

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

JULIANO MARTINS NASCENTE

DIAGNÓSTICO E SOLUÇÃO PARA MOVIMENTOS INVOLUNTÁRIOS EM UM
GUINDASTE DE CARGA

CAXIAS DO SUL

2021

JULIANO MARTINS NASCENTE

**DIAGNÓSTICO E SOLUÇÃO PARA MOVIMENTOS INVOLUNTÁRIOS EM UM
GUINDASTE DE CARGA**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Métodos de Síntese e Otimização Aplicados ao Projeto Mecânico.

Orientador: prof. Me. Sérgio da Silva Kucera

CAXIAS DO SUL

2021

JULIANO MARTINS NASCENTE

**DIAGNÓSTICO E SOLUÇÃO PARA MOVIMENTOS INVOLUNTÁRIOS EM UM
GUINDASTE DE CARGA**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Métodos de Síntese e Otimização Aplicados ao Projeto Mecânico.

Aprovado em 18/06/2021

Banca Examinadora:

Prof. Me. Sérgio da Silva Kucera
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Esp. Rafael Tronca
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

O mercado de elevação de cargas vem se mostrando cada vez mais forte, tanto no mercado nacional como fora do país. Desde de uma grande rede atacadista, que necessita construir estruturas rapidamente para expandir seu negócio com velocidade para outras cidades e estados, quanto para órgãos da saúde pública, que necessitam por sua vez construir centros médicos de campanha e centros de especialização para combater uma pandemia que se alastra com velocidade pelos oceanos. Para que estes e tantos outros exemplos que poderiam ser citados alcancem o sucesso é preciso que o setor de elevação de cargas continue ganhando força e investimento em tecnologia. Diante disto o presente trabalho visou diagnosticar movimentos involuntários apresentados em alguns modelos específicos de guindastes de elevação de carga, quando submetidos a períodos de repouso monitorados. Após um teste inicial para verificação do fenômeno, a realização de um brainstorm com a equipe envolvida permitiu elencar quais seriam as possíveis razões para o efeito visto, formando assim uma lista de hipóteses. Para cada uma destas hipóteses foi planejado e executado um teste específico para validá-la. Ao final dos testes foi possível apontar para pressões residuais do sistema como a principal causa destes movimentos, mesmo que não tenha sido possível levantar com precisão a fonte desta pressão. Como solução para o problema foi realizada a troca de um componente do circuito hidráulico que isolaria de maneira eficiente o cilindro hidráulico que realizava o movimento, quando o equipamento estivesse em repouso.

Palavras chave: Hidráulica. Guindastes. Movimentos involuntários. Pressão residual

ABSTRACT

The cargo lifting market has been increasingly strong, both in the domestic market and abroad. From a large wholesale network, which needs to build structures quickly to expand their business with speed to other cities and states, as well as to public health agencies, which in turn need to build campaign medical centers and centers of expertise to fight a pandemic that it spreads with speed through the oceans. For these and so many other examples that could be cited to be successful, it is necessary that the load lifting sector continues to gain strength and investment in technology. In view of this, the present work aimed to diagnose involuntary movements presented in some specific models of load lifting cranes, when submitted to monitored rest periods. After an initial test to verify the phenomenon, the realization of a brainstorm with the involved team allowed listing what would be the possible reasons for the effect seen, thus forming a list of hypotheses. For each of these hypotheses, a specific test was planned and executed to validate it. At the end of the tests, it was possible to point to residual pressures in the system as the main cause of these movements, even though it was not possible to accurately identify the source of this pressure. As a solution to the problem, a component of the hydraulic circuit was replaced, which would efficiently isolate the hydraulic cylinder that performed the movement, when the equipment was at rest.

Keywords: Hydraulics. Cranes. Involuntary movements. Residual pressure

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de um guindaste articulado autopropulsado Palfinger.	7
Figura 2 - Princípio da conservação da energia.....	11
Figura 3 - Quadro de Classificação de bombas utilizadas em circuitos hidráulicos	12
Figura 4 - Representação bomba de engrenagens	13
Figura 5 - Representação bomba de Palhetas	14
Figura 6 - Esquema da regulagem de vazão da bomba de palhetas	15
Figura 7 - Bomba de pistões axiais.....	15
Figura 8 - Válvula direcional do tipo carretel deslizante.....	18
Figura 9 - Comando hidráulico de controle proporcional	19
Figura 10 - Válvula de simples retenção	19
Figura 11 - Válvula de contrabalanço simples	20
Figura 12 - Válvula de contrabalanço dupla.....	21
Figura 13 - Simbologia cilindro dupla ação	23
Figura 14 - Cilindros formando sistema telescópico	23
Figura 15 - Simbologia cilindro simples ação.....	24
Figura 16 - Fluxograma de atividades	27
Figura 17 - Imagem da giga de testes utilizada	29
Figura 18 - Realização do primeiro teste.....	30
Figura 19 - Giga de teste instalada no equipamento.....	31
Figura 20 – Variação da temperatura do óleo hidráulico ao longo do tempo – 29/09/20	32
Figura 21 – Variação da temperatura do óleo hidráulico ao longo do tempo-30/09/20.....	32
Figura 22 – Esquema para verificação via <i>software</i> cad.	33
Figura 23 – Variação da densidade x temperatura para o óleo hidráulico	34
Figura 24 - Imagem em corte de uma fatia comando do hidráulico.....	35
Figura 25 - Linha rapidamente despressurizada	36
Figura 26 – Instalação provisória da válvula de contrabalanço dupla.....	37
Figura 27 - contrapressão oriunda do retorno.....	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	AMBIENTE DE TRABALHO	8
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	8
1.3	OBJETIVOS.....	8
1.3.1	Objetivo geral	9
1.3.2	Objetivos específicos.....	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
2.1	HIDRÁULICA	10
2.2	COMPONENTES DO CIRCUITO HIDRÁULICO DE UM GUINDASTE	11
2.2.1	Bomba hidráulica	12
2.2.2	Filtros Hidráulicos.....	16
2.2.3	Válvulas	17
2.2.4	Atuadores	21
2.2.5	Fluidos	24
2.3	SENSORIAMENTO	25
2.3.1	Transdutor de pressão	25
2.3.2	Transdutor de temperatura.....	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1	TESTE PADRÃO.....	27
3.2	ANÁLISE DO CIRCUITO HIDRÁULICO	28
3.3	ANÁLISE DE DADOS.....	28
3.4	LEVANTAMENTO DE HIPÓTESES	28
3.5	INTERVENÇÃO NO EQUIPAMENTO	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	TESTE PARA CONFIRMAÇÃO DO PROBLEMA	30
4.2	TESTE HIPOTESE DA EXPANSÃO TÉRMICA DO FLUÍDO.....	31
4.3	TESTE PARA VERIFICAÇÃO DE VAZAMENTOS INTERNOS.....	35
4.4	TESTE PARA VERIFICAÇÃO DA VÁLVULA DE CONTRABALANÇO	37
4.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	39

