



Universidade do Estado do Amazonas
Escola Superior de Tecnologia
Departamento de Engenharia de Controle e Automação

Heloísa Ribeiro Alves

**APLICAÇÃO DE VÁLVULAS PNEUMÁTICAS EM
SISTEMA DE GERAÇÃO DE VÁCUO: UM ESTUDO
DE CASO DA INDÚSTRIA**

Manaus-AM
Julho de 2021

Universidade do Estado do Amazonas
Escola Superior de Tecnologia
Departamento de Engenharia de Controle e Automação

Heloísa Ribeiro Alves

**APLICAÇÃO DE VÁLVULAS PNEUMÁTICAS EM
SISTEMA DE GERAÇÃO DE VÁCUO: UM ESTUDO
DE CASO DA INDÚSTRIA**

Projeto de Pesquisa desenvolvido durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Farias Araújo
Coorientador: Prof. Dr. Almir Kimura Junior

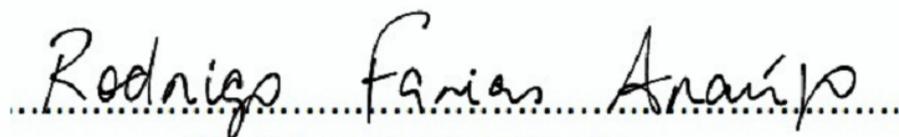
Manaus-AM
Julho de 2021

Heloísa Ribeiro Alves

APLICAÇÃO DE VÁLVULAS PNEUMÁTICAS EM SISTEMA DE GERAÇÃO DE VÁCUO: UM ESTUDO DE CASO DA INDÚSTRIA

Projeto de Pesquisa desenvolvido durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Aprovado em 28 de julho de 2021.



Rodrigo Farias Araújo



Cleto Cavalcante De Souza Leal



Israel Mazaira Morales



Aristides Rivera Torres

Agradecimentos

Os primeiros agradecimentos são dedicados à Universidade do Estado do Amazonas, à diretora da Escola Superior de Tecnologia Ingrid Gadelha por todo apoio.

À coordenação do curso de Engenharia de Controle e Automação, que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho, em especial o coordenador Dr. Israel Mazaira Morales e ex-coordenador Msc. Charles Luiz da Silva Melo (em memória), que estiveram presente na minha trajetória durante o curso.

Ao meu orientador professor Dr. Rodrigo Farias Araújo e coorientador Dr. Almir Kimura Junior, por toda ajuda e acreditarem na minha capacidade de realizar esse estudo.

Aos meus pais, meus irmãos e meu namorado, por todo apoio nessa jornada.

Aos meus amigos, sem eles eu não teria chegado até aqui, em especial Diego Sena, Márcio Andrade e Robson Alves, que me ajudaram com conhecimento técnico, e à Andie Higa, Vitor Gadelha e Mateus Ramos, por me ajudarem a manter o foco e a segurança durante o processo de desenvolvimento.

Resumo

As bombas de vácuo são bastante utilizadas na indústria afim de realizar o transporte de materiais no abastecimento das linhas de produção. Para obter bons resultados de produção, é necessário que seja realizadas atividades de manutenções para manter o equipamento em condições mais básicas, evitando assim que a linha fique parada de forma não planejada, gerando um desperdício de dinheiro. Afim de reduzir custos com manutenções e perdas não planejadas, propõe-se um estudo de aplicação de válvulas geradoras de vácuo em uma indústria de bens de consumo de selagem quente, substituindo as bombas de vácuo de palhetas rotativas presentes no sistema.

Palavras-Chave: Bombas de vácuo. Palhetas rotativas. Geradora de Vácuo. Eletropneumática.

Abstract

Vacuum pumps are widely used in industry in order to carry out the transport of materials in the supply of production lines. In order to obtain good production results, maintenance activities must be carried out to keep the equipment in the most basic condition, thus preventing the line from being stopped in an unplanned manner, generating a waste of money. In order to reduce costs with maintenance and unplanned losses, a study of the application of vacuum generating valves in a hot sealing consumer goods industry is proposed, replacing the rotary vane vacuum pumps present in the system.

Keywords: Vacuum Pump. Sliding Vane. Vacuum Generators. Electropneumatics.

Lista de Figuras

2.1	Sistema de ar comprimido.	15
2.2	Motor e compressor.	15
2.3	Válvulas direcionais.	16
2.4	Símbolos dos operadores elétricos.	17
2.5	Símbolos dos operadores em válvula.	17
2.6	Outros símbolos de componentes.	18
2.7	Tipos de bombas de vácuo.	20
2.8	Estrutura e componentes da bomba de vácuo por deslocamento positivo com palhetas.	20
2.9	Tempo médio entre falhas.	22
3.1	Máquina de selagem de embalagens, HSA 50d.	23
3.2	Estação de abastecimento de cartão.	24
3.3	Produtos embalados na HSA 50d.	24
3.4	Circuito eletropneumático sistema de vácuo com bomba.	26
3.5	Estação em <i>RESET</i>	27
3.6	Largada de cartão.	28
3.7	Becker VT4.8.	29
3.8	Palhetas Becker VT4.8.	29
3.9	Geradora de vácuo VAK 1/4 6890 FESTO.	30
3.10	Circuito eletropneumático sistema de vácuo com geradora.	31
3.11	Estação em <i>RESET</i>	32
3.12	Largada de cartão.	33
4.1	Fluxo de estações HSA 50d	34
4.2	Desgaste das palhetas. À esquerda, uma palheta nova e à direita, uma desgastada.	35
4.3	Circuito com a bomba, antes da modificação.	36
4.4	Circuito com válvula geradora de vácuo, após modificação	37
4.5	Custo de manutenção para 2 anos com a bomba e com a válvula, em Reais.	38
4.6	MTBF com a bomba, entre fevereiro e abril de 2020.	39
4.7	MTBF com a geradora, entre dezembro de 2020 e fevereiro 2021.	40
4.8	Comparativo entre os MTBF's realizados.	40

Lista de Tabelas

2.1	Faixas de pressão de vácuo.	18
3.1	Possíveis problemas encontrados em bomba de vácuo de deslocamento positivo com palhetas.	29
4.1	Faixa de vácuo dos componentes.	35
4.2	Comparativo: manutenção para a bomba e para válvula.	38
4.3	Modificações de acionamento elétrico no painel	39

Sumário

1	Introdução	9
1.1	Sistemas de vácuo e a Indústria	9
1.2	Trabalhos relacionados	10
1.2.1	Operações de produção de superfície: Capítulo 5 - Bombas rotativas	10
1.2.2	Desenvolvimento e controle de um sistema de refrigeração por compressão de vapor de mesoescala	10
1.2.3	Operação e manutenção de um sistema de vácuo bombeado por difusão	11
1.2.4	Sobre alguns aspectos do projeto de bombas de palhetas rotativas .	11
1.2.5	Bombas de palhetas e raízes rotativas apoiadas por bombas de diafragma - progresso em aplicações corrosivas e requisitos de vácuo limpo	11
1.3	Motivação do trabalho	12
1.4	Objetivo	13
1.4.1	Geral	13
1.4.2	Específicos	13
1.5	Estrutura da Monografia	13
2	Referencial Teórico	14
2.1	Sistemas eletropneumáticos	14
2.2	Sistemas de vácuo	17
2.3	Manutenção e confiabilidade	19
3	Metodologia	23
3.1	Estudo do sistema	23
3.2	Sistema proposto	27
4	Resultados	34
5	Conclusão	41
5.1	Trabalhos Futuros	42
	Referências Bibliográficas	43

1 Introdução

1.1 Sistemas de vácuo e a Indústria

Os avanços da tecnologia nas últimas décadas revolucionaram não apenas a vida da população, mas também da indústria e os métodos de produção dos mais variados tipos de produtos. A automação tornou-se cada vez mais comum, melhorando antigos processos de fabricação e abrindo espaço para novos meios de execução de determinadas atividades, reduzindo o número de mão de obra humana e aumentando a produtividade. Com isso, processos manuais puderam ser substituídos por máquinas e outros sistemas, tornando-os automatizados.

Já no âmbito das indústrias de bens de consumo, diversos sistemas para transporte de matéria prima são utilizados para reduzir o contato das pessoas com os produtos. Por exemplo, na indústria alimentícia, sistemas de vácuo são aplicados não apenas para embalagens à vácuo, garantindo uma maior durabilidade do produto, mas também servem para: o transporte dos alimentos e das matérias primas que constituem as embalagens, posicionamento dos mesmos nas linhas de produção e também ao longo do tratamento químico necessário para aquele item produzido (VINICIUS, 2016).

A substituição da mão de obra humana, ou a melhoria de um sistema já existente por um sistema automatizado, acarretará em novos custos de produção e diferentes ações serão necessárias para o novo processo. No entanto, as máquinas e sistemas precisam de planos de manutenção para manter o bom desempenho e prolongar sua vida útil, mas ainda estão sujeitos à falhas, de acordo com as condições em que operam. Um sistema de vácuo já automatizado também pode passar por melhorias a fim de atender o processo, seja reduzindo custos ou diminuindo problemas que determinado componente pode gerar. Por exemplo, podemos utilizar válvulas pneumáticas para gerar o vácuo responsável pelo transporte de embalagens ao invés de bombas de vácuo.

1.2 Trabalhos relacionados

1.2.1 Operações de produção de superfície: Capítulo 5 - Bombas rotativas

Neste capítulo da publicação, o autor em (STEWART, 2019) abrange toda a teoria por trás de bombas rotativas, desde os princípios de engenharia às configurações mais usadas. Os tipos de bombas rotativas, distribuí-se em três: rotor excêntrico, bombas de engrenagem e bombas de parafuso.

As bombas de rotor excêntrico são mais práticas quando aplicadas em indústrias de óleo de gás por conta de sua estrutura e é dividida em duas categorias: palheta deslizante e palheta flexível. Comumente mais usada nas indústrias destacadas acima, a bomba consiste de uma estrutura excêntrica com alojamentos para as palhetas, que deslizam para dentro e para fora do rotor, mantendo contato com o envoltório. O fluido é preso entre as palhetas, pressionado-o da porta de sucção para a porta de descarga, sendo capazes de manter uma taxa de fluxo constante e pressão de descarga uniforme. Além disso, estas bombas trabalham muito bem com fluido de baixa viscosidade, porém não são adequados fluidos com alta viscosidade, uma vez que atrapalham no deslizamento das palhetas.

1.2.2 Desenvolvimento e controle de um sistema de refrigeração por compressão de vapor de mesoescala

O autor em (JONG, 2013) propõe o desenvolvimento de compressor para um sistema refrigerado de compressão em mesoescala. É analisado que um compressor complexo seria mais difícil para montar o sistema, logo uma estrutura mais simples seria a melhor escolha. Assim, JONG (2013) dividiu os compressores em duas categorias: compressores dinâmicos ou de deslocamento positivo. Compressores dinâmicos não garantem alta pressão em uma baixa taxa de fluxo, ao contrário dos compressores de deslocamento positivo.

Os compressores de deslocamento positivo consistem em duas divisões: palheta fixa e palheta deslizante. Em ambos os tipos, o rotor é centralizado em relação a um envoltório redondo. No caso das palhetas deslizantes, as palhetas deslizam para dentro e para fora do envoltório dentro do cilindro.

Sendo assim, é apresentado a estrutura da bomba de vácuo, o deslocamento das palhetas e o modelo utilizado no trabalho, prosseguindo com as equações utilizadas para dar continuidade no sistema de compressão em mesoescala.

1.2.3 Operação e manutenção de um sistema de vácuo bombeado por difusão

O autor apresenta em (HOFFMAN, 1979) que a proposta inicial do artigo consiste em apresentar experiências obtidas com diversas tecnologias de vácuo para evitar a contaminação do processo de geração de vácuo de uma bomba de difusão por fluidos orgânicos, elastômeros selantes e graxas. Quando o sistema está saturado, é gerada uma alta velocidade de fluxo na câmara da bomba. Com a pressão alta do vapor, parte do óleo retorna para a câmara, contaminando não apenas a linha de transporte como a própria câmara. Para evitar o retorno do óleo, é proposto a utilização de uma armadilha utilizando nitrogênio, criando uma purga do gás, evitando criar regiões de fluxo viscosa que permitem esse retorno do óleo.

1.2.4 Sobre alguns aspectos do projeto de bombas de palhetas rotativas

Os autores em (RAMPRASAD; RADHA, 1973) apresentam um estudo sobre o desempenho de bombas de vácuo com palhetas rotativas, e propõe que um determinado “ângulo de marcha lenta”, um termo definido que influencia na eficiência volumétrica da bomba. No interior da bomba, o ar entra na câmara e de acordo com seu deslocamento ele é comprimido pelas palhetas e liberado pela porta de descarga. Durante uma parte desse ciclo, onde não há compressão do ar, denominado “ângulo de marcha lenta”, nenhum trabalho é executado. A localização e a dimensão da porta de entrada do ar para a bomba pode influenciar no seu desempenho: quanto maior a abertura, maior a condutância; se a abertura for muito próxima à linha central, a resistência ao fluxo de ar será grande. Com isso, se estiver longe da linha central, a condutância é maior, tornando a sucção mais eficiente.

Porém, para um tamanho de estator e rotor específico, quanto mais próximo a abertura de entrada estiver da linha central, maior será o ângulo de marcha lenta. Dessa forma, os autores concluem que se ângulo da marcha lenta fosse reduzido a zero, ou seja, a porta de entrada localizada de modo que a sucção terminasse com as palhetas na horizontal, a eficiência da bomba aumentaria.

1.2.5 Bombas de palhetas e raízes rotativas apoiadas por bombas de diafragma - progresso em aplicações corrosivas e requisitos de vácuo limpo

Os autores em (ECKLE; BICKERT; LACHENMANN, 1995) apresentam alguns problemas que envolvem bombas de reforço e bombas de palhetas rotativas, como a

contaminação por retorno do óleo e quando vapores corrosivos são bombeados dentro do sistema, propondo então que colocar uma bomba tipo diafragma em série com os dois tipos mencionados anteriormente, as propriedades das bombas seriam combinadas e aumentaria a resistência química do sistema.

