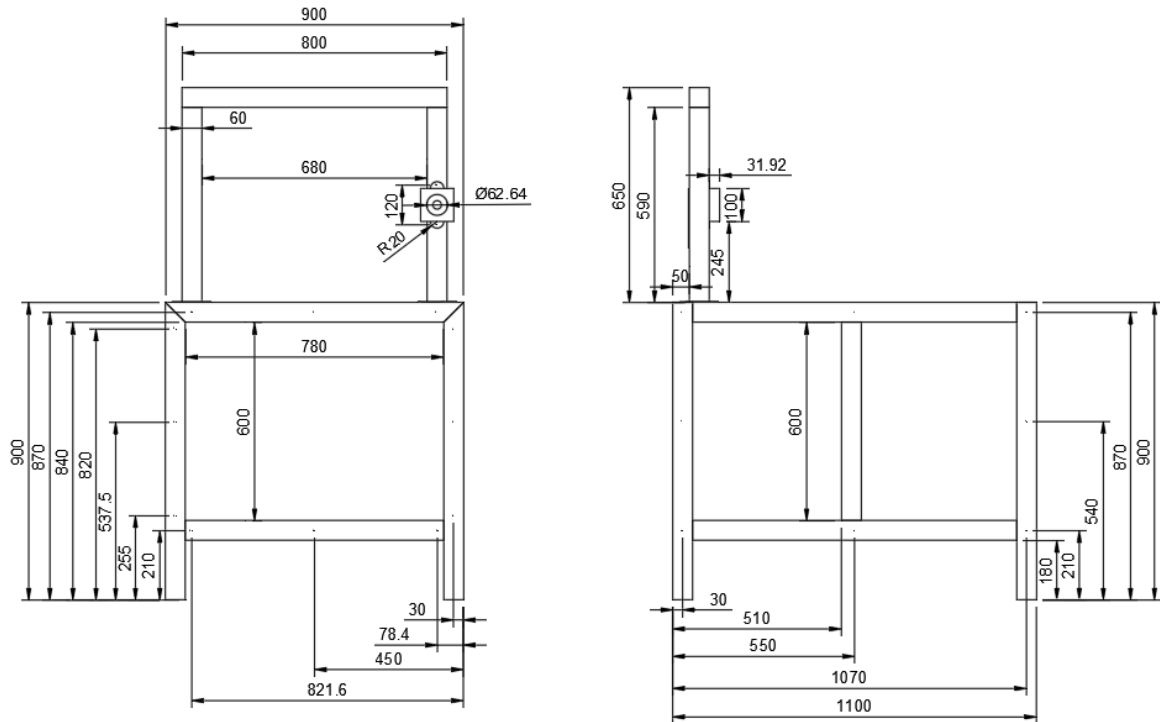
Figura 14 - Vista em perspectiva



Fonte: Autoria Própria (2024)

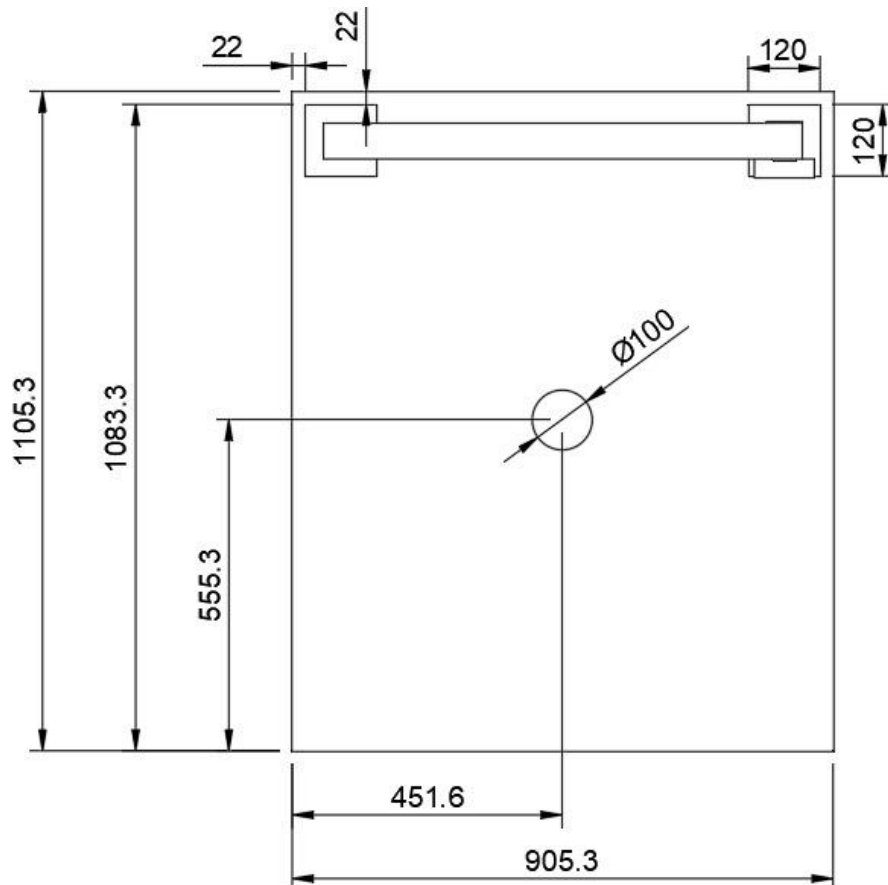
APÊNDICE B – Cotas dos componentes da estrutura metálica.