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
	APÊNDICE A - DIAGRAMA HIDRÁULICO DO GUINDASTE ESTUDADO.....	44

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da revolução industrial, os primeiros guindastes modernos foram instalados em portos, aplicados à movimentação de cargas para dentro e fora das embarcações. Em 1838, o empresário do ramo industrial William Armstrong projetou o primeiro guindaste hidráulico, o Jigger, que operava com um único cilindro hidráulico para o içamento de cargas, e possuía estrutura similar às gruas modernas. (MACHINE-HISTORY.COM, 2014)

Desde então a aplicação de máquinas hidráulicas para a elevação de cargas se tornou cada vez mais comum, não só para o uso portuário, mas também tem papel fundamental no dia a dia da indústria metal mecânica, bem como para a construção civil, agronegócio e tantos outros segmentos.

Dentre os equipamentos para a elevação de cargas mais utilizados mundialmente está o guindaste articulado autopropulsado, exemplificado na Figura 1. Empregado não somente para trabalho com materiais, mas também incorporado pela indústria de eletrificação para a elevação de pessoas, o guindaste articulado é reconhecido pela sua versatilidade e confiabilidade.

Figura 1 – Ilustração de um guindaste articulado autopropulsado Palfinger.



Fonte: Madal Palfinger S/A (2020)

Esse tipo de guindaste consiste em uma base, instalada diretamente sobre o chassi do veículo, que dispõe de extensores laterais responsáveis pela sua estabilidade durante a operação de movimentação de cargas. Sobre a base é montada a coluna do guindaste. A interface entre a base e a coluna é um dispositivo que permite a rotação em seu próprio eixo. Na extremidade da coluna oposta à base, é montada a estrutura chamada de braço principal, seguida pela do braço secundário. O acionamento destas estruturas se dá por cilindros hidráulicos. Dentro do braço secundário é instalado um conjunto de perfis, formando uma estrutura telescópica, ou seja, diversos perfis um dentro do outro, chamada "pacote de lanças", que também possuem cilindros montados em paralelo e são responsáveis pelo alcance e movimentação longitudinal do guindaste.

1.1 AMBIENTE DE TRABALHO

O trabalho foi realizado na empresa Madal Palfinger, que se originou da incorporação da Madal S/A à austríaca Palfinger S/A (MADAL PALFINGER S/A, 2020), no setor de Engenharia do Produto, divisão KBC, que é responsável pelo projeto dos guindastes articulados.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Este trabalho vem ao encontro de uma necessidade da empresa em entender um efeito hidráulico indesejado, apresentado em um modelo de seus guindastes, o PK32080.

Notou-se a presença de movimentos involuntários (ou movimentos fantasma) de cilindros, quando deixados em repouso após terem sido submetidos a um ciclo de trabalho.

A indicação da empresa para resolver esse problema, aliado à realização do trabalho de conclusão de curso, resultaram no tema escolhido. Este estudo foi de grande avalia, tanto para aprimoramento dos conhecimentos adquiridos e vivenciados durante o curso, quando para o incremento de conhecimento e crescimento tecnológico da empresa.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos gerais e específicos deste trabalho são descritos a seguir.

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a causa dos movimentos involuntários observados em um modelo de guindaste, e propor soluções) com o intuito de reduzi-los ou cessá-los.

1.3.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, os seguintes específicos foram definidos:

- a) compreender os parâmetros e fenômenos envolvidos na operação de um guindaste;
- b) caracterizar o produto estudado;
- c) realizar testes para avaliar as condições de operação que implicam ou favorecem a ocorrência dos movimentos involuntários;
- d) analisar resultados;
- e) elaborar/propor/implementar soluções;
- f) validar proposta.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo destina-se à fundamentação teórica necessária para atingir o objetivo do trabalho, elucidando o funcionamento de um sistema hidráulico e seus principais componentes.

2.1 HIDRÁULICA

A origem desta palavra é grega. É a união das palavras *hydor*, água e *aulos*, que pode ser traduzida como tubos ou condução. Logo, o significado etimológico do termo hidráulica é trazido como "condução de água". (FIALHO, 2003)

Grandes obras hidráulicas permeiam a história da humanidade. Tem-se registro de canais de irrigação na Mesopotâmia, oriundos dos rios Tigre e Eufrates, bem como coletores de esgoto na Babilônia desde 3750 a.C. (NETTO, 2015)

Todavia, nos dias atuais o termo "hidráulica" possui um significado muito mais amplo: estudo dos comportamentos de um fluido líquido, quer em repouso ou em movimento. As primeiras equações que descrevem o movimento de fluidos não compressíveis são atribuídas a Euler (NETTO, 2015).

A partir das equações de Euler, tornou-se possível o dimensionamento dos primeiros circuitos hidráulicos, que permitem obter forças de maior intensidade a partir da pressão gerada pela aplicação de uma força menor em uma área também menor. Esta propriedade nada mais é do que a aplicação do princípio de Pascal, elaborado pelo físico e matemático francês Blaise Pascal (1623-1662). (BRUNETTI, 2008).

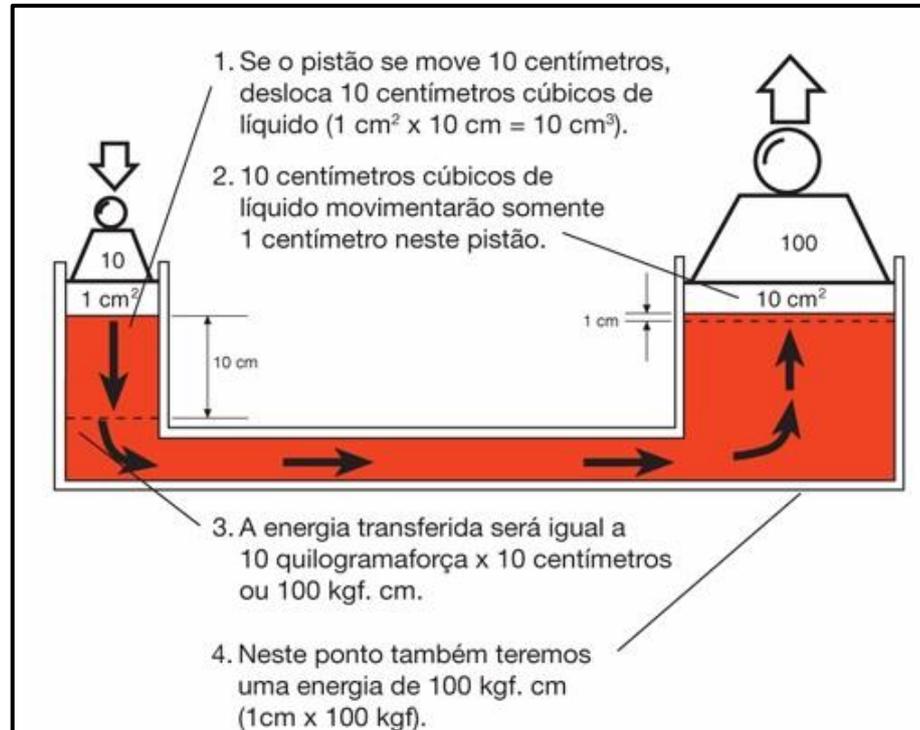
A multiplicação de força de um circuito hidráulica viabiliza a implementação e usufruto de diversos equipamentos diferentes.