As bombas de diafragma mostraram excelente performance quanto à corrosão e limpezas, além de serem livres de óleo e podem ser constituídas de materiais com alta resistência a ataques químicos. Quando combinadas em um sistema híbrido com bombas de palhetas rotativas e/ou bombas de reforço, o sistema vai obter as vantagens individuais de cada bomba sem as desvantagens das faixas de vácuo inadequadas. Outro ponto bastante relevante é que esse sistema híbrido pode ser utilizado sem a necessidade de outros acessórios, e também reduz os custos de manutenção, uma vez que os problemas de contaminação e corrosão serão reduzidos.

1.3 Motivação do trabalho

Sabe-se que qualquer equipamento, com o passar dos anos, torna-se obsoleto. Mesmo que seja feita a troca de componentes, o sistema torna-se ultrapassado em relação a novas versões e modelos. Contudo, reparos e manutenções são essenciais para que a vida de uma máquina seja prolongada. Os sistemas de vácuo de equipamentos de selagem de uma empresa de bens de consumo possui como componente principal bombas de vácuo, cujos defeitos são bastante frequentes e o custo de manutenção preditiva mais elevados, além de necessitarem de ações corretivas recorrentes.

O sistema de vácuo atual de máquinas de selagem de embalagens, a ser descrito no texto, constantemente apresenta falha no vácuo utilizado para transporte dos materiais. Estas falhas, em sua grande maioria, são causadas por anormalidades da bomba de vácuo que atua diretamente nesse sistema. Assim, devido ao uso excessivo do equipamento para atender a demanda do mercado são necessárias manutenções cada vez mais frequentes, gerando um alto custo devido a substituição de peças e até mesmo da própria bomba, a qual possui um preço elevado.

Sendo assim, este trabalho propõe verificar a possibilidade de reduzir as falhas de processo presentes nas estações de vácuo do equipamento estudado, os custos e frequências das manutenções por meio da substituição das bombas de vácuo por válvulas pneumáticas geradoras de vácuo.

1.4 Objetivo

1.4.1 Geral

Aprimorar o sistema de vácuo de equipamentos de selagem de embalagens substituindo as bombas de vácuo por válvulas pneumáticas geradoras de vácuo.

1.4.2 Específicos

- Estudar o sistema de vácuo do equipamento.
- Projetar as modificações do sistema pneumático e elétrico necessárias para a melhoria.
- Analisar planos de manutenção necessários para o componente atual, seus custos de execução (peças extras) e quais seriam necessários após a substituição.
- Executar a troca dos componentes, mecanicamente e eletronicamente no sistema.
- Apresentar os resultados das modificações propostas.

1.5 Estrutura da Monografia

Os capítulos a seguir vão dar continuidade ao desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico utilizada pela monografia. Em seguida o Capítulo 3 discute sobre o estudo do sistema, as informações do circuito utilizando a bomba de vácuo e a proposta de modificação. No Capítulo 4, serão levantados os resultados e discussões acerca do estudo realizado. Por fim, o Capítulo 5 aborda o fechamento desta monografia e propõe trabalhos futuros que podem ser realizados a partir deste estudo.

2 Referencial Teórico

Neste capítulo serão abordadas as referências teóricas utilizadas como base para o desenvolvimento do estudo, tais como sistemas eletropneumáticos, sistemas de vácuo, manutenção e confiabilidade.

2.1 Sistemas eletropneumáticos

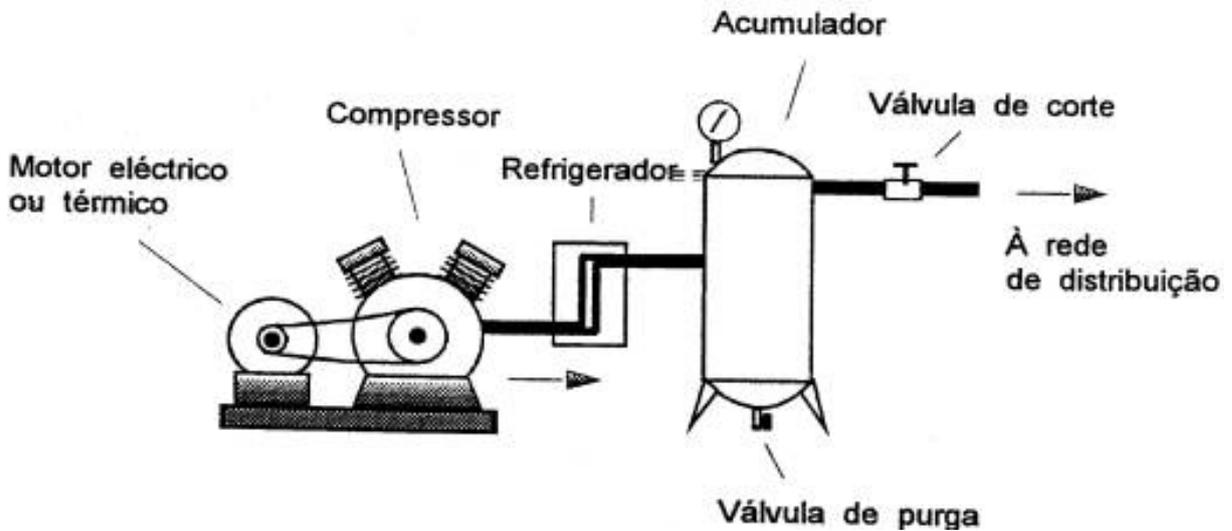
A palavra Pneumática tem sua origem vinda do grego *Pneumos* ou *Pneuma*, que significa respiração ou sopro. Essa é a área da física que abrange a dinâmica e fenômenos de gases e vácuo. Na Engenharia envolve o estudo e uso de gases comprimidos. A utilização de gases comprimidos é bastante utilizada na indústria, através de compressores, tendo uma variedade de aplicações em máquinas e componentes que necessitam do mesmo para seu funcionamento (PAVANI, 2011). Particularmente, o gases mais utilizado é o próprio ar atmosférico.

Os circuitos eletropneumáticos são sistemas que utilizam componentes pneumáticos e são controlados por sistemas elétricos. Nesse caso, são divididos em duas partes:

- Circuito pneumático: composto por atuadores, válvulas, mangueiras, e outros componentes pneumáticos presentes no sistema;
- Circuito elétrico de comando: formado pelos equipamentos elétricos responsáveis pelo controle do sistema, como relés, chaves eletromecânicas, bobinas, controladores lógicos programáveis.

Todo sistema eletropneumático precisa de compressores para funcionar. Compressores são máquinas que aumentam a pressão em um determinado volume de ar, atingindo as condições necessárias para o funcionamento do sistema. Não é necessário que um compressor esteja dedicado a um equipamento em específico, pois geralmente há um conjunto deles fazendo parte de um sistema de transmissão de ar comprimido para abastecer vários equipamentos ao mesmo tempo. Figura 2.1 ilustra um modelo simples de como é estruturado o sistema de ar comprimido, o qual é formado por um compressor que passa o ar comprimido para o refrigerador e então sendo armazenado no acumulador ou reservatório, que possui a válvula de corte da conexão com a rede e também uma válvula de purga para eliminar água contida no ar, caso necessário.

Figura 2.1: Sistema de ar comprimido.

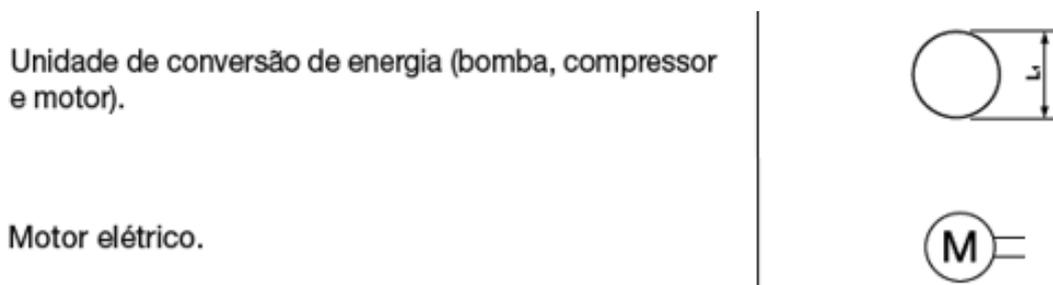


Fonte: JOAOBAPTISTA1201, S.D.

Para montagem dos circuitos pneumáticos existem duas categorias principais de componentes: atuadores e válvulas. Atuadores são responsáveis pela execução das ações, convertendo energia do ar comprimido em trabalho. Abaixo estão algumas classificações para esses itens:

- Lineares: convertem energia pneumática para movimento angular ou linear;
- Rotativo: motores pneumáticos e oscilantes, como por exemplo os elementos da Figura 2.2;

Figura 2.2: Motor e compressor.



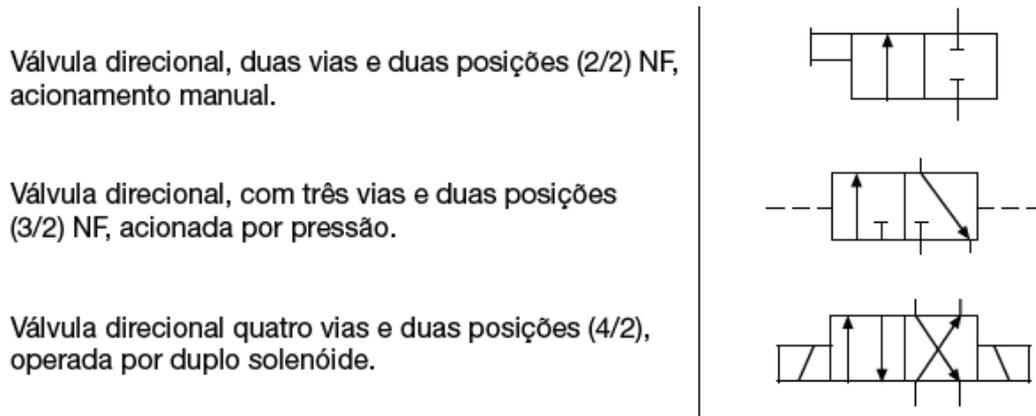
Fonte: PARKER HANNIFIN CORPORATION, S.D.a

- Cilindros: classificados pelo efeito ou construção, podem ser de simples ação, dupla ação, múltiplas posições, etc.

As válvulas são responsáveis por orientar e controlar os fluxos de ar. São divididas em quatro tipos:

- Controle direcional (Figura 2.3): orientam o fluxo de ar para onde deve seguir. Possui características como: número de posições - estados que ela pode executar e permanecer; número de vias - quantidade de conexões de trabalho que possui; tipos de acionamento - mecânico, pneumático, elétrico; vazão e tipo de retorno - ação para efetuar mudança de posição, muito comum uso de solenóides que realizam o acionamento da válvula quando energizados;

Figura 2.3: Válvulas direcionais.



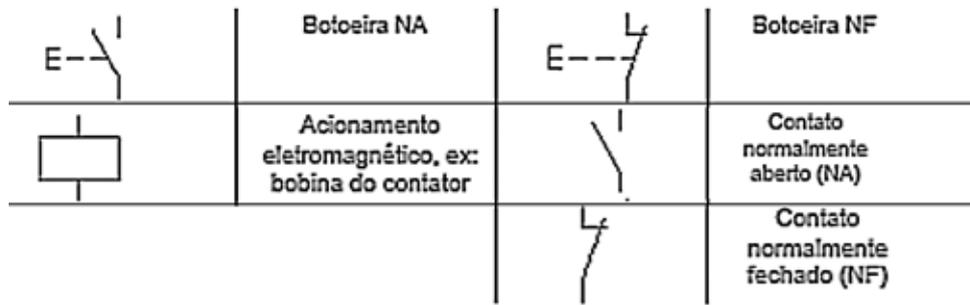
Fonte: PARKER HANNIFIN CORPORATION, S.D.a

- Bloqueio: impedem que o fluxo siga em uma determinado sentido, liberando para o sentido oposto.
- Controle de fluxo: são usadas quando necessita-se reduzir o fluxo de ar dentro de alguma parte específica do processo.
- Controle de pressão: também é chamada de válvula de segurança, está presente no armazenamento do ar comprimido para limitar que a pressão fique acima da capacidade, liberando parte do volume do reservatório.

Os circuitos elétricos são responsáveis por fazer o controle do circuito pneumático, através dos componentes elétricos e utilizando um CLP (Controlador Lógico Programável) ou microcontrolador, ampliando as possibilidades de criação de sistemas automáticos e permitindo que sejam feitos controles de movimentos e forças. Para realizar a mudança de posição das válvulas, é necessário a presença de elementos que possam realizar essa ação. Alguns dos componentes elétricos mais comuns são botoeiras, solenóides e motores, os símbolos que representam esses componentes nas mostrados nas Figuras 2.4 e 2.5.