Figura 15 - Desenho técnico da estrutura metálica, com vistas frontal e lateral esquerda



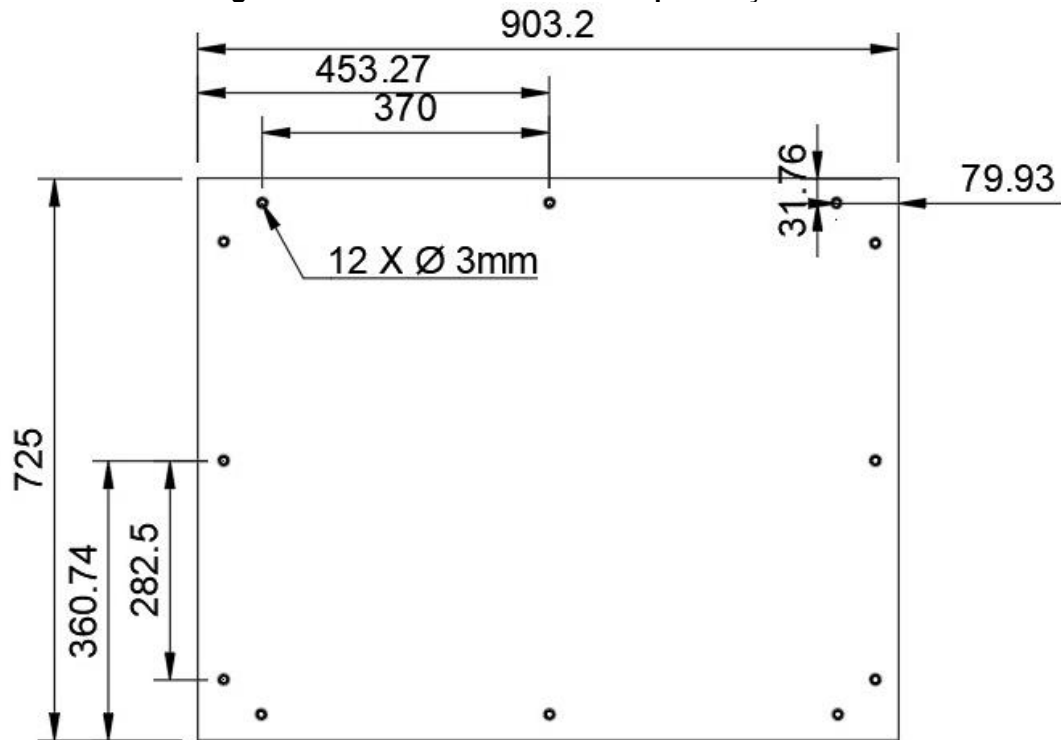
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 16 - Desenho técnico da estrutura metálica com vista superior