O princípio de Pascal, conforme mostrado na Figura 2, esclarece que a pressão em um ponto de um fluido em condição estática é a mesma em todas as direções e em todos os pontos do fluido. Este princípio pode ser aplicado também para fluidos ideais na condição de escoamento. Entretanto o princípio não é válido para avaliação de escoamento de fluidos viscosos reais, pois nestes podem atuar forças tangenciais gerando perdas de carga. (COIMBRA, 2015)

Aliados à força, os sistemas hidráulicos atuais dispõem também da possibilidade de controle de movimento, em diferentes atuadores, rotativos ou lineares, combinados ou sozinhos e com diferentes níveis tanto de força quanto de velocidade. Os equipamentos que permitem

esses atributos aos circuitos hidráulicos são tratados no decorrer deste trabalho.

Figura 2 - Princípio da conservação da energia



Fonte: Parker Hannifin Corporation (1999)

2.2 COMPONENTES DO CIRCUITO HIDRÁULICO DE UM GUINDASTE

Para o correto dimensionamento dos componentes de qualquer equipamento hidráulico é necessário entender a finalidade daquele equipamento e a sua condição de trabalho.

Os componentes hidráulicos para um guindaste articulado devem sempre ser dimensionados considerando condições severas de uso, devido à natureza de sua operação: Elevação de cargas à longas distâncias, causando grandes esforços a estrutura devido as solicitações de momento.

Além da força necessária a um guindaste, o mesmo precisa prover precisão de movimentos e a capacidade de manter cargas elevadas por longos períodos de tempo sem que haja o declínio da estrutura.

Considerando estas premissas os itens abaixo explicam os principais componentes utilizados para compor o circuito hidráulico de um guindaste articulado.

2.2.1 Bomba hidráulica

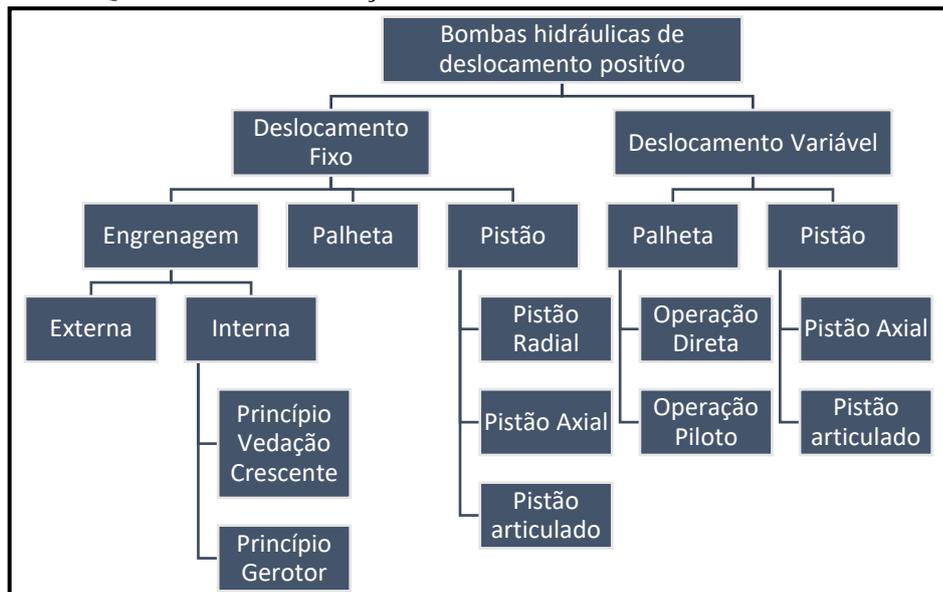
Este é o componente mais importante em um circuito hidráulico. Sua função é converter a energia mecânica, oriunda normalmente de um motor elétrico ou a combustão, em energia hidráulica. (PARKER HANNIFIN, 1999)

As bombas hidráulicas podem ser divididas, basicamente, em duas categorias: hidrodinâmicas, ou de fluxo, e hidrostáticas, ou de deslocamento positivo.

As bombas hidrodinâmicas, são utilizadas para o transporte do fluido por circuitos nos quais a única resistência será a criada pelo peso e atrito do fluido no sistema. (VICKERS, 1987)

A maioria das bombas hidrodinâmicas operam por meio de força centrífuga, com o fluido que entra na bomba sendo impulsionado para o sistema por um rotor. Não há barreira física entre os pórticos de sucção e saída da bomba. (VICKERS, 1987). As bombas hidrostáticas, são caracterizadas por fornecer ao circuito uma determinada quantidade de fluido a cada revolução ou ciclo. (PARKER HANNIFIN, 1999). As bombas realizam o transporte do fluido independentemente da pressão à saída, o que possibilita o aumento de pressão do sistema e faz com esta seja a categoria utilizada na maior parte das aplicações industriais e móbil, como guindastes, e por esta razão é a categoria observada no presente trabalho. Conforme mostra a Figura 3, as bombas hidrostáticas podem ser classificadas em duas grandes famílias: de deslocamentos fixo e variável. Cada uma delas, por sua vez, pode ser subdividida pela sua forma construtiva, que definirá a sua empregabilidade.

Figura 3 - Quadro de Classificação de bombas utilizadas em circuitos hidráulicos



Fonte: o autor (2020)

Nas bombas de deslocamento fixo a quantidade de fluido deslocado a cada revolução do seu eixo não pode ser alterada. A vazão do circuito montado com uma bomba de deslocamento fixo só irá variar caso a rotação do motor propulsor varie.