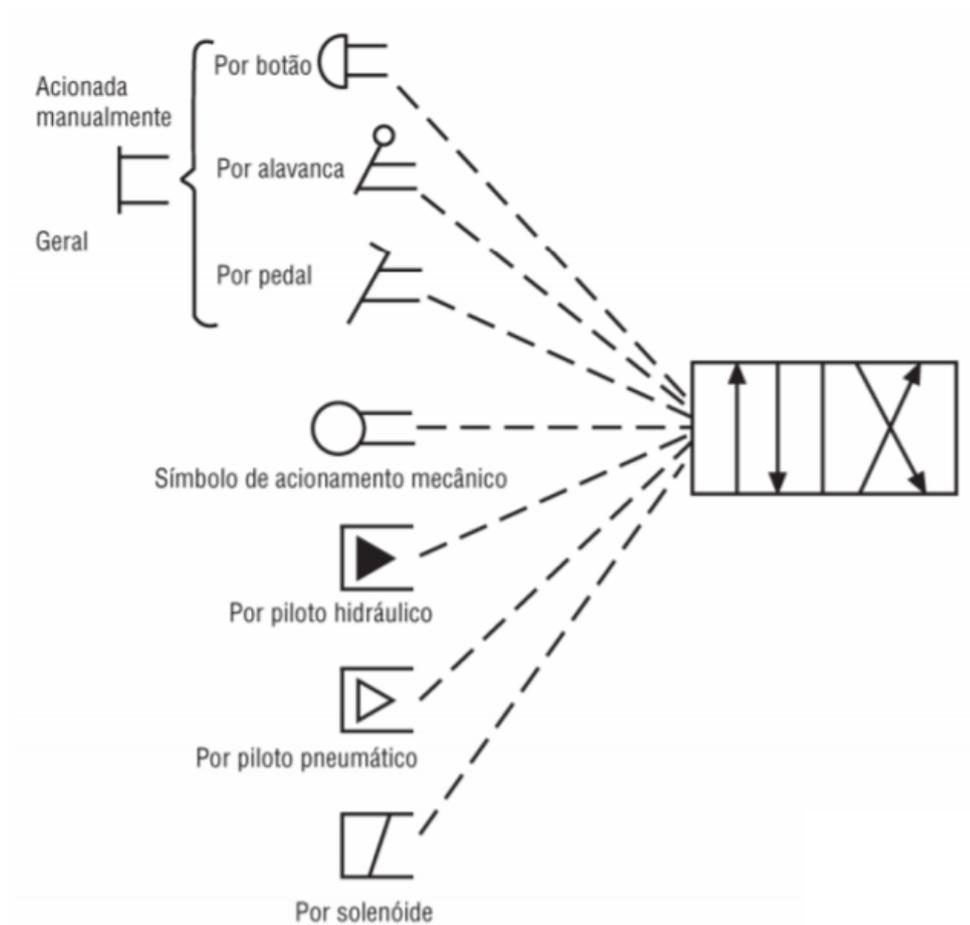
Outros componentes comumente utilizados em circuitos eletropneumáticos estão representados na Figura 2.6.

Figura 2.4: Símbolos dos operadores elétricos.



Fonte: HENRIQUE, S.D.

Figura 2.5: Símbolos dos operadores em válvula.

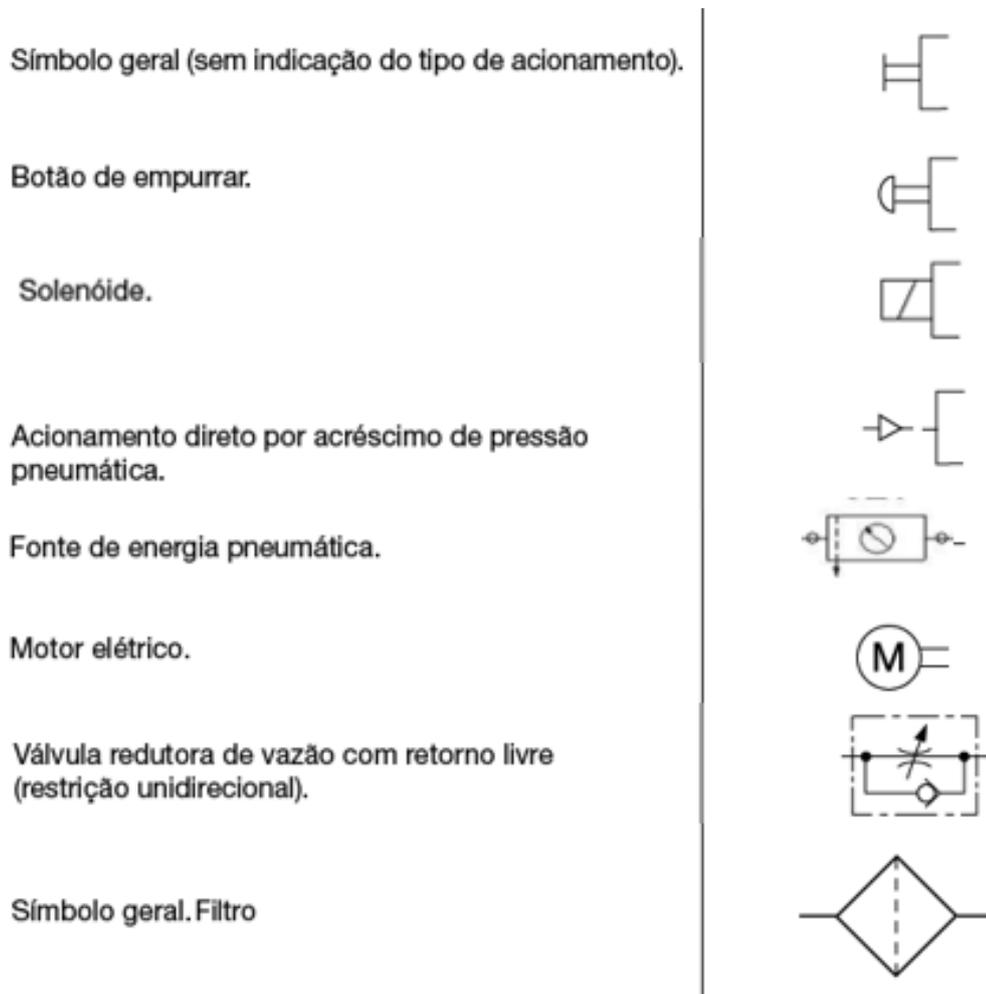


Fonte: PARKER HANNIFIN CORPORATION, S.D.b

2.2 Sistemas de vácuo

O vácuo é um palavra cujo significado seria absolutamente vazio, um espaço em que não há nada, isto é, nenhuma matéria. Uma vez que o vácuo consiste em absolutamente vazio, não é possível obter o vácuo perfeito, pois não há equipamentos que reduzam o volume de uma matéria a zero. Mesmo assim, ao longo da história da humanidade foram

Figura 2.6: Outros símbolos de componentes.



Fonte: PARKER HANNIFIN CORPORATION, S.D.a

desenvolvidos métodos que tornassem possível a retirada do ar e outras matérias afim de trabalhar com as propriedades que o vácuo poderia proporcionar (STEMPNIAK, 2002). Sua medição é feita através da pressão, o que permite a divisão em faixas de valores, como apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Faixas de pressão de vácuo.

Faixa	Torr (mmHg)	Pascal
Pressão atmosférica	760	101 k
Baixo vácuo	760 a 25	100k a 3k
Médio vácuo	25 a 1×10^{-3}	3k a 100m
Alto vácuo	1×10^{-3} a 1×10^{-8}	100m a 1μ
Vácuo perfeito	0	0

Fonte: LUZ, 2012.

O ar possui algumas propriedades físicas (PAVANI, 2011):

- Expansibilidade: o ar consegue ocupar todo o o volume de um recipiente;

- Compressibilidade: uma vez que o ar não tem forma própria, ele adquire o formato do recipiente em que se encontra, pode-se aplicar uma força para comprimir o volume do ar neste ambiente;
- Elasticidade: após comprimido, o ar pode retornar ao seu volume original;
- Difusibilidade: pode-se misturar homogeneamente o ar com qualquer meio gasoso que não seja saturado.

Uma das primeiras formas encontradas de utilizar vácuo é através de bombas de vácuo, há séculos sendo aplicadas em diversos meios, bastante encontrada nas indústrias nos dias atuais. No geral, são classificadas em duas categorias: transferência de gases e captura ou aprisionamento. Abaixo, a Figura 2.7 mostra algumas categorias das bombas de vácuo.

As bombas de captura trabalham com faixas mais baixas que as de transferência, porém oferecem um vácuo extremamente alto, e operam utilizando condensação criogênica, reação iônica ou reação química e não possui partes móveis. Já as bombas de transferência de gás são subdivididas em dois tipos: transferência cinética, que possuem lâminas de alta velocidade para direcionar o gás; deslocamento positivo, usadas para criar baixo vácuo, captando um volume de gás e movendo-o internamente; podem ser classificadas em três designs: parafuso, engrenagem e rotor excêntrico, como mostrado na Figura 2.7 (STEWART, 2019).

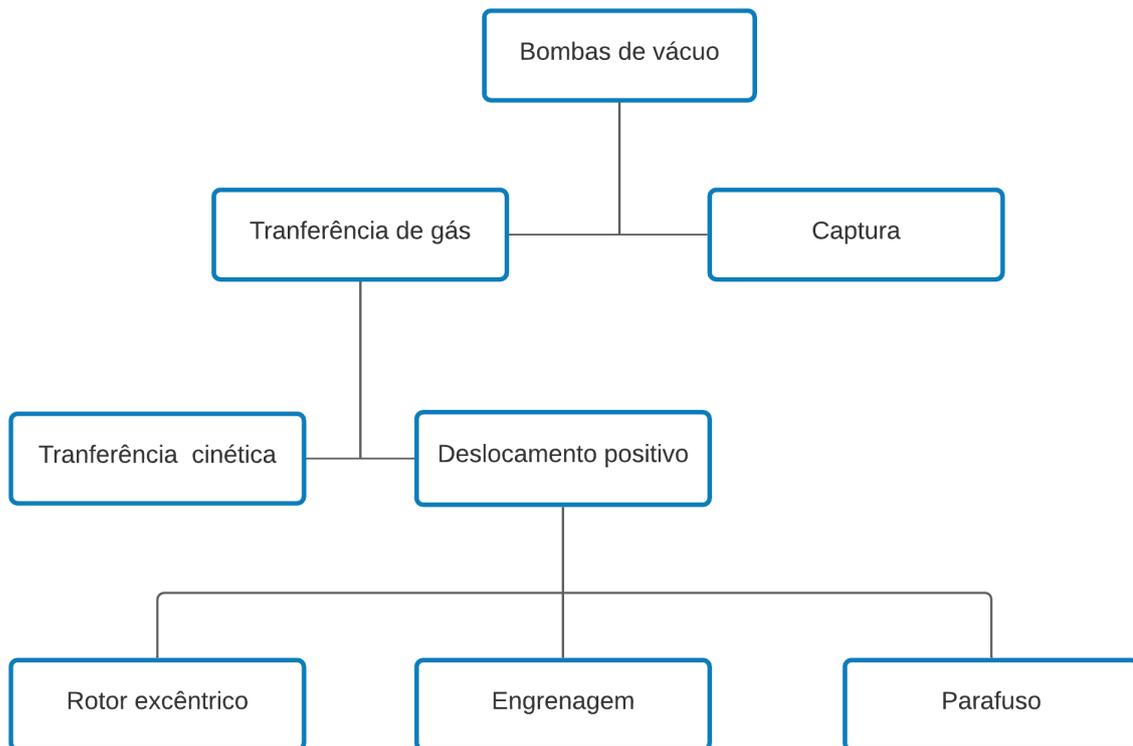
A configuração de rotor excêntrico é composto por duas configurações de palhetas: deslizantes e flexíveis. Bombas de palhetas rotativas deslizantes são as mais comuns, trabalham em baixo vácuo e consistem em uma estrutura com rotor excêntrico com frestas que alojam as palhetas, onde deslizam para dentro e para fora. Na Figura 2.8, é possível identificar a estrutura no interior desse tipo de bomba. Conforme o rotor gira, o fluido entra pela porta de entrada, as palhetas deslizam para fora dos seus alojamentos e forçando o fluido no sentido da porta de saída, comprimindo o mesmo no espaço entre o cilindro e o rotor, posteriormente sendo retornadas para as suas cavidades (STEWART, 2019).

Essa configuração de bomba apresentada trabalha melhor com fluidos de baixa viscosidade, uma vez que os mais espessos podem atrapalhar no deslizamento das palhetas. Estas apresentam autocompensação de desgaste, sendo baratas porém não tão confiáveis por conta desse desgaste em atrito e também das quebras das palhetas.

2.3 Manutenção e confiabilidade

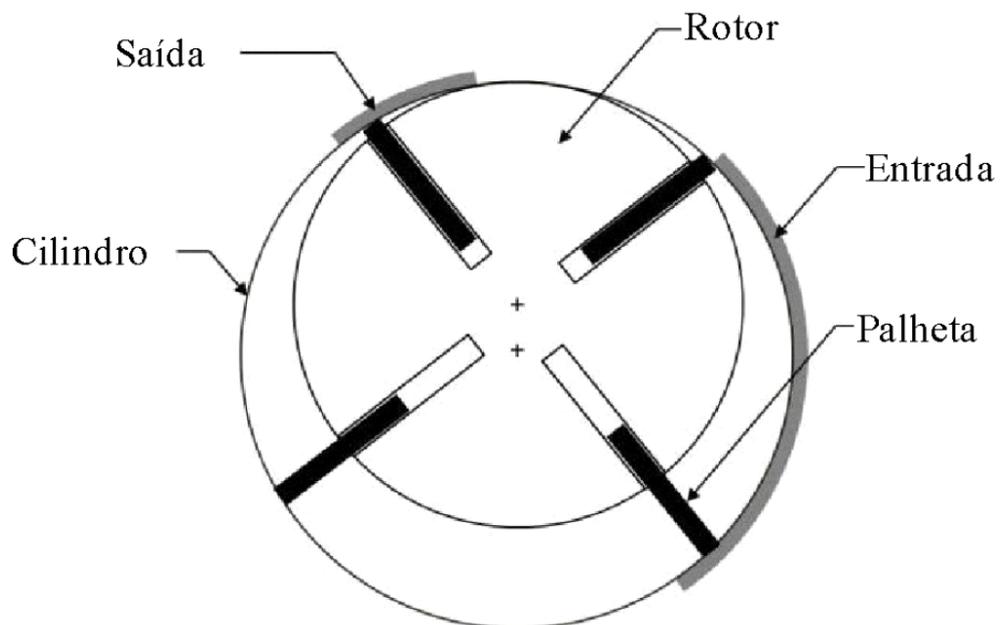
Quando falamos de máquinas, é necessário pensar no que é precisa ser feito para mantê-la em melhor condição de uso possível. Com isso, logo o que vem a mente são as manutenções que precisam ser realizadas para que o equipamento seja mantido em sua

Figura 2.7: Tipos de bombas de vácuo.



Fonte: AUTORA, 2021. Baseado em (GARDNER DENVER, 2021) e (STEWART, 2019).

Figura 2.8: Estrutura e componentes da bomba de vácuo por deslocamento positivo com palhetas.



Fonte: AUTORA, 2020. Baseado em (JONG, 2013).