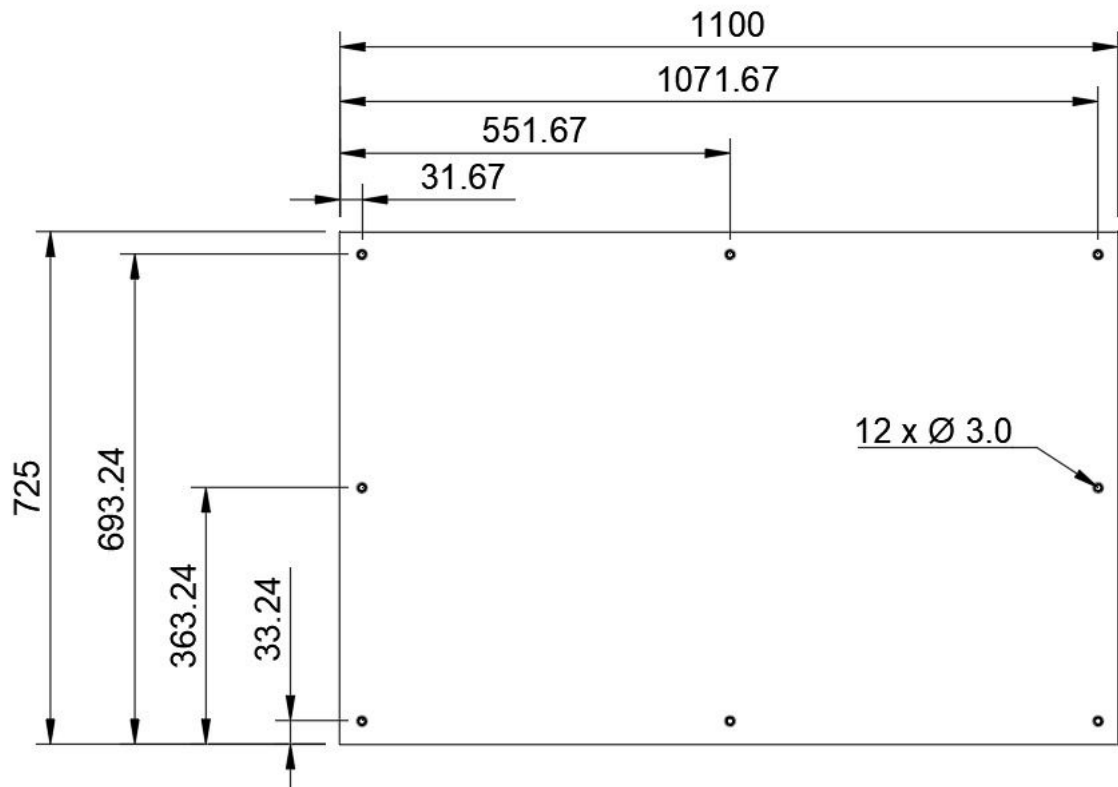
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 17 - Desenho técnico da chapa de aço frontal



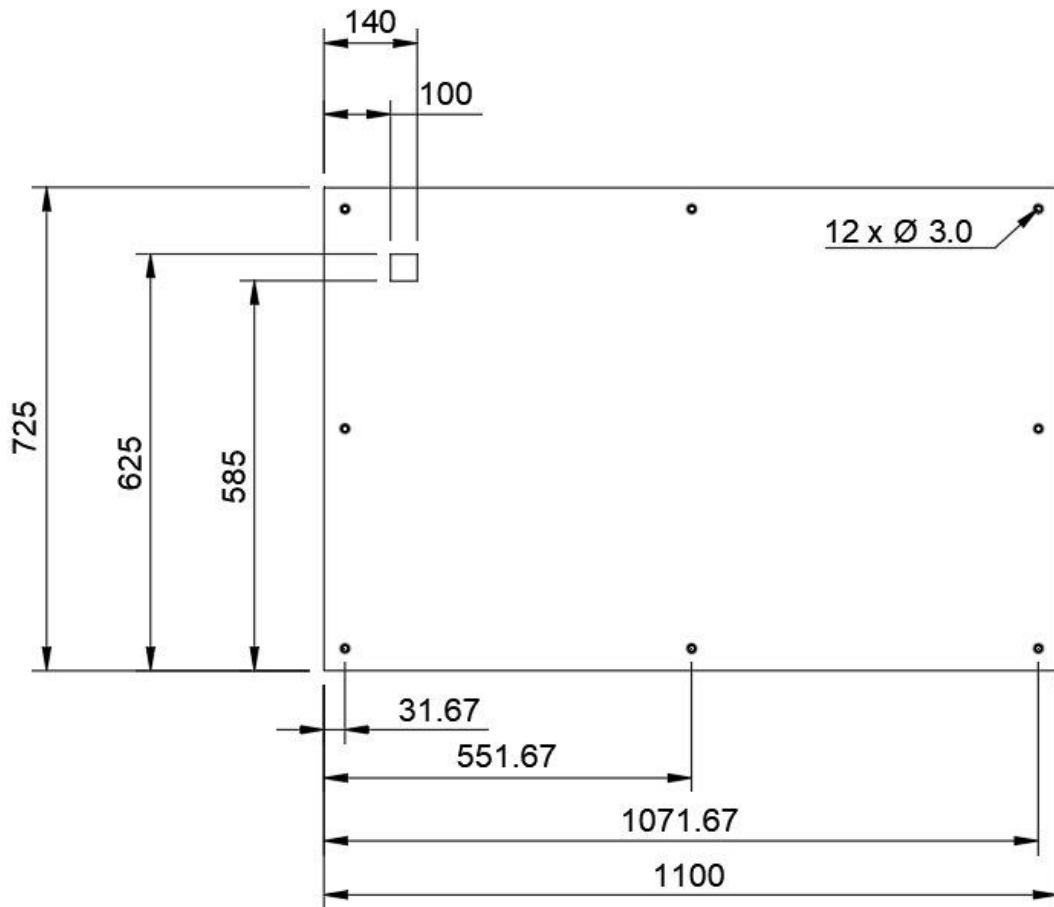
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 18 - Desenho técnico da chapa de aço lateral esquerda