Para as bombas de deslocamento variável é possível que a quantidade de óleo deslocado a cada revolução varie de acordo com o ajustado na bomba, protegendo o componente de eventuais sobrecargas.

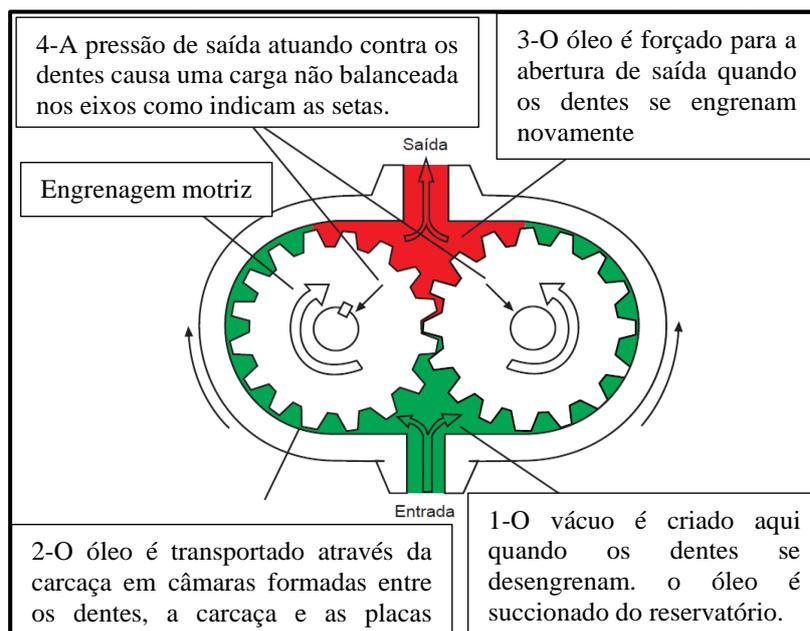
Neste trabalho são tratadas as bombas mais comumente empregadas em equipamentos hidráulicos: as de vazão fixa de engrenagens e as de vazão variável de palhetas e de pistões.

2.2.1.1 Bombas de engrenagem de vazão fixa

As de dentes externos são provavelmente o projeto mais antigo de bomba dentre os usados atualmente. São basicamente compostas por uma carcaça com orifícios de entrada e saída, que aloja um mecanismo composto um par de conjuntos eixo-engrenagem, um conjunto motor e um conjunto movido. (PARKER HANNIFIN, 1999)

O princípio de funcionamento desse tipo de bomba é bastante simples. Conforme Figura 4, as engrenagens giram em sentidos opostos gerando uma redução de pressão que succiona o óleo do tanque para a sua entrada. O óleo succionado é transportado em câmaras formadas entre a carcaça da bomba, os dentes da engrenagem e as placas laterais e forçado pelo pórtico de saída da bomba para dentro do circuito hidráulico. (FIALHO, 2003)

Figura 4 - Representação bomba de engrenagens



Fonte: Parker Hannifin Corporation (1999)

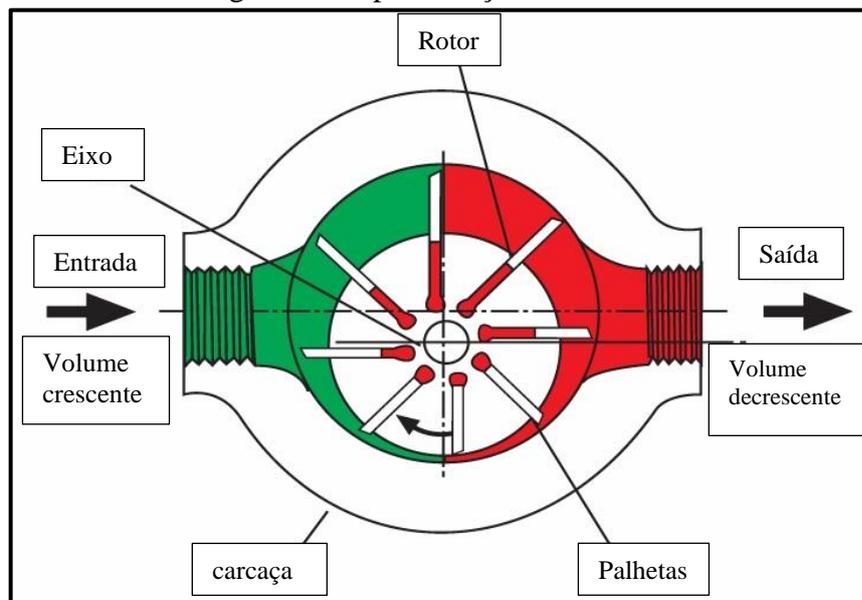
O custo da bomba de engrenagem, em geral, também é uma vantagem para o seu emprego. Em contrapartida essas bombas costumam ser consideravelmente mais ruidosas quando comparadas aos demais modelos, e não possuem um sistema próprio de segurança contra sobrecargas.

2.2.1.2 Bomba de palhetas de vazão variável

São constituídas por rotor provido de ranhuras, onde deslizam palhetas que, devido ao efeito da força centrífuga, durante a rotação do rotor, entram em contato com um anel excêntrico externo ao rotor.

Conforme Figura 5, o espaço entre o rotor, as palhetas e o anel formam as câmaras que se enchem de óleo vindo da tubulação de sucção da bomba. Este óleo é transportado até o pórtico de saída da bomba e conseqüentemente à tubulação do circuito hidráulico. Devido à excentricidade do anel em relação ao rotor, quando a câmara do conjunto rotor-palhetas passa pela região de sucção o volume do espaço entre palhetas, o rotor e o anel externo aumenta, gerando uma depressão que succiona o óleo. O contrário ocorre quando a mesma câmara passa pela região de saída da bomba, quando o volume compreendido entre pás diminui, obrigando o óleo a fluir pelo pórtico de saída com sua pressão interna aumentada. (FIALHO, 2003)

Figura 5 - Representação bomba de Palhetas

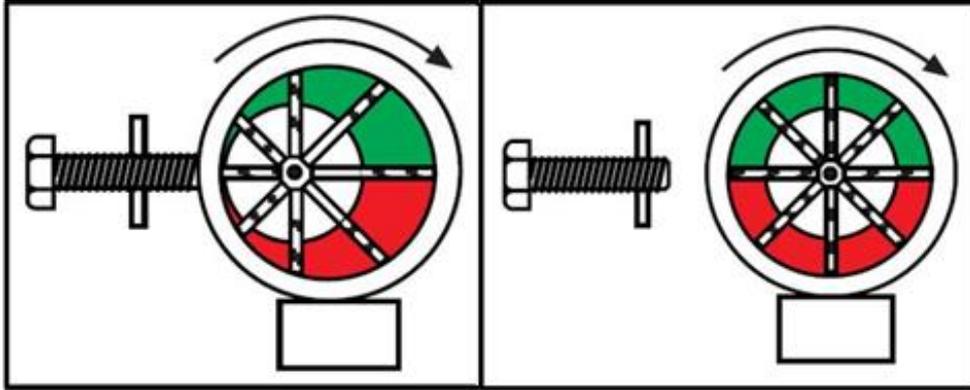


Fonte: Parker Hannifin Corporation (1999)

O deslocamento do anel excêntrico é o responsável pelo ajuste da vazão da bomba,

naquelas que possuem a possibilidade de ajustá-lo. Conforme ilustrado na Figura 6, quanto maior a excentricidade do anel externo em relação ao conjunto rotor, maior será a diferença de pressão entre a entrada e a saída gerado no interior da bomba e a indução de vazão.