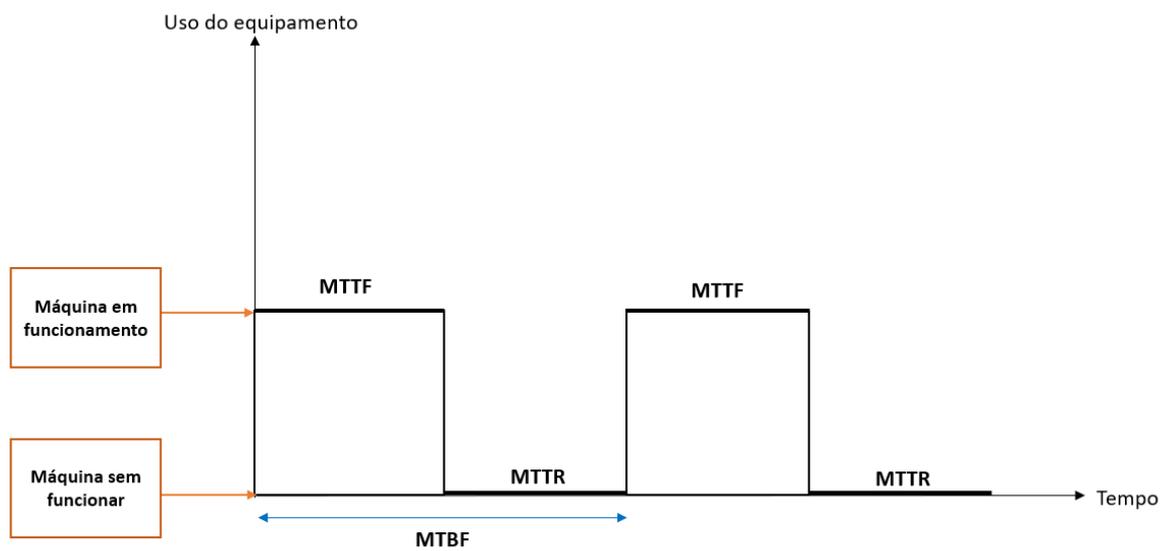
condição mais próxima do ideal, visando atividades detalhadas que devem ser realizadas e em que periodicidade devem ocorrer. Este conceito foi construído a partir dos oito pilares da TPM (*Total Productive Maintenance* ou Manutenção de Produtividade Total) (CHIQUITO; VELOSO, 2018), uma estratégia que envolve desde os trabalhadores da linha de produção até a alta gerência e os pilares devem ser trabalhados em conjunto, onde Manutenção Planejada é um deles. As atividades de manutenção são classificadas da seguinte forma (TROJAN; MARÇAL, 2017):

- Corretiva não planejada: geralmente relacionadas a uma falha no desempenho do equipamento deixando-o indisponível, sem tempo de preparo para a correção;
- Corretiva planejada: quando necessário realizar correção quando há baixo desempenho, porém com planejamento das ações antes de deixar o equipamento indisponível;
- Preventiva: é realizada em uma determinada frequência, quando o equipamento ainda não apresenta perdas, prevenindo a falha de ocorrer. Mesmo realizando essas atividades, pode acontecer indisponibilidade do equipamento pelo erro na estimativa de realização do reparo;
- Preditiva: muito similar à preventiva, é executada baseada na condição do equipamento. Para isto, o desempenho do equipamento é monitorado, como por exemplo através de inspeções no mesmo, assim decidindo quando será o momento de realizar a atividade de reparo ou troca.

Em conjunto ao plano de manutenção, há também a confiabilidade: trata-se da probabilidade de um peça ou equipamento executar seu objetivo em um tempo específico e ambiente pré-determinado. Uma das principais medidas de confiabilidade é o MTBF (*Mean Time Between Failure* ou Tempo Médio Entre Falhas), que consiste na soma do MTTF (*Mean Time To Failure* ou Tempo Médio Até a Falha) com o MTTR (*Mean Time To Repair* ou Tempo Médio de Reparo) (FOGLIATTO, S.D.).

Sendo assim, se MTTR tender a 0, o MTTF será aproximadamente ao MTBF; quando MTTR for maior que 0, o MTBF será a soma de MTTR e MTTF.

Figura 2.9: Tempo médio entre falhas.



Fonte: FOGLIATTO, S.D.

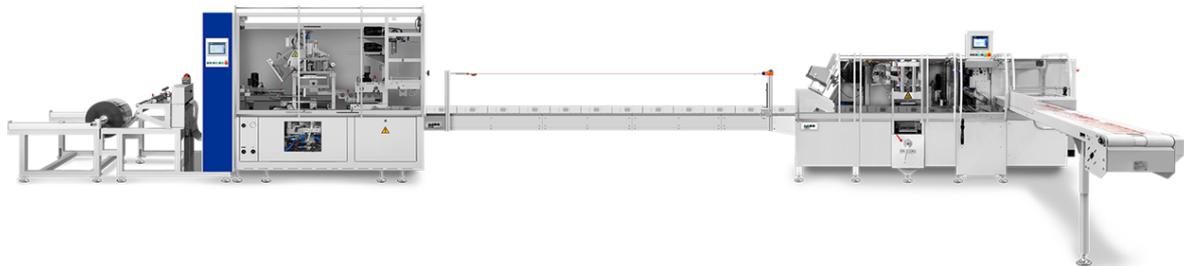
3 Metodologia

Neste capítulo será apresentado o estudo do sistema em estudo, o qual é composto pela bomba de vácuo. Além disso, será discutido sobre manutenção do sistema e MTBF, além da proposta de modificação do sistema para o uso da válvula pneumática geradora de vácuo.

3.1 Estudo do sistema

O objeto de estudo desse trabalho trata-se de um sistema de vácuo da estação de transporte de material de um equipamento de selagem de embalagens de uma empresa de bens de consumo. A máquina em questão é uma HSA 50d (Figura 3.1), cuja sigla HSA é de origem alemã e significa “máquina de selagem quente”, fabricada pela empresa Illig. A etapa do processo a ser analisada é na transferência de cartão, destacada na Figura 3.2, onde um transportador faz a retirada dos mesmos com auxílio de ventosas e coloca na esteira transportadora. Na Figura 3.3, é possível observar alguns dos produtos divulgados em um catálogo da empresa ILLIG, S.D..

Figura 3.1: Máquina de selagem de embalagens, HSA 50d.



Fonte: (ILLIG, 2021)

Cada etapa do processo possui sistemas de vácuo independentes, todos conectados ao ponto de abastecimento da rede de ar comprimido central, tornando possível que haja falha de vácuo em uma estação mas não em outra. Este ponto viabiliza que o estudo seja feito em uma parte específica do equipamento.

Utilizando o *software* Fluidsim, da empresa FESTO, S.D., para simular circuitos eletropneumáticos e hidráulicos, foi montado o sistema de vácuo do transportador de

cartão. Na Figura 3.4, temos uma representação de como funciona o transporte de material. Na circuito pneumático, foi montado como seria a composição da estação, com os elementos de filtragem na parte inferior do item 1, tendo em destaque: a válvula de 3 vias 2 posições, retorno por mola e acionamento por solenoide, da FESTO; a representação da bomba de vácuo com um filtro e um elemento compressor; por último, o transportador, mostrado como as ventosas. Já os circuitos elétricos foram divididas em duas partes: a primeira representa o *RESET* do equipamento, Figura 3.5, onde todas as estações ficam prontas para iniciar o processo. Originalmente o CLP faz a troca de estado para toda a máquina, mas a fins de simulação foi utilizado uma botoeira para fazer executar essa função. Portanto, quando a botoeira é pressionada, o circuito aciona o motor da bomba que entra em funcionamento gerando vácuo, atravessando o sistema e succionando o objeto através das ventosas. A segunda parte (Figura 3.6), é responsável pelo momento em que o transportador muda de estado, saindo da sua posição inicial retirando os cartões da estrutura de armazenamento e deixando na esteira transportadora, onde fisicamente encontra-se um sensor de fim de curso. Sendo assim, para largar os cartões, é feita a mudança da posição de pilotagem da válvula na botoeira de movimento do transportador, onde a solenoide vai atuar, interrompendo o vácuo e transferindo ar comprimido do sistema principal, causando um sopro pelas ventosas que expulsa os objetos para a esteira.

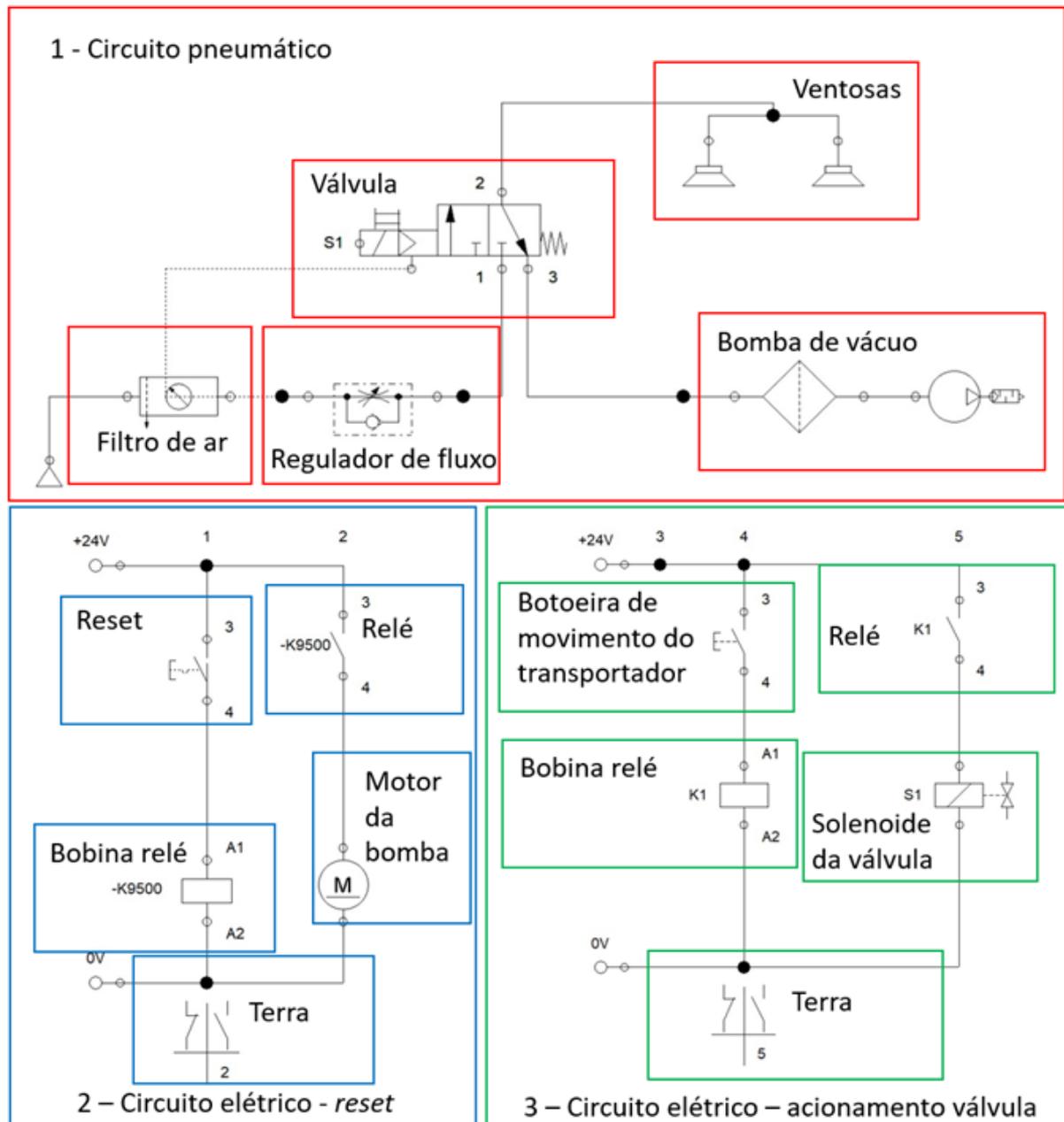
A bomba de vácuo da estação, ilustrada na Figura 3.7, trata-se de um modelo com palhetas rotativas da Becker, tipo VT4.8, D-42279 (BECKER PUMPS CORPORATION, S.D.). Ela possui cinco palhetas, que deslocam para dentro e fora de suas cavidades quando o rotor movimentada, enquanto gás é capturado pela porta de entrada, o volume é compactado a uma pressão mais alta e liberado na porta de saída. O plano de manutenção para esse componente é composto de duas atividades, em um período de 2 anos:

- Atividade trimestral: troca das palhetas rotativas. Custo de R\$1.500,00 reais;
- Atividade bianual: troca da bomba completa. Custo de R\$9.10,00 reais;

Mesmo com um plano de atividades de manutenção recomendado pela fabricante, a bomba está sujeita a problemas que possam vir a acontecer com o uso contínuo, dependendo o ambiente em que está trabalhando, sujeita a problemas imprevistos como desgaste prematuro de componentes. Na Tabela 3.1, estão especificados os problemas mais comuns que foram encontrados nesse modelo do equipamento e efeitos ocasionados.

O problema mais frequente encontrado nesse modelo de bomba ocorre devido as palhetas serem compostas de carbono, tornado-a menos confiável por conta do desgaste por atrito e ou mesmo a quebra das palhetas (STEWART, 2019). Na Figura 3.8, pode-se observar a diferença das palhetas durante uma troca prematura: do lado esquerdo da imagem encontram-se as palhetas novas recém-colocadas; do lado direito, as palhetas com desgastes; no centro da imagem, um comparativo entre as palhetas novas e as utilizadas.

Figura 3.4: Circuito eletropneumático sistema de vácuo com bomba.



Fonte: AUTORA, 2021.