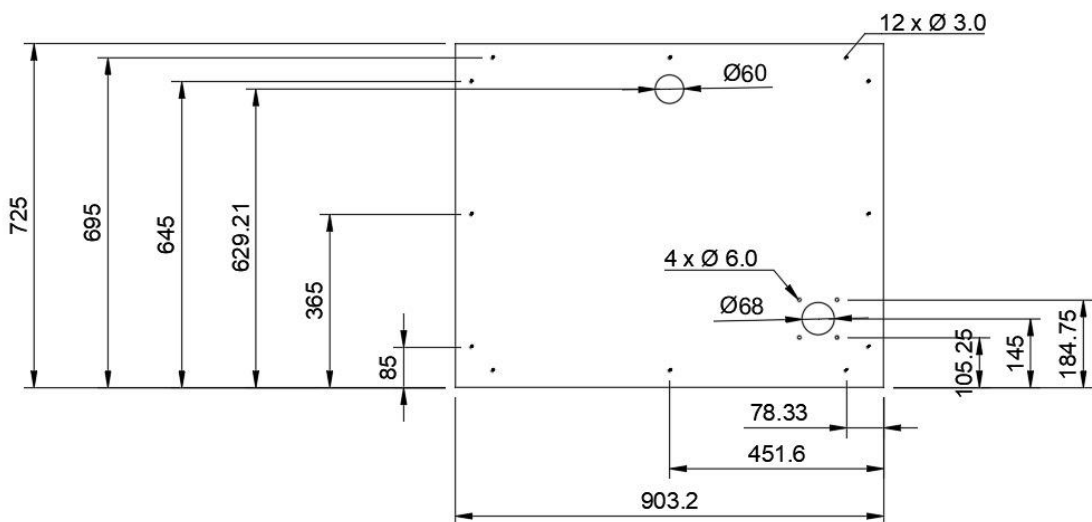
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 19 - Desenho técnico da chapa de aço lateral direita