Figura 6 - Esquema da regulação de vazão da bomba de palhetas

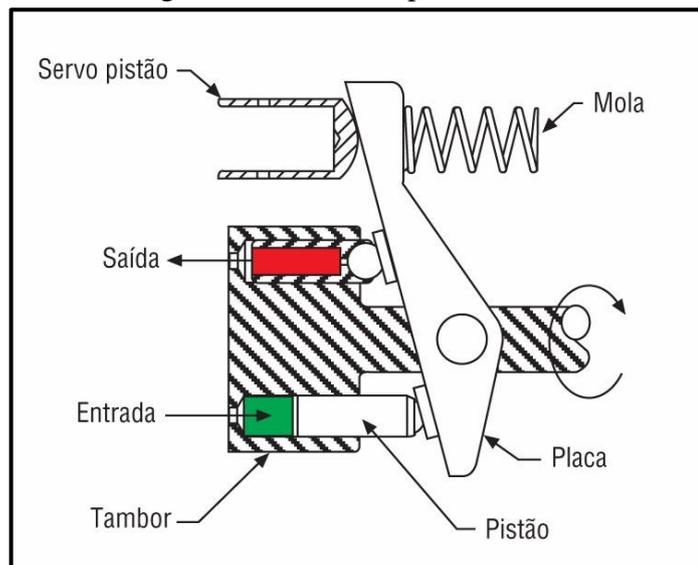


Fonte: Parker Hannifin Corporation (1999)

2.2.1.3 Bomba de pistões axiais de vazão variável

Possuem um conjunto rotativo para o transporte, ou bombeamento, do óleo formado por um tambor cilíndrico, pistões com sapatas e placa de deslizamento. (PARKER HANNIFIN, 1999), conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Bomba de pistões axiais.



Fonte: Parker Hannifin (1999)

As bombas funcionam com base no princípio do movimento alternativo executado pelos pistões, ou seja, em um sentido succionando o óleo enquanto simultaneamente expulsa o óleo

no sentido contrário. (FIALHO, 2003)

Em uma bomba do tipo axial, os pistões encontram-se paralelos entre si, bem como ao eixo do conjunto rotativo. (FIALHO, 2003)

São bombas robustas e que permitem o maior número de controles adicionais à sua operação, como controle de pressão remoto, variação de vazão sem alteração de pressão do sistema e controle de consumo de potência.

2.2.2 Filtros Hidráulicos

São responsáveis por proteger o circuito hidráulico de exposição demasiada a contaminantes que possam comprometer o os componentes do circuito.

É sabido que todos os fluidos hidráulicos contêm uma certa quantidade de contaminantes, entre partículas sólidas e líquidas, mas o excesso de contaminação interfere principalmente nas seguintes funções desse fluido no sistema:

- transmissão de energia, obstruindo orifícios dos componentes hidráulicos, comprometendo assim a sua segurança e bom funcionamento. (PARKER HANNIFIN, 1999)
- transmissão de calor, pois os reservatórios de um circuito hidráulico são dimensionados de tal maneira a proporcionar a troca térmica entre óleo, que retorna dos atuadores e demais componentes, e a atmosfera. Quando este fluido possui um alto índice de contaminação, os contaminantes tendem a se depositar nas paredes e fundo do reservatório, dificultando a troca térmica. (PARKER HANNIFIN, 1999)
- lubrificação dos componentes, fazendo com que estes apresentem desgastes prematuros e tenham sua vida útil encurtada. (PARKER HANNIFIN, 1999)

Neste trabalho serão apresentados os tipos de filtros comumente aplicados em guindastes articulados.

2.2.2.1 Filtro de sucção

São posicionados na linha de sucção e tem a função de proteger os demais componentes do circuito, em especial as bombas, de possíveis partículas depositadas no reservatório. Possuem malhas abertas, na ordem de 70 μ a 150 μ , e são capazes de reter particulados maiores, como cavacos de solda e elementos como porcas e arruelas.

2.2.2.2 Filtro de pressão

São normalmente posicionados entre a bomba e um componente específico do circuito hidráulico, que requer um nível de contaminação controlado para seu bom funcionamento.

Em geral possui malha de filtragem entre 2μ e 10μ , filtrando assim partículas muito pequenas e ajudando a manter o nível de contaminação do sistema controlado. Sua construção é robusta e tem por objetivo ser instalado em linhas pressurizadas do sistema, o que torna o seu custo elevado.

Em guindastes articulados, estes filtros são instalados entre a bomba e o comando hidráulico principal do equipamento.

2.2.2.3 Filtro de retorno

São posicionados no circuito próximo ao reservatório e tem a função de impedir que as partículas geradas pelo sistema hidráulico, como contaminantes externos que entram no sistema através da haste dos cilindros, retornem ao reservatório de óleo. (TRONCA, 2020)

Possuem malhas de filtragem entre 2μ e 20μ e, assim como os filtros de pressão, auxiliam no controle do nível de contaminação do sistema. Devido a sua construção não pode ser instalado em linhas pressurizadas do sistema, suportando pressões entre 7 e 20 bar, dependendo da dimensão e modelo do filtro, tornando seu custo mais baixo em comparação com o filtro de pressão.

Nos guindastes, este filtro é instalado na linha de retorno a tanque do comando hidráulico principal.

2.2.3 Válvulas

Estes componentes são responsáveis pelo controle do circuito hidráulico e podem ter diferentes funções. Por este motivo as válvulas são categorizadas pelo trabalho que realizam. É possível realizar um agrupamento de características e assim categorizar as válvulas em quatro grupos principais: de controle direcional, retenção, pressão e de fluxo.