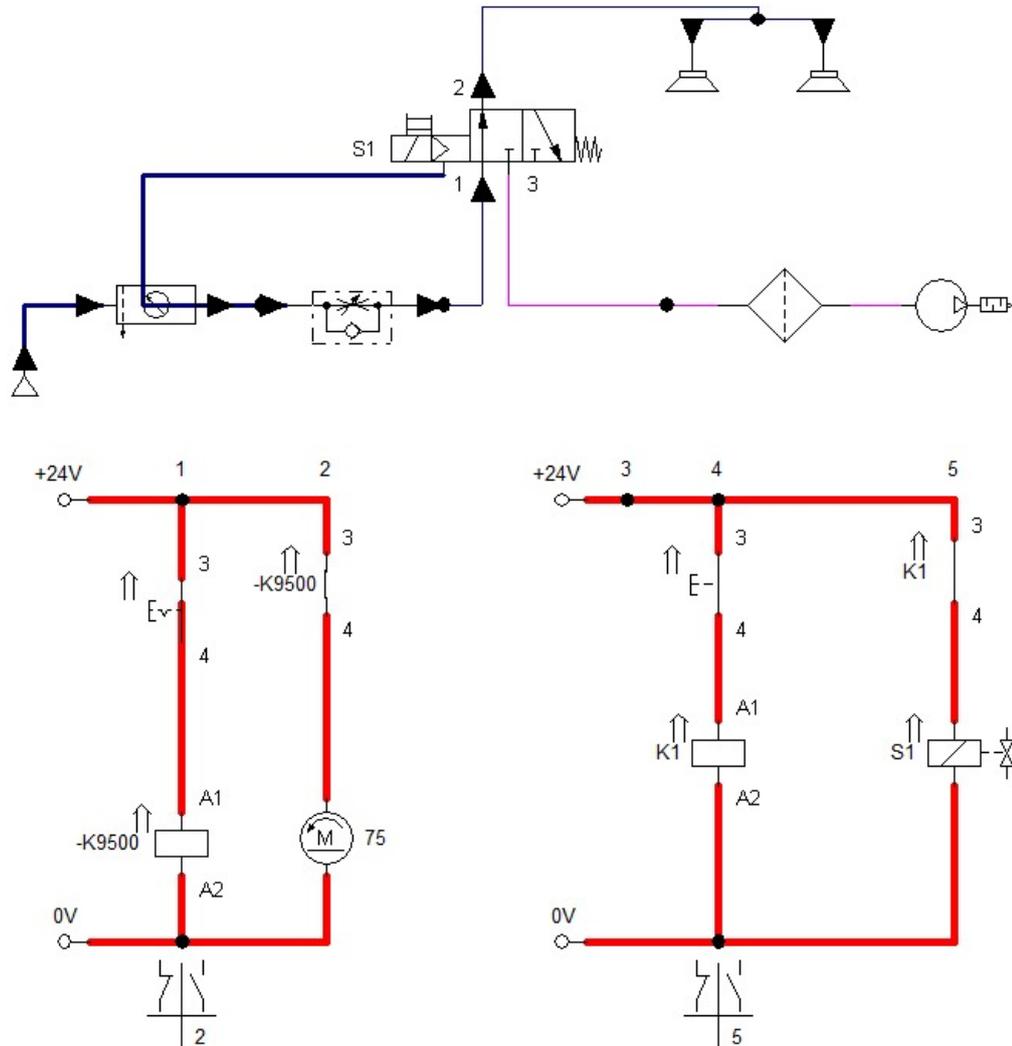
Nessas condições, a bomba não atinge a compressão de ar suficiente, causando a falha de vácuo no equipamento.

Tendo em vista este cenário, o MTBF foi calculado com a utilização da bomba de vácuo no sistema, através do seguinte cálculo:

$$\text{MTBF} = \frac{\text{minutos em funcionamento}}{\text{quantidade de paradas}} \quad (3.1)$$

Dessa forma, utilizando os resultados obtidos entre fevereiro e abril de 2020, o MTBF calculado foi de 1.875,18 minutos.

Figura 3.6: Largada de cartão.



Fonte: AUTORA, 2021.

Utilizando o Fluidsim (FESTO, S.D.), a modificação do sistema foi simulada, retirando a bomba do circuito eletropneumático e adaptando-o para a geradora. A Figura 3.10 mostra o circuito eletropneumático com a troca da válvula 3 vias 2 posições retorno por mola com acionamento por solenoide por um modelo duplamente acionado por solenoide e a geradora de vácuo, substituindo a bomba, conectada à válvula e ao conjunto de ventosas.

Novamente o funcionamento é dividido em 2 etapas: a primeira etapa (Figura 3.11) consiste na máquina em estado de *RESET*, com a botoeira de início do ciclo ativada e a solenoide s1 da válvula é acionada, com vácuo está sempre em funcionamento, a válvula em

Figura 3.7: Becker VT4.8.



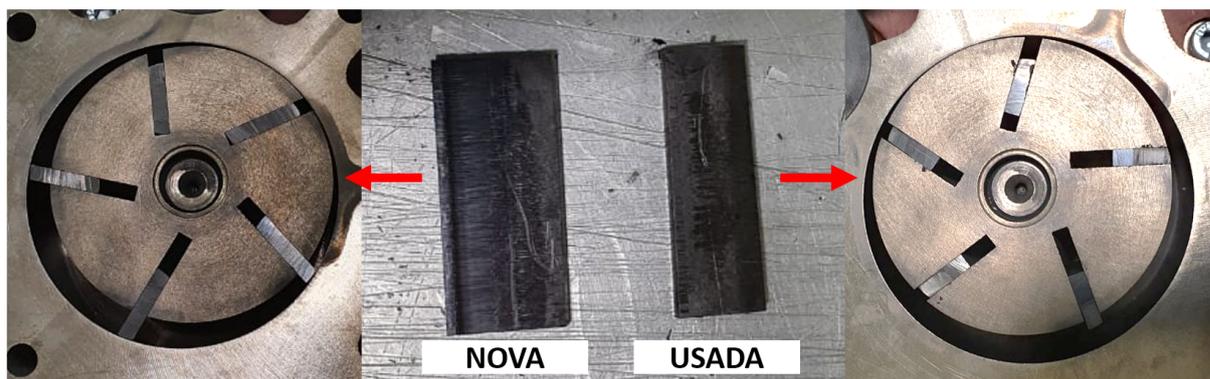
Fonte: Seon Tae Jong, 2013.

Tabela 3.1: Possíveis problemas encontrados em bomba de vácuo de deslocamento positivo com palhetas.

Problema	Efeito
Rotor travado	Falha na geração de vácuo
Rotor Empenado	Ruído e falha na geração de vácuo
Palhetas Desgastadas	Baixo nível de vácuo gerado
Desgaste do filtro externo	Baixo nível de vácuo
Vibração	Desgaste prematuro das peças
Ruídos acima do normal	Indica problema no equipamento
Bomba não funciona (inutilização)	Troca da bomba

Fonte: AUTORA, 2020.

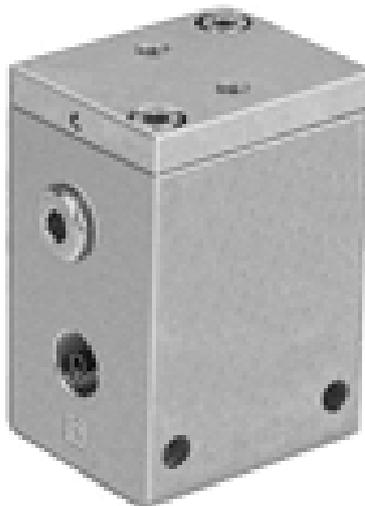
Figura 3.8: Palhetas Becker VT4.8.



Fonte: AUTORA, 2020.

sua posição inicial está acionando a geradora de vácuo e as ventosas estão em sucção; na segunda etapa (Figura 3.12), acionando o botão que representa o sensor de fim de curso da estrutura que faz o transporte dos cartões e ativando a solenoide S2 da válvula, a mesma

Figura 3.9: Geradora de vácuo VAK 1/4 6890 FESTO.

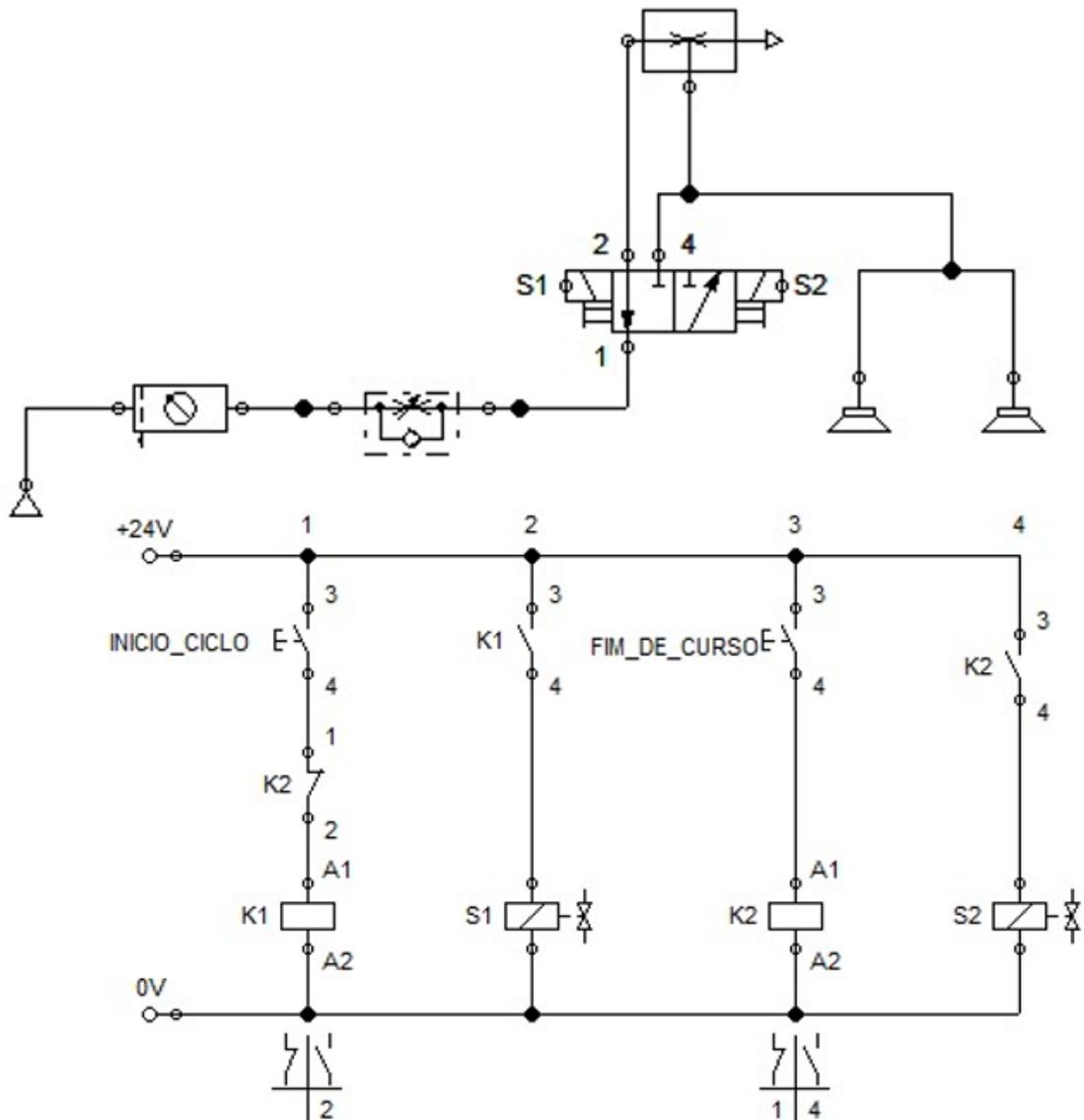


Fonte: FESTO, S.D.

muda e desativa a geradora, passando a transmitir o ar direto para as ventosas, causando um sopro que expulsa o material para a esteira de transporte.

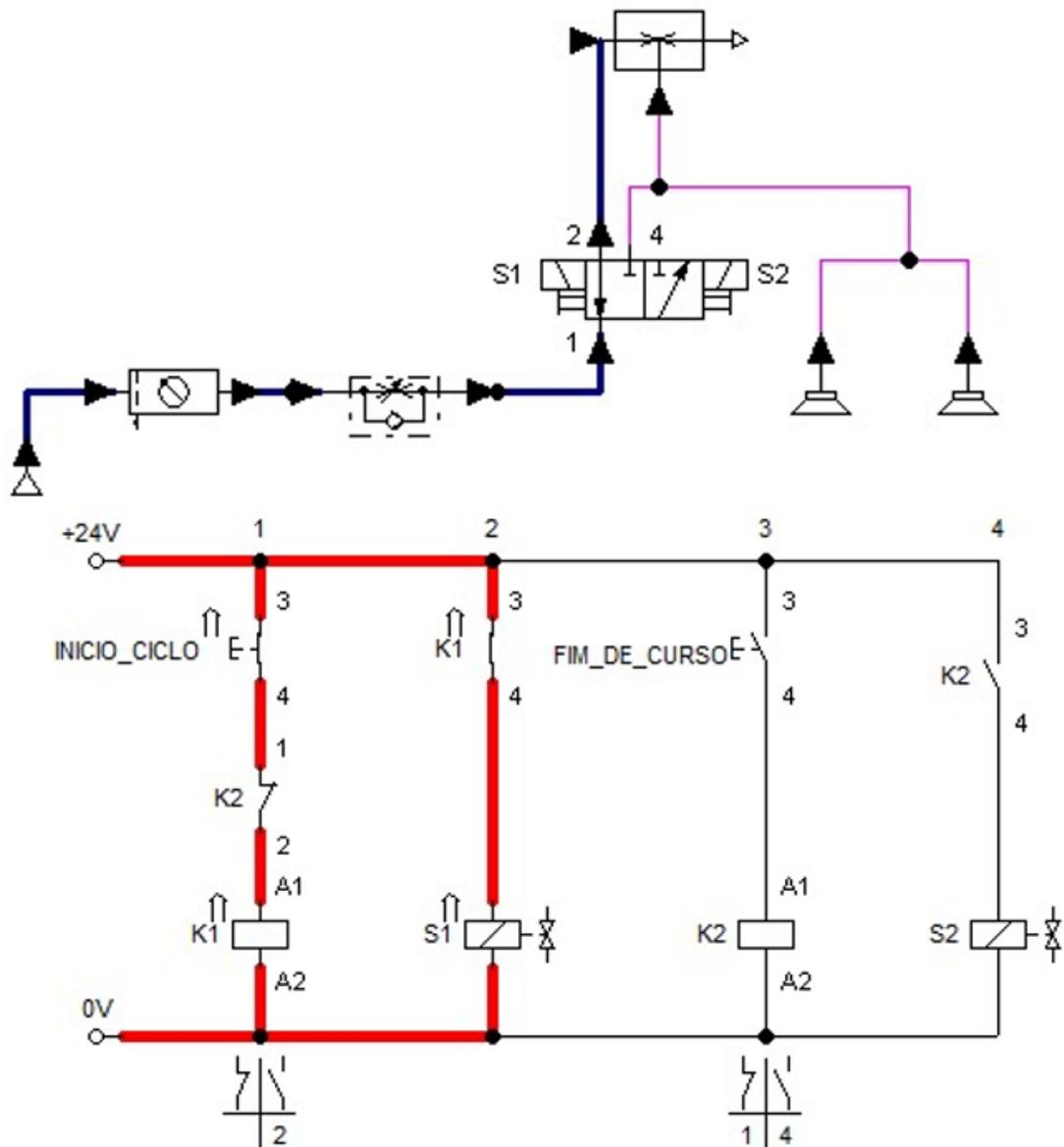
O custo da modificação com a troca da válvula e da geradora de vácuo ficou em torno de R\$1.214,00 reais. A manutenção para esses equipamentos não exige nenhuma atividade de lubrificação, inspeção ou reparo, apenas a substituição dos componentes em uma frequência anual ou caso o componente pare de funcionar, pois não é feita a troca de nenhum componente interno do dispositivo.