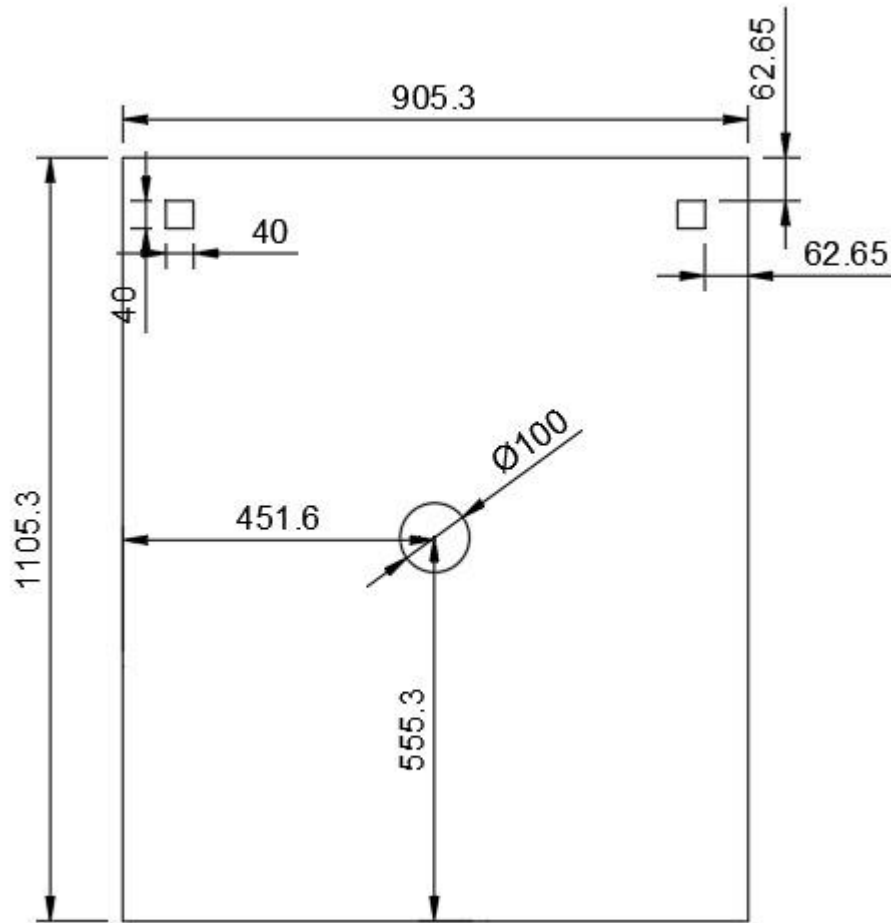
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 20 - Desenho técnico da chapa de aço traseira



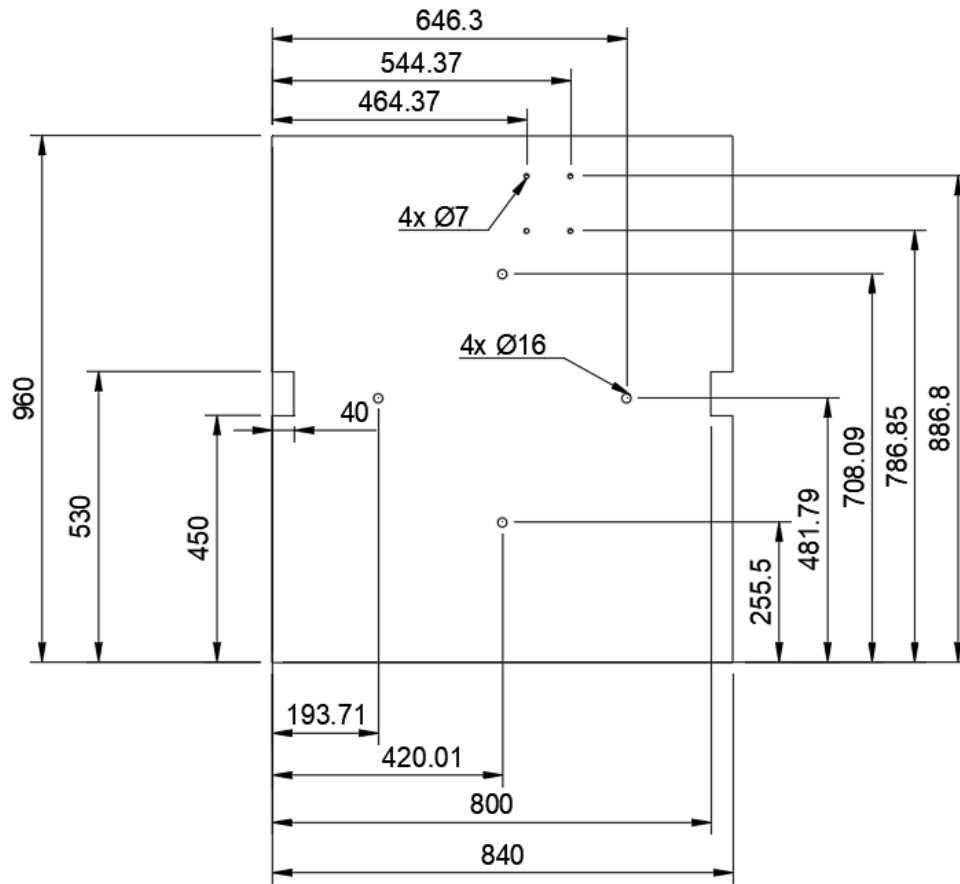
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 21 - Desenho técnico da chapa de aço de topo