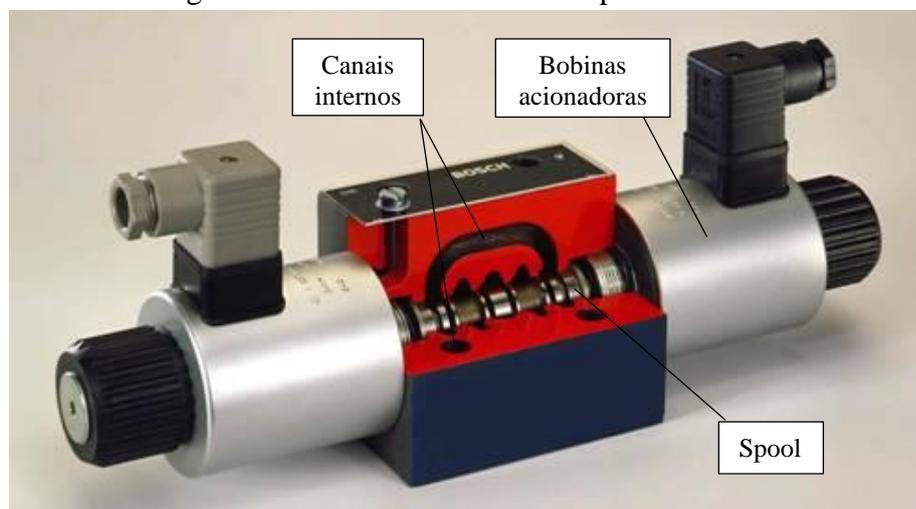
2.2.3.1 Válvulas de controle direcional

Também conhecidas como distribuidores, são utilizadas para direcionar o fluido hidráulico no sistema, possibilitando o acionamento de atuadores lineares e rotativos, bem como

apenas redirecionar o fluxo independentemente do fim desejado. Esse grupo de válvulas pode ser subdividido em quatro grupos menores: as válvulas direcionais do tipo pistão ou esfera (*poppet type*), as válvulas direcionais do tipo carretel deslizante (*sliding spool*), as válvulas direcionais do tipo carretel rotativo (*rotary spool*) e as válvulas direcionais do tipo proporcional (*proportional valves*). (FIALHO, 2003)

O emprego de um ou outro modelo de válvula direcional depende diretamente da sua função no sistema hidráulico e na forma de atuação. Na Figura 8 vemos a válvula de carretel deslizante, largamente utilizada na indústria.

Figura 8 - Válvula direcional do tipo carretel deslizante



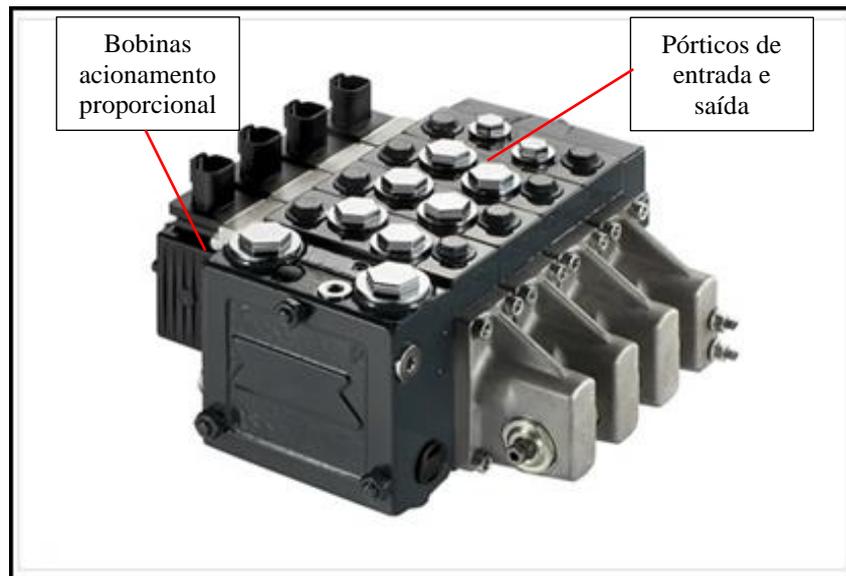
Fonte: SlideServe (2012)

Para guindastes hidráulicos as válvulas direcionais responsáveis pela movimentação dos atuadores são apresentadas em conjuntos unificados denominados Comandos Hidráulicos.

Comandos hidráulicos, como o mostrado na Figura 9, são componentes, modulares ou não, que sintetizam parte do circuito hidráulico, ou seja, em um único componente é possível possuir todas as válvulas direcionais necessárias ao circuito hidráulico, acionadas elétrica e/ou manualmente, bem como válvulas de controle de pressão, fluxo, acionamento proporcional entre outros.

A empregabilidade de comandos hidráulicos é bastante vasta, e seu uso é o mais indicado para equipamentos que requerem controle misto, manual e eletrônico, de seus atuadores, como é o caso de guindastes hidráulicos.

Figura 9 - Comando hidráulico de controle proporcional

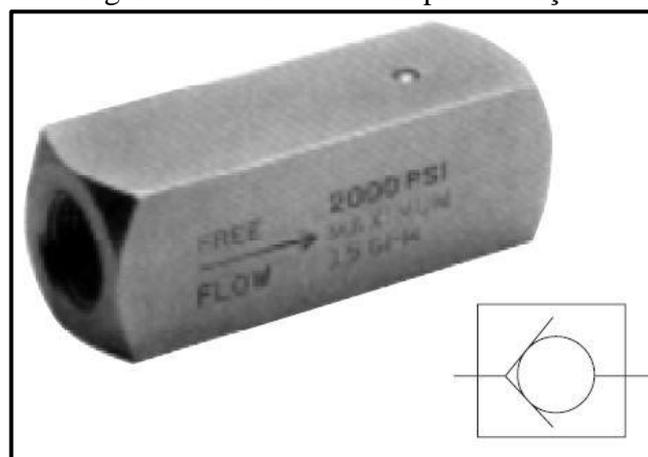


Fonte: Danfoss (2020)

2.2.3.2 Válvulas de retenção

São utilizadas para permitir que o fluxo passe livremente em um só sentido, bloqueando no sentido contrário. São válvulas unidirecionais. Consistem basicamente em corpo, conforme mostrado na Figura 10, vias de entrada e saída, e de um assento móvel, comumente um disco ou uma esfera, preso a uma mola de pressão. (PARKER HANNIFIN, 1999)

Figura 10 - Válvula de simples retenção



Fonte: Parker Hannifin (1999)

Quando a pressão do sistema hidráulico na entrada da válvula é alta o suficiente para vencer a força da mola que segura o assento, este é deslocado para trás. Com isso o fluxo flui através da válvula. (PARKER HANNIFIN, 1999)

Outra forma de deslocar o assento de uma válvula de retenção é através de uma pressão piloto, para válvulas construídas com esta concepção.