Figura 3.10: Circuito eletropneumático sistema de vácuo com geradora.



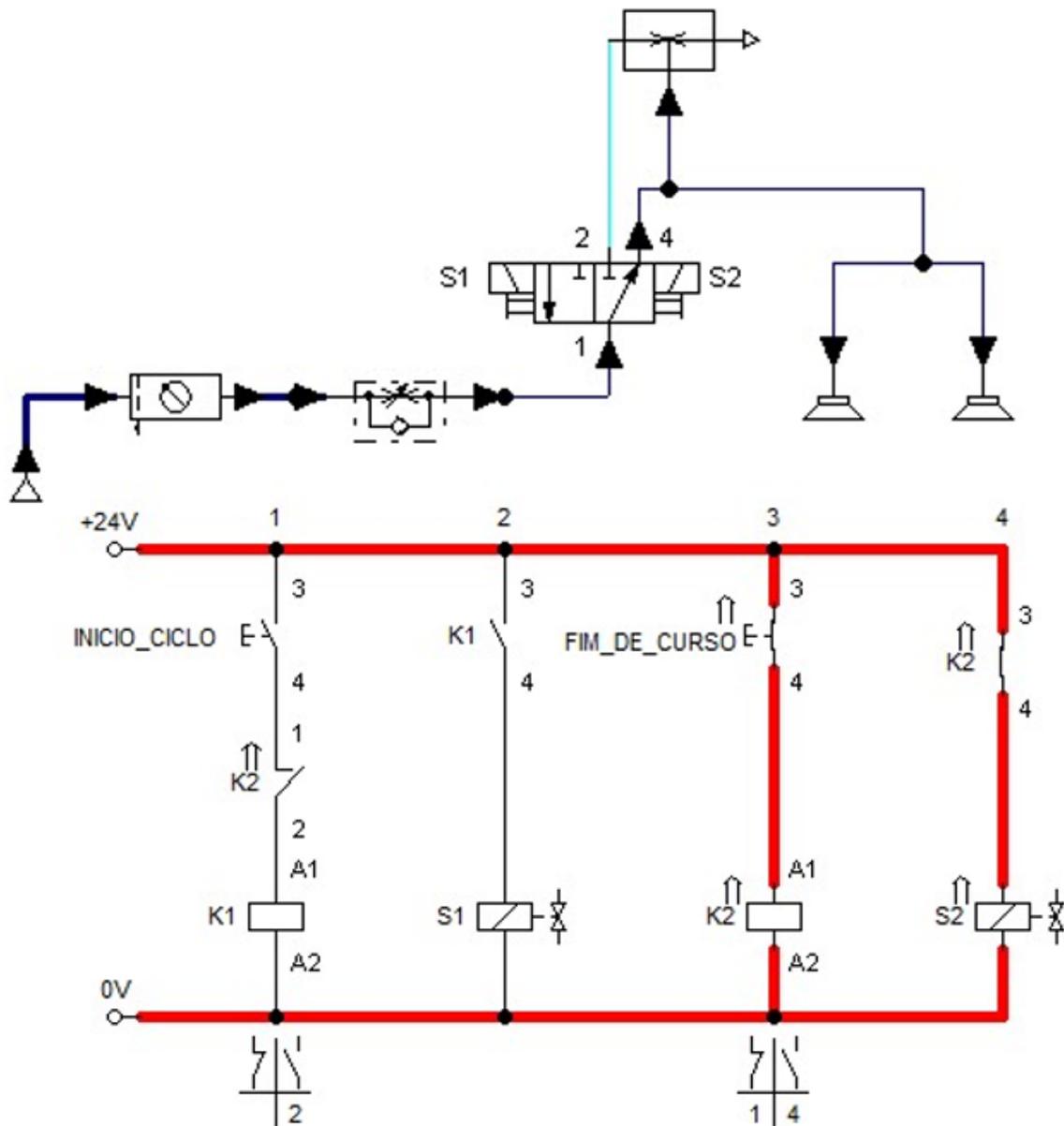
Fonte: AUTORA, 2021.

Figura 3.11: Estação em *RESET*.



Fonte: AUTORA, 2021.

Figura 3.12: Largada de cartão.



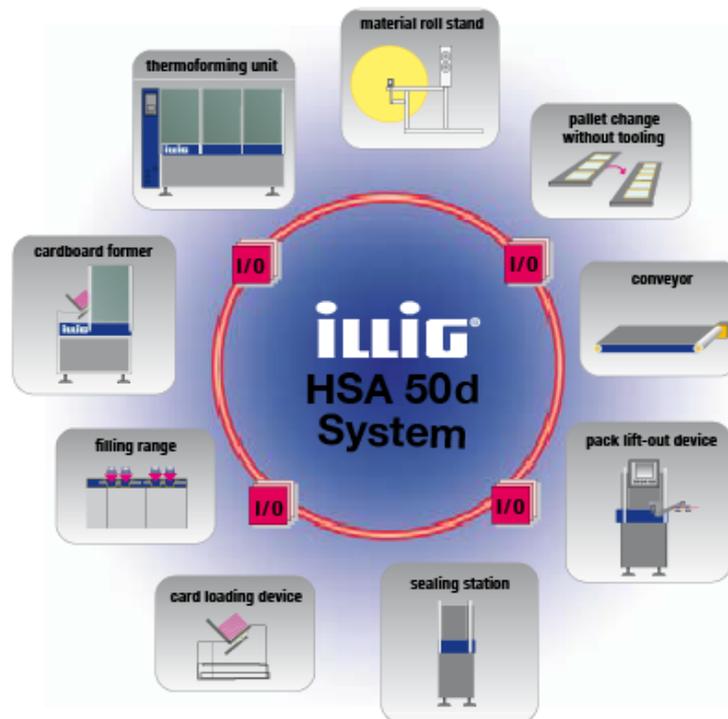
Fonte: AUTORA, 2021.

4 Resultados

Partindo dos objetivos do trabalho, onde a proposta anteriormente definida é substituir as bombas de vácuo do sistema por válvulas pneumáticas geradoras de vácuo, inicialmente através de simulações, mostrou-se possível de ser realizada após a execução dos objetivos específicos.

O primeiro objetivo tratava-se do estudo do sistema de vácuo do equipamento. A estrutura foi desenvolvida pela fabricante ILLIG, 2021 da seguinte forma: a máquina sendo construída de forma modular (Figura 4.1), unidades podem ser adicionadas ou retiradas com uma maior facilidade; dessa forma pode-se obter equipamentos personalizados e mais adequados para cada processo.

Figura 4.1: Fluxo de estações HSA 50d



Fonte:ILLIG, S.D.

Seguindo a análise da estação, é possível fazer alterações específicas para essa etapa do processo, pois a unidade trabalha de forma independente das outras unidades do

equipamento, sem prejudicar as outras atividades da máquina como um todo.

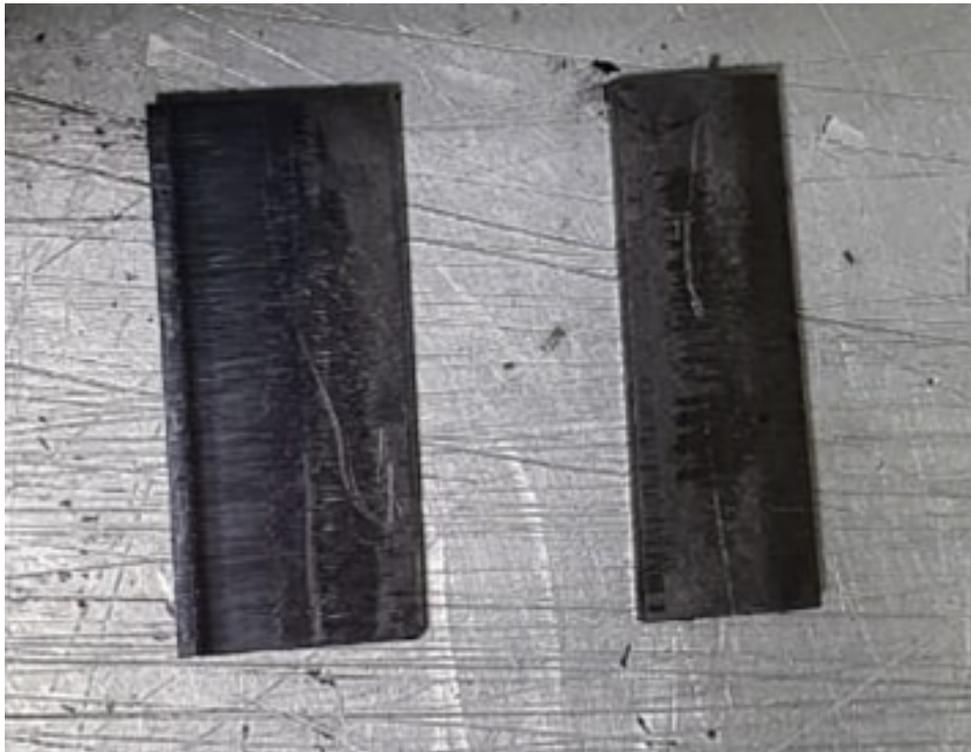
A bomba de vácuo trabalha em uma baixa faixa de vácuo (Tabela 4.1), auxiliando no transporte de materiais leves, mas que com o uso contínuo apresentava falhas de vácuo, principalmente por desgaste das palhetas. O material da palheta contribui para que esse desgaste aconteça, conforme apresentado na Figura 4.2 as palhetas nova (esquerda) e usada (direita), uma vez que trata-se de carbono, considerado não muito confiável por degradar com bastante facilidade durante o movimento de deslize no interior da bomba.

Tabela 4.1: Faixa de vácuo dos componentes.

Faixa medida	Valor em Bar
Baixo Vácuo (GARDNER DENVER, 2021)	1000m a 1m
Becker VT 4.8 (BECKER PUMPS CORPORATION, S.D.)	150m
Festo VAK-1/4 (FESTO, S.D.)	750m

Fonte: AUTORA, 2021.

Figura 4.2: Desgaste das palhetas. À esquerda, uma palheta nova e à direita, uma desgastada.

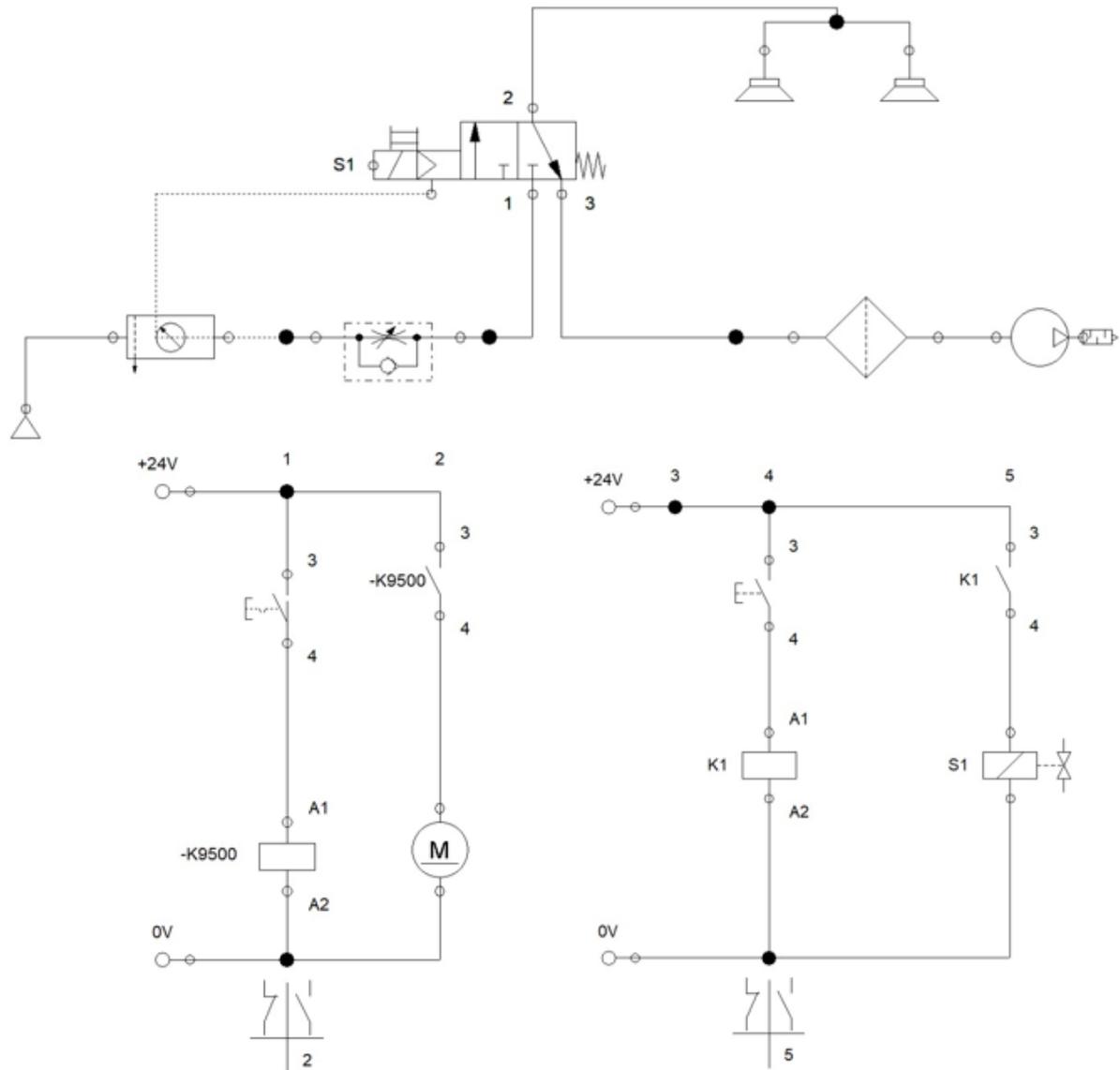


Fonte: AUTORA, 2020

O segundo item proposto foi projetar o sistema eletropneumático. Inicialmente, a simulação do sistema com a bomba de vácuo (Figura 4.3), permitiu analisar a execução dos estados de transporte realizado pela estação, tanto em *RESET*, aguardando o início do processo, quanto em operação deixando o material na esteira de transporte. Com isso, foi feita a substituição de dois elementos do sistema: a bomba de vácuo de palhetas rotativas (BECKER PUMPS CORPORATION, S.D.), tipo VT4.8 trocada pela válvula

geradora de vácuo FESTO VAK 1/4 6890 (FESTO, S.D.) e a válvula 3 vias 2 posições, retorno por mola e acionamento por solenoide, da FESTO, por uma válvula 3 vias 2 posições duplamente acionada por solenoide. Realizando a simulação, o sistema modificado (Figura 4.4) realizou o mesmo trabalho de acionamento das ventosas para o transporte do material.