Fonte: Autoria própria

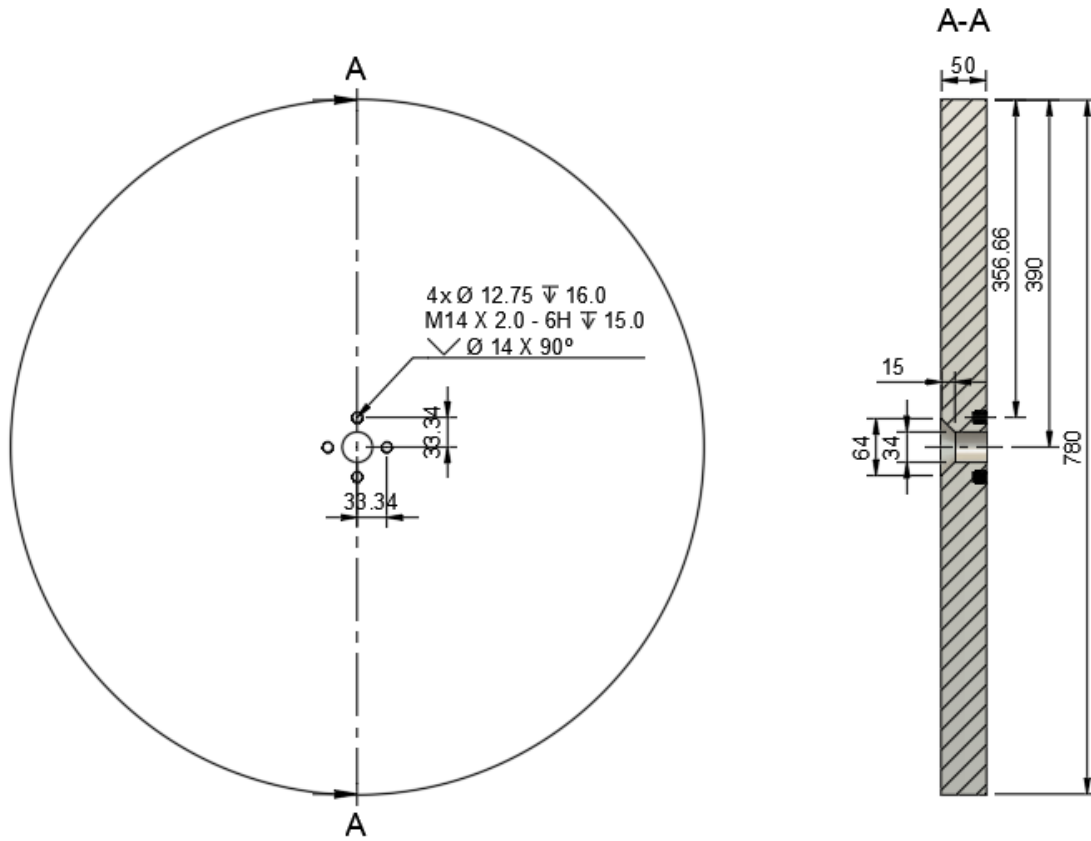
Figura 22 - Desenho técnico da chapa de aço de base