Em guindastes hidráulicos as válvulas de retenção aparecem em sua maioria como parte integrante das válvulas de controle de pressão.

2.2.3.3 Válvula de controle de pressão

Tem como função determinar e/ou limitar a pressão do circuito hidráulico.

São usualmente chamadas pelas suas funções primárias, que são: alívio, contrabalanço, sequência, redutora de pressão e de descarga. (PARKER HANNIFIN, 1999)

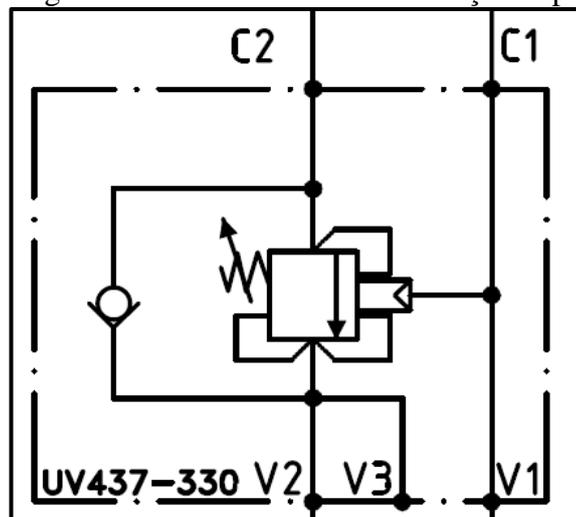
Dentre essas, as mais comumente utilizadas em guindastes hidráulicos são as válvulas de alívio, utilizadas para o ajuste da pressão do sistema, e de contrabalanço, Figuras 11 e 12.

As válvulas de contrabalanço podem ser simples ou duplas, podendo assim controlar a pressão e conseqüentemente a movimentação dos atuadores conectados em ambos os sentidos.

Estas válvulas são reguladas com a pressão desejada e são responsáveis por sustentar a carga caso alguma condição externa ocasione na interrupção da operação do equipamento, bem como impedir que o atuador seja exigido acima do dimensionado.

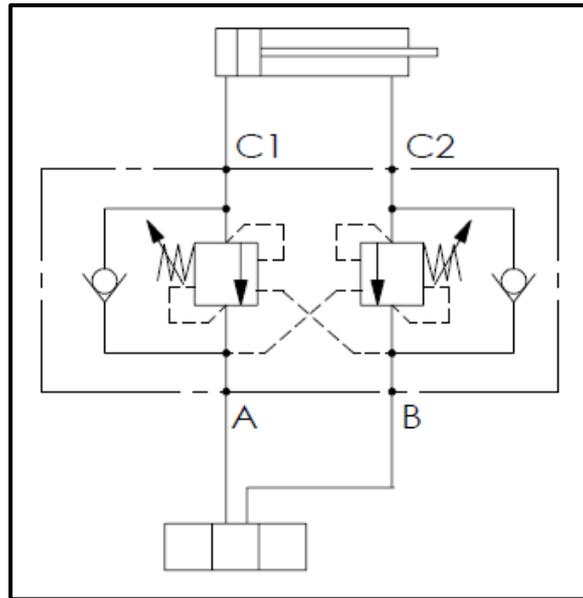
Em guindastes hidráulicos estas válvulas são reguladas de tal forma a impedir que, durante a operação do equipamento com carga, o momento máximo dimensionado para aquele guindaste seja ultrapassado.

Figura 11 - Válvula de contrabalanço simples



Fonte: o autor (2020)

Figura 12 - Válvula de contrabalanço dupla.



Fonte: HBS (2020)

2.2.3.4 Válvula de controle de vazão

São aplicadas nos circuitos hidráulicos quando se necessita controlar a velocidade de um determinado atuador, o que é feito através da diminuição do fluxo, promovido pelo estrangulamento da passagem de óleo no interior da válvula. (PARKER HANNIFIN, 1999).

Esta válvula pode ser instalada basicamente nas 3 formas abaixo (FIALHO, 2003):

- controle do fluxo na entrada do atuador;
- controle do fluxo na saída do atuador;
- derivação da linha de pressão a tanque.

2.2.4 Atuadores

Os atuadores hidráulicos convertem a energia hidráulica em energia mecânica. Eles são localizados nas extremidades dos circuitos hidráulicos e são os pontos onde toda a atividade visível ocorre. Os atuadores estão entre os primeiros itens a serem dimensionados em um circuito hidráulico, podendo ser divididos basicamente em dois tipos: lineares (cilindros) e rotativos (motores). (PARKER HANNIFIN, 1999)

Em guindaste, os atuadores responsáveis pela movimentação das articulações e extensão de lanças, excluindo acessórios, são cilindros hidráulicos de dupla ação. O movimento de rotação dos guindastes pode ser executado por cilindros de dupla ação ou por motores

hidráulicos, onde escolha está geralmente ligada ao porte do equipamento.

Os cilindros de simples e dupla ação são formados por, basicamente, um tubo chamado de camisa, um pistão móvel ou êmbolo, uma haste ligada ao pistão e vedações. Os cabeçotes que fecham as extremidades da camisa do cilindro são presos a ela por meio de roscas, prendedores, tirantes ou solda. (PARKER HANNIFIN, 1999)

Para o correto dimensionamento de um cilindro hidráulico são necessários alguns equacionamentos preliminares, que se baseiam na força que se deseja obter e na pressão disponível no circuito hidráulico. Esta informação tem influência direta no diâmetro do cilindro.

Uma vez conhecidas a força de avanço almejada e a pressão de trabalho do sistema, considera-se que a pressão disponível no cilindro será a do sistema, reduzida de 15%, em consequência das perdas. O diâmetro necessário ao pistão é dado pela Equação 1 (FIALHO, 2003).

$$D_p = \sqrt{\frac{4 \cdot F_a}{\pi \cdot P_{tb}}} \quad (1)$$

onde: D_p é o diâmetro do pistão [m]

F_a é a força de avanço [N];

P_{tb} é a pressão de trabalho [Pa].

Outro cálculo que se deve fazer é da carga máxima admissível na haste do cilindro para que não apresente efeito de flambagem durante a operação. Isso significa que a F_a máxima permitida não poderá ultrapassar a carga de flambagem K , conforme Equação 2 (FIALHO, 2003).

$$F_a = \frac{K}{S} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{\lambda^2 \cdot S} \quad (2)$$

onde: λ é o comprimento livre de flambagem [m]

E é o módulo de elasticidade do aço [Pa];

S é o coeficiente de segurança;

J é o momento de inércia para seção circular (m⁴).