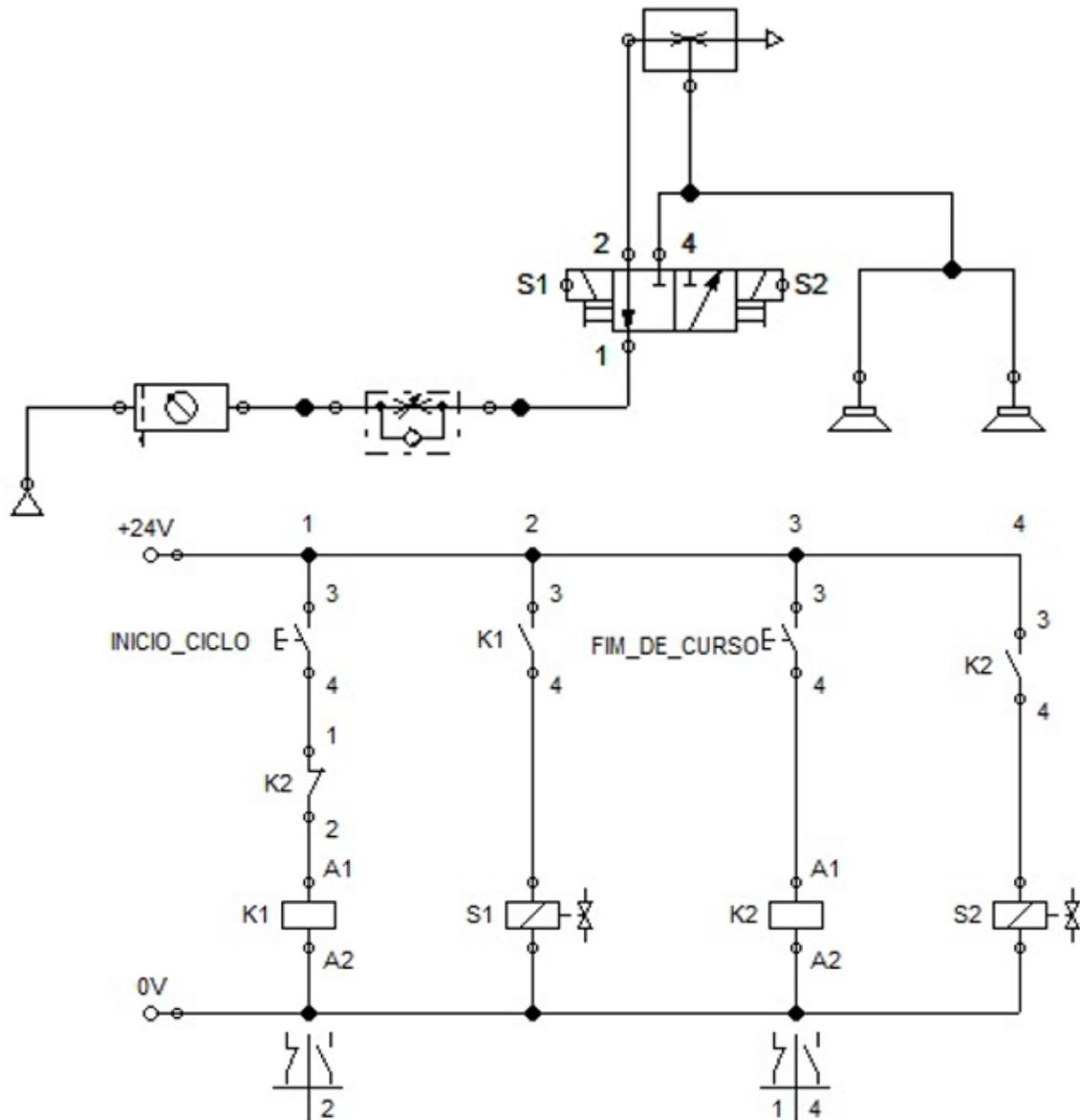
Figura 4.3: Circuito com a bomba, antes da modificação.



Fonte: AUTORA, 2021.

A terceira proposta consiste na análise do plano de manutenção para ambos os sistemas. Com a bomba no sistema, era necessária a realização da troca das palhetas de vácuo a cada três meses e a substituição da bomba num período de dois anos, de acordo com recomendação do fabricante, com isso gerando um custo de R\$19.600,00 ao final desse período, conforme Tabela 4.2 e Figura 4.5. Utilizando a válvula geradora de

Figura 4.4: Circuito com válvula geradora de vácuo, após modificação



Fonte: AUTORA, 2021.

vácuo, a proposta de troca sugerida pelo fabricante e utilizada para válvulas do mesmo nesse equipamento é anual, portanto obtém em torno de R\$2.430,00 de gasto com a troca no mesmo período. Para a válvula 3 vias 2 posições não foi necessário realizar um novo orçamento por conta da similaridade entre os modelos, tal como o custo da mão de obra, pois a atividade foi realizada pelo time operacional do equipamento e não de um serviço externo. Com isso, foi obtido uma redução de 87,6% com a manutenção.

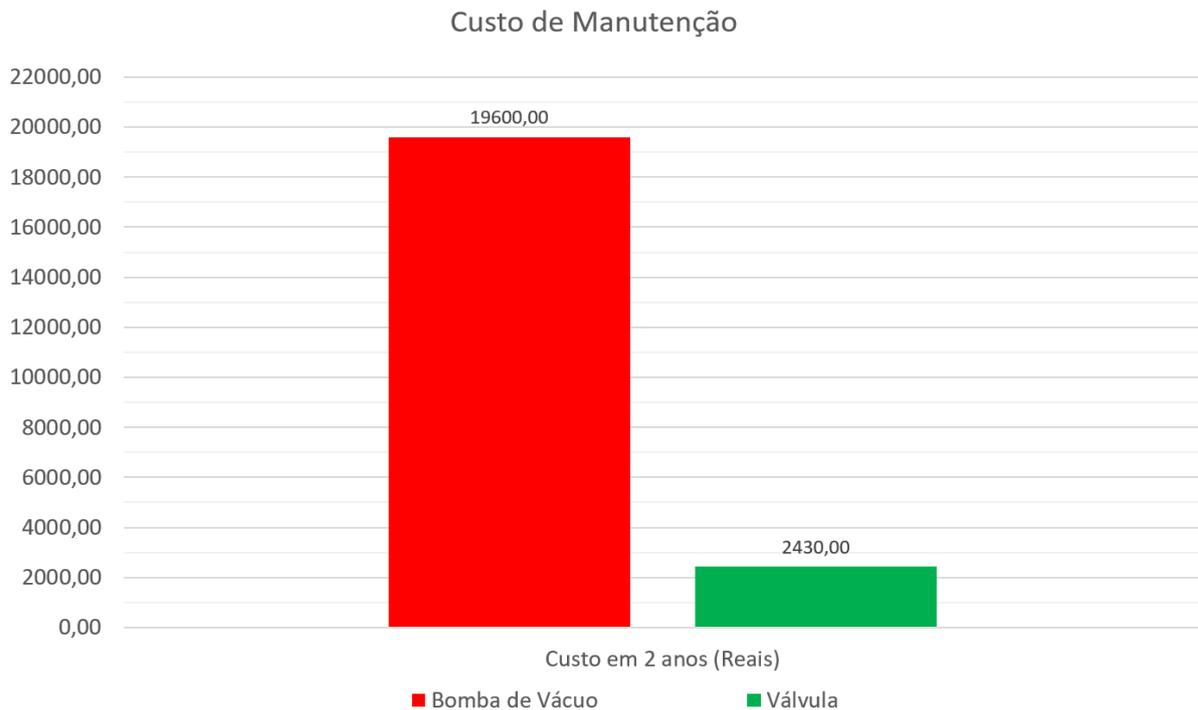
Por último, o objetivo final é a modificação do sistema. A troca foi realizada na estação inicialmente estudada, afim de posteriormente replicar para as outras similares do próprio equipamento. A troca foi realizada pelo próprio time, sem necessidade de serviço

Tabela 4.2: Comparativo: manutenção para a bomba e para válvula.

Componente	Atividade	Frequência	Custo
Bomba Becker	Troca das palhetas	Trimestral	R\$1.500,00
Bomba Becker	Troca da bomba	Bianual	R\$9.100,00
Válvula VAK 1/4	Troca da válvula	Anual	R\$1.215,00

Fonte: AUTORA, 2021.

Figura 4.5: Custo de manutenção para 2 anos com a bomba e com a válvula, em Reais.



Fonte: AUTORA, 2021.

especializado da fabricante para auxiliar, sendo realizada num período de 2 horas. Além da etapa eletropneumática apresentada por simulação, a bomba era conectada ao CLP da máquina via uma contactora (equipamento similar ao relé) conectada ao barramento do painel elétrico, onde foi conectada a solenoide S1 da válvula no circuito modificado; a solenoide S1 no circuito da bomba e S2 no circuito da geradora realizam a mesma função de modificação do estado do circuito, representando o sensor de fim de curso, portanto foi apenas substituída na conexão uma pela outra (Tabela 4.3). Posteriormente foram realizados testes para checar o funcionamento dos componentes e da estação, os quais foram positivos e a máquina ficou em um período de observação para garantir que o sistema estava adequado para o processo produtivo. Após o primeiro mês, foram realizadas substituições das bombas das outras estações.

Para realização do MTBF, foram analisados um período de três meses, tal como realizado para o período de fevereiro a abril de 2020 com a bomba, foram levantados os

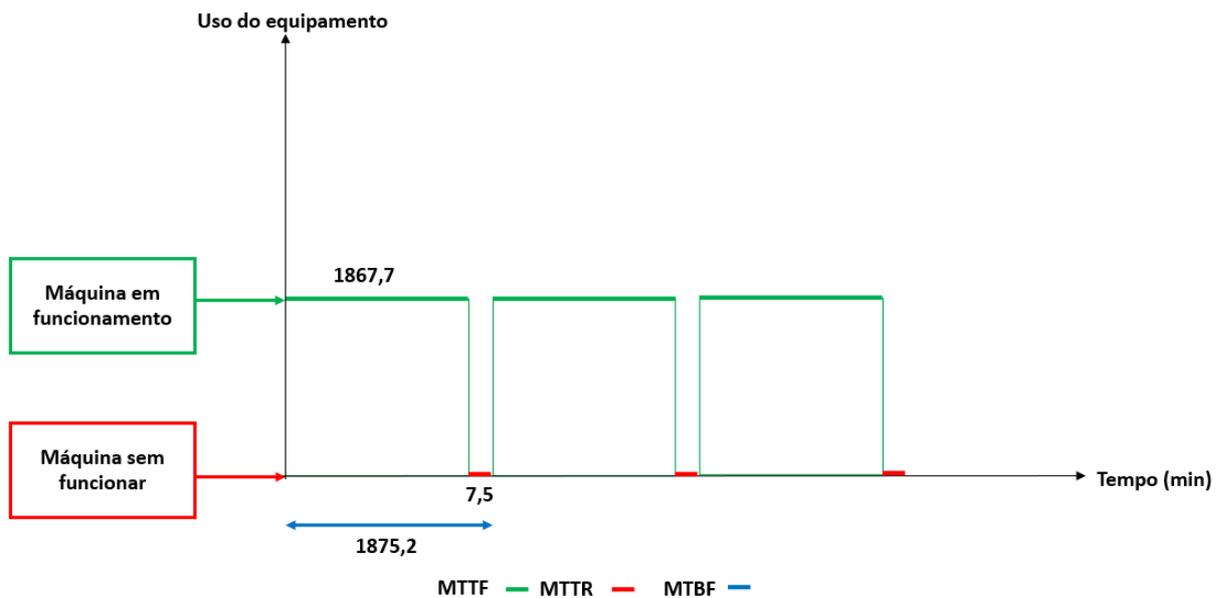
Tabela 4.3: Modificações de acionamento elétrico no painel

Conexão no circuito com bomba	Conexão no circuito com geradora
Motor da Bomba de vácuo	Solenóide S1
Solenóide S1	Solenóide S2

Fonte: AUTORA, 2021.