Fonte: Autoria própria

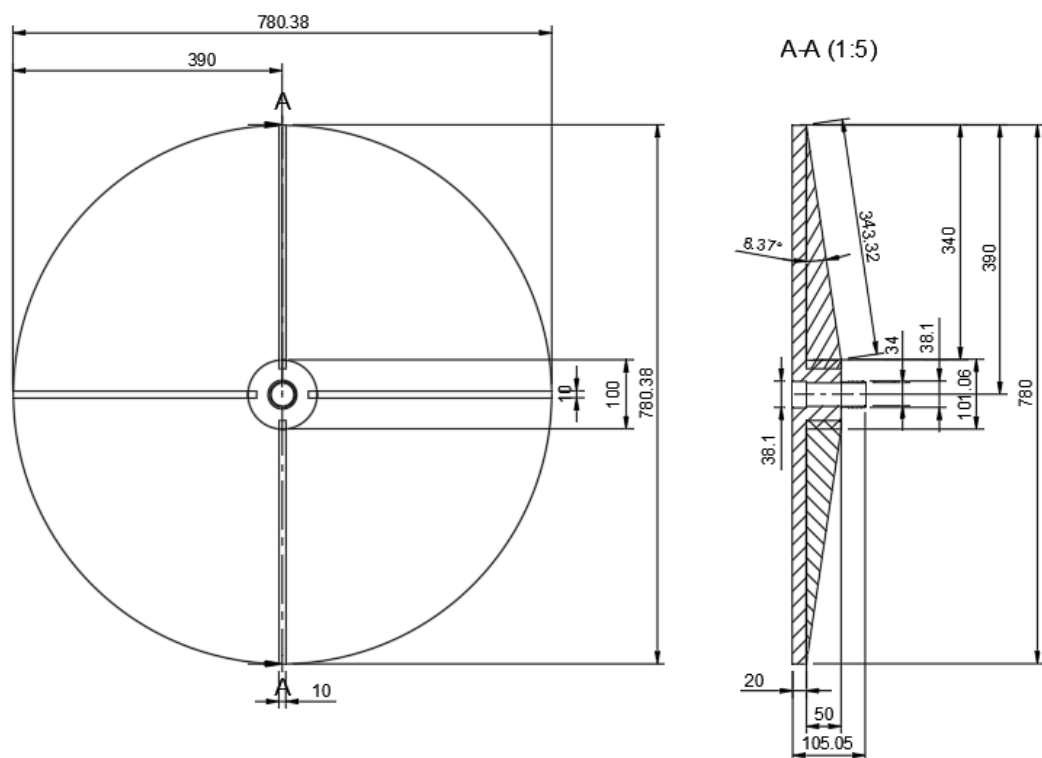
APÊNDICE C – Cotas dos discos de acoplamento.