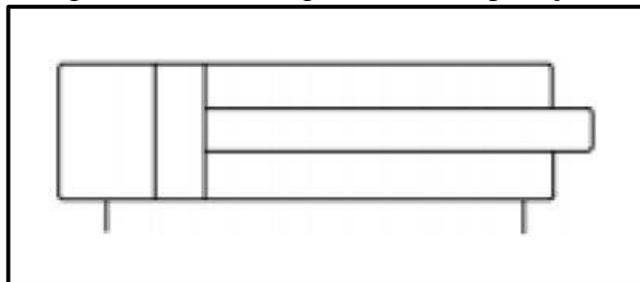
2.2.4.1 Cilindros de dupla ação

O cilindro de dupla ação é capaz de receber a pressão do fluido em ambos os lados do pistão. É necessário lembrar que, por possuírem áreas diferentes, tanto a força de retorno quanto a velocidade serão diferentes das de avanço. A área da parte frontal do cilindro é chamada de coroa, devido ao seu formato, é correspondente à área do embolo menos a da haste do cilindro.

Uma variação destes cilindros são os cilindros com passagem, aonde a haste do cilindro possui duas passagens de óleo que percorrem toda a sua extensão. Uma destas passagens possui comunicação com o volume do avanço do cilindro e outra com a do retorno. Estas passagens servem para que os cilindros atuem de forma sequenciada, formando a estrutura telescópica, anteriormente mencionada.

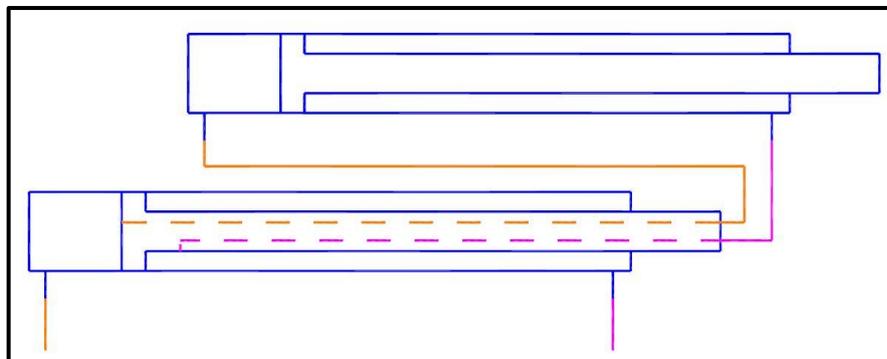
A Figura 13 mostra a simbologia do cilindro dupla ação padrão, enquanto a figura 14 mostra um conjunto de cilindros com passagem de óleo pela haste, formando o acionamento das lanças do guindaste hidráulico.

Figura 13 - Simbologia cilindro dupla ação



Fonte: Parker Hannifin (1999)

Figura 14 - Cilindros formando sistema telescópico

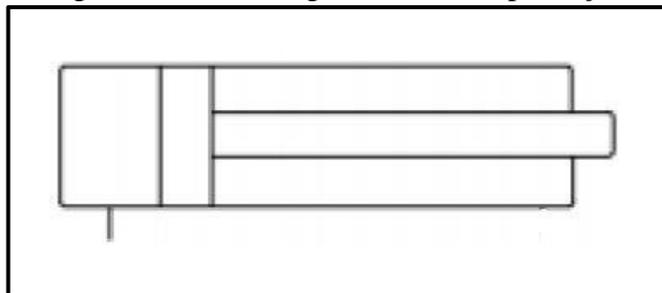


Fonte: o autor (2021)

2.2.4.2 Cilindro de simples ação

O cilindro de simples ação é capaz de receber pressão do fluido apenas de um lado. O movimento de recuo do cilindro é dado por uma força externa, que pode ser uma carga aplicada, uma mola ou mesmo um segundo atuador de simples ação. A Figura 15 mostra a simbologia deste cilindro em um esquema hidráulico.

Figura 15 - Simbologia cilindro simples ação.



Fonte: Parker Hannifin (1999)

2.2.5 Fluidos

O fluido hidráulico é o elemento vital de um sistema hidráulico. É um meio de transmissão de energia, um lubrificante, um vedador e um veículo de transferência de calor. (PARKER HANNIFIN, 1999)

Como meio de transmissão de potência, o fluido deve fluir com facilidade entre as linhas e orifícios de válvulas presentes no circuito hidráulico. Uma resistência excessiva deste fluxo pode gerar perdas de carga consideráveis no sistema. O fluido também deve ser tão incompressível quanto for possível a fim de que torne a resposta das válvulas e atuadores precisa e instantânea. (VICKERS, 1987)

A principal característica de um fluido hidráulico é a sua viscosidade, que é a medida da resistência ao fluir. Se um líquido flui com facilidade, sua viscosidade é baixa. (VICKERS, 1987)

As viscosidades dos fluidos são comumente representadas por unidades de medida como o *Second Saybolt Universal (SSU)*, o *Centistoke (cSt)* e os graus Engler (°E).

A escolha por uma alta ou baixa viscosidade depende em geral da temperatura que o circuito hidráulico poderá alcançar. A elevada temperatura do óleo tende a diminuir a sua viscosidade e isto pode impactar diretamente na estanqueidade do sistema, gerando vazamentos internos não desejáveis. (BOSCH REXROTH CORPORATION, 2020)

2.3 SENSORIAMENTO

Para monitoramento durante os testes executados no guindaste tratado no presente trabalho, foi necessário o uso de sensores para monitorar a pressão e a temperatura do fluido hidráulico. A seguir são descritos os sensores utilizados.

2.3.1 Transdutor de pressão

Trata-se de um sensor de medição que converte uma pressão aplicada nele em um sinal elétrico. O sensor recebe uma alimentação elétrica e envia um sinal a um CLP, que o decodifica e acaba por informar ao sistema qual é a pressão imediata do ponto aonde o transdutor está instalado. Geralmente o transdutor de pressão consiste em duas partes: um material elástico que se deforma sob a aplicação de pressão e uma parte elétrica que detecta esta deformação. (SILVEIRA, 2020)

2.3.2 Transdutor de temperatura

É um dispositivo que converte uma temperatura em uma quantidade física, como energia mecânica, pressão, mas geralmente em sinais elétricos, etc. Por exemplo, em um termopar, a diferença de potencial elétrico é produzida devido à diferença de temperatura entre seus terminais. Portanto, o termopar é um transdutor de temperatura.

Assim como os transdutores de pressão, os de temperatura também possuem um elemento sensor