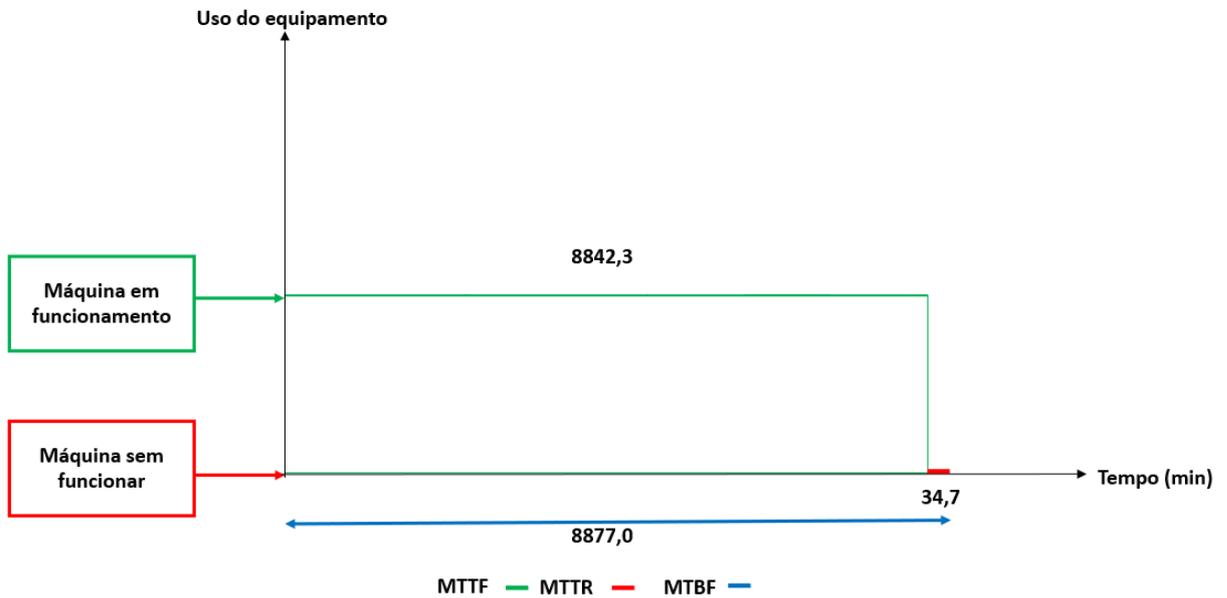
dados entre dezembro 2020 e fevereiro 2021, o MTBF foi de 8.877 minutos. Observa-se que no primeiro trimestre (Figura 4.6) o MTTR era menor que o MTTR do segundo trimestre (Figura 4.7), porém o MTTF é muito maior após a modificação, o que indica que o equipamento mantém estabilidade por muito mais tempo, reduzindo perdas de material que ocorrem quando a máquina para mais vezes. Em um comparativo na Figura 4.8, é possível notar proporcionalmente a diferença antes e após a modificação, que gerou um aumento de 473,4% no MTBF.

Figura 4.6: MTBF com a bomba, entre fevereiro e abril de 2020.



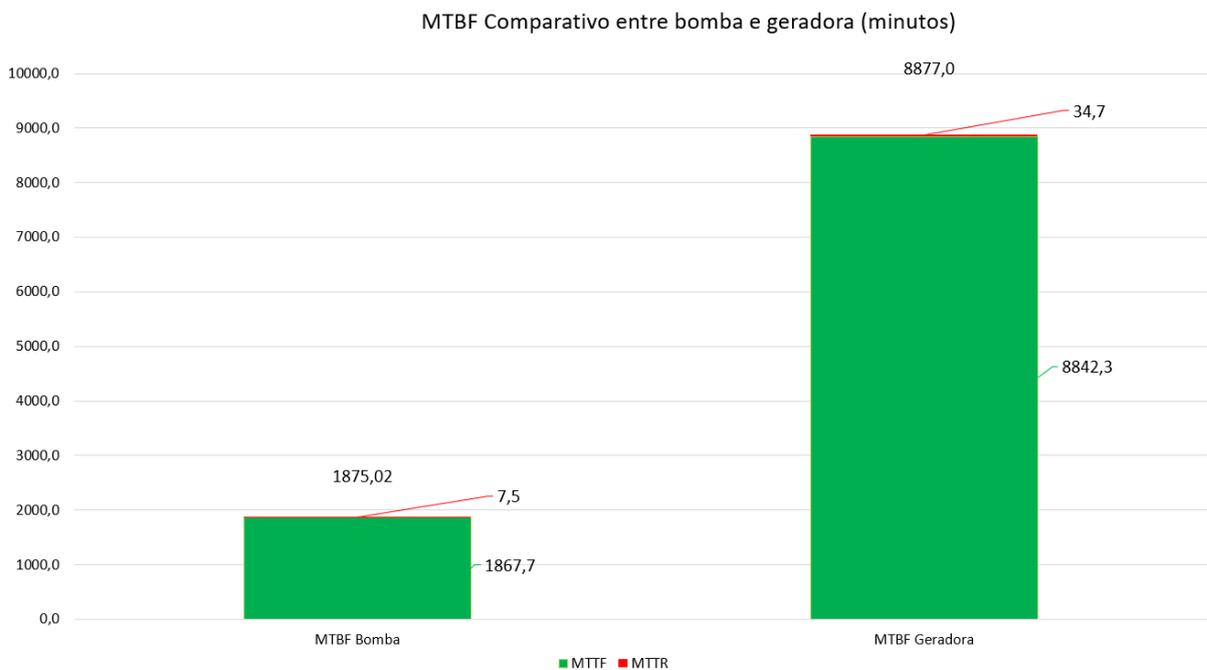
Fonte: AUTORA, 2021.

Figura 4.7: MTBF com a geradora, entre dezembro de 2020 e fevereiro 2021.



Fonte: AUTORA, 2021.

Figura 4.8: Comparativo entre os MTBF's realizados.



Fonte: AUTORA, 2021.

5 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado diferentes componentes eletropneumáticos em sistemas industriais, com aplicações na geração de vácuo em sistemas de transporte de matéria prima em um equipamento de embalagem de uma empresa de bens de consumo.

O estudo da utilização de bombas de palhetas rotativas deslizantes no equipamento, com quatro estações similares à apresentada como foco do trabalho, permitiu observar que apesar de atender aos requisitos do sistema de vácuo, atendendo ao requisitos necessário para o transporte ser efetivo, apresenta problemas de desgaste das palhetas com facilidade, causando falhas na atuação de transferência de material para a esteira de transporte.

As simulações com ambos os componentes, bomba e válvula geradora de vácuo, demonstraram que o sistema com a geradora de vácuo realiza o transporte de material de forma similar ao circuito montado com a bomba, com pequenas modificações no sistema, por exemplo, acrescentando uma solenoide na válvula 3 vias 2 posições. Um ponto positivo para a mudança é a utilização de componentes da FESTO, S.D. na máquina, o que torna mais confiável a troca pela compatibilidade com o equipamento.

Durante o estudo, o plano de manutenção para a bomba de vácuo possuía um valor elevado em um prazo de 2 anos, pois com a troca trimestral das palhetas e a troca da bomba de vácuo de forma bianual, levava a um custo em torno de R\$19.600,00 por estação, o que acarreta em um custo total em torno de R\$78.400,00 por máquina, nesse mesmo período. Com a utilização da geradora de vácuo, sem necessidade de manutenções regulares além da troca anual, o custo bianual fica por volta de R\$9.720,00 para todo o equipamento. A troca poderia não só trazer um retorno em desempenho de máquina como também em custo de manutenção.

A troca efetiva em máquina não teve muitos problemas, foi efetuada como planejada em simulação. A substituição da válvula 3 vias 2 posições pelo modelo com duas solenoides já havia sido incluída no plano de manutenção, sem o custo adicional para o projeto. A bomba vácuo substituída pela válvula geradora de vácuo, cuja a entrada de acionamento no barramento da máquina que antes serviria para a bomba, agora é conectada na solenoide de acionamento da geradora de vácuo na válvula 3 vias 2 posições. Após teste e aprovação do sistema modificado, foi feita a replicação para as outras estações da máquina.

Com isso, a análise do MTBF de falhas relacionadas a perda de vácuo no sistema, inicialmente realizada para a bomba e para a geradora de vácuo após a modificação,

apresenta que houve um ganho de desempenho em máquina com o aumento do MTBF, obtendo maior disponibilidade para a máquina produzir, o que retorna como lucro para a empresa pois é possível aumentar a produção para o equipamento.

5.1 Trabalhos Futuros

Mesmo atingindo todos os resultados para os objetivos propostos neste trabalho, há oportunidades que podem trazer ainda mais melhorias.

Primeiramente, tendo como base o estudo neste equipamento sendo bastante positivo e lucrativo, o que pode trazer ainda mais lucro para a indústria de bens de consumo com a máquina de selagem quente seria a reaplicação do projeto para equipamentos similares.

Partindo para equipamentos distintos, seria possível realizar a análise para outros sistemas com bomba de baixo vácuo e que também realizem o transporte de materiais leves, visando a redução de custo e o possível ganho em eficiência do equipamento.

Outro ponto seria o estudo da qualidade do ar comprimido fornecido pelo sistema de distribuição da fábrica, para garantir que o ar está limpo e seco e não contribui para danos nos componentes da máquina com impurezas ou água no sistema de distribuição de ar comprimido.

Referências Bibliográficas

BECKER PUMPS CORPORATION. **THE VT SERIES**. S.D. Acesso em: 20 set. 2020. Disponível em: <<https://beckerpumps.com/vacuum-pumps/rotary-vane-pumps/oil-less-vacuum-pumps/the-vt-series/>>.

CHIQUITO, A.; VELOSO, A. M. A. **ELABORAÇÃO DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO UTILIZANDO CONCEITOS DE MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL**. 2018.

ECKLE, F.; BICKERT, P.; LACHENMANN, R. Rotary vane and roots pumps backed by diaphragm pumps—progress in corrosive applications and clean vacuum requirements. **Vacuum**, v. 46, n. 8, p. 793–796, 1995. ISSN 0042-207X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0042207X95000410>>.

FESTO. **FluidSIM 3.6**. S.D. Acesso em: 03 out. 2020. Disponível em: <<https://www.festo-didactic.com/br-pt/sistemas-de-ensino/software/fluidsim-3-6-portugues/fluidsim-3.6.htm?fbid=YnIucHQUNTM3LjIzLjE4LjEwMTIuNTQ0Mw>>.

FOGLIATTO, F. S. **Manutenção e Confiabilidade**. S.D. Acesso em: 28 jun. 2021. Disponível em: <http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/397_laminas_da_aula_1.pdf>.

GARDNER DENVER. **Tipos de Bombas de Vácuo Industriais**. 2021. Acesso em: 03 mai. 2021. Disponível em: <<https://www.gardnerdenver.com/pt-br/knowledge-hub/articles/types-of-vacuum-pumps>>.

HENRIQUE, H. **Comandos Elétricos: Simbologia, Associação de Contatos e Conceitos Básicos**. S.D. Acesso em: 28 jun. 2021. Disponível em: <<http://sbvacuo.org.br/noticias/o-que-e-vacuo.pdf>>.

HOFFMAN, D. M. Operation and maintenance of a diffusion-pumped vacuum system. **Journal of Vacuum Science And Technology**, American Vacuum Society, <https://avs.scitation.org/doi/abs/10.1116/1.569870>, v. 16, n. 1, p. 71–74, 1979.

ILLIG. **HSA 50d**. 2021. Acesso em: 17 mai. 2021. Disponível em: <<https://www.illig.de/en-de/solutions/HSA-50d>>.

ILLIG. **Automatic blister packaging machine HSA 50d**. S.D. Acesso em: 03 out. 2020. Disponível em: <https://pdf.directindustry.com/pdf/illig-maschinenbau-gmbh-co-kg/automatic-blister-packaging-machine-hsa-50d/60364-648098-_8.html>.

JOAOBAPTISTA1201. **Produção, tratamento e armazenagem de ar comprimido**. S.D. Acesso em: 22 mai. 2021. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/joaobaptista1201/home/pneumatica/arcomprimido/producao-tratamento-e-armazenagem-de-ar-comprimido>>.

JONG, S. T. **Development and control of a meso-scale vapor compression refrigeration system**. Tese (Doutorado) — Universidade Nacional de Seul, 2013.

LUZ, M. L. **Vácuo, equipamentos e medidas**. 2012. Acesso em: 20 mai. 2021. Disponível em: <<https://wp.ufpel.edu.br/mlaura/2012/10/08/vacuo-equipamentos-e-medidas/>>.

PARKER HANNIFIN CORPORATION. **Apostila M2001-2 BR**. S.D. Acesso em: 28 jun. 2021. Disponível em: <https://www.parker.com/literature/Brazil/M2001_2_P_19.pdf>.

PARKER HANNIFIN CORPORATION. **Apresentação M2001-2 BR**. S.D. Acesso em: 28 jun. 2021. Disponível em: <<https://www.parker.com/parkerimages/Parker.com/Literature/Brazil/Pres\%20Hidrau\%2027-04.pdf>>.

PAVANI, S. A. **Comandos Pneumáticos e Hidráulicos**. [S.l.]: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011. v. 1.

RAMPRASAD, B.; RADHA, T. On some design aspects of rotary vane pumps. **Vacuum**, v. 23, n. 7, p. 245–249, 1973. ISSN 0042-207X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0042207X73900717>>.

STEMPNIAK, R. A. **A CIÊNCIA E A TECNOLOGIA DO VÁCUO**. 2002. Acesso em: 20 mai. 2021. Disponível em: <<http://sbvacuo.org.br/noticias/o-que-e-vacuo.pdf>>.

STEWART, M. 5 - rotary pumps. In: STEWART, M. (Ed.). **Surface Production Operations**. Boston: Gulf Professional Publishing, 2019. p. 415–440. ISBN 978-0-12-809895-0. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128098950000053>>.

TROJAN, F.; MARÇAL, R. Proposal of maintenance-types classification to clarify maintenance concepts in production and operations management. **Journal of Business Economics**, v. 8, 07 2017.

VINICIUS, A. **Sistemas de Vácuo: fazendo a diferença na indústria alimentícia**. 2016. Acesso em: 20 set. 2020. Disponível em: <<https://eficienciaenergetica.atlascopco.com.br/vacuo-na-industria-alimenticia/>>.