Figura 23 - Desenho técnico do disco de acoplamento inferior



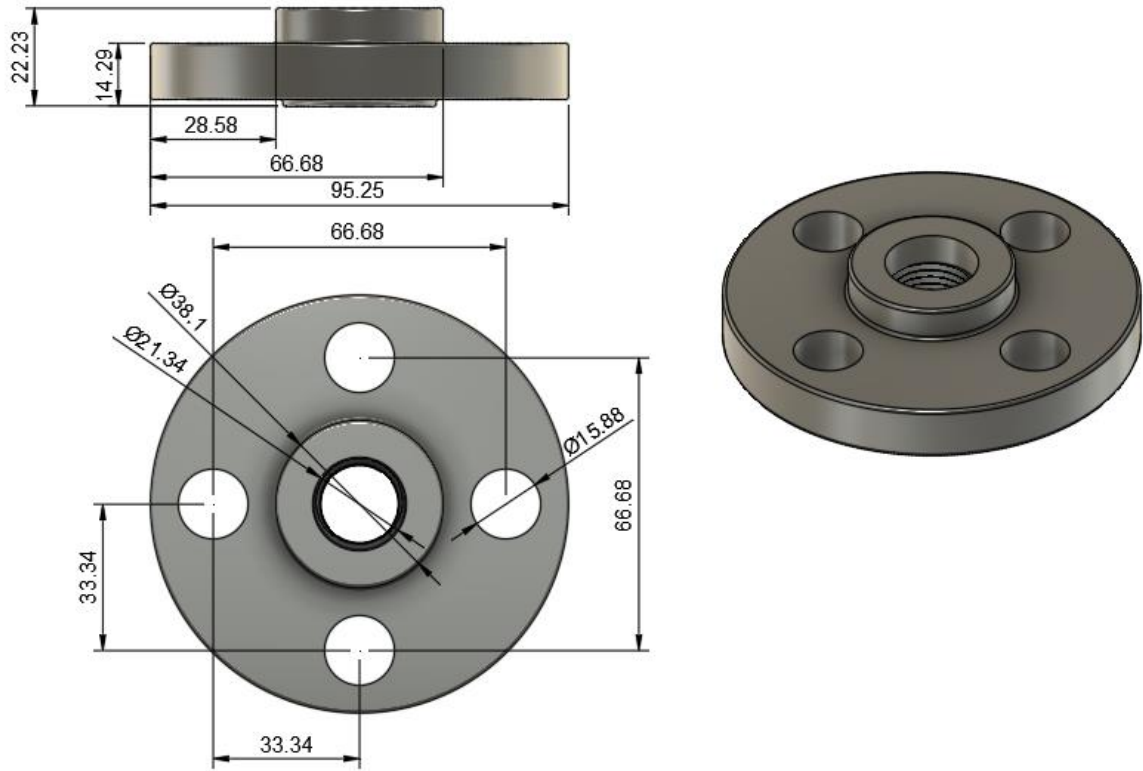
Fonte: Autoria própria

Figura 24 - Desenho técnico do disco de acoplamento superior



Fonte: Autoria própria (2024)

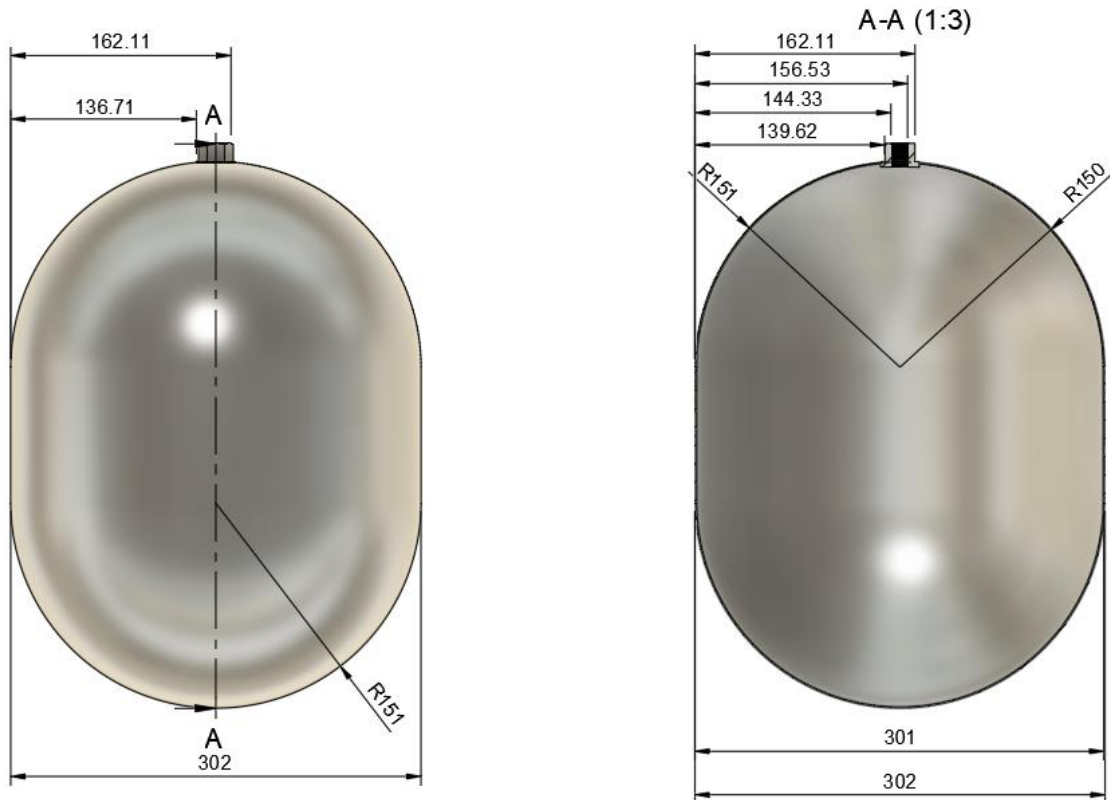
Figura 25 - Desenho técnico da flange de adaptação do tubo rígido com o disco de acoplamento inferior



Fonte: Autoria própria (2024)

APÊNDICE D – Cotas do tanque de armazenamento de impregnante.

Figura 26 - Desenho técnico do tanque de armazenamento de impregnante



Fonte: Autoria própria (2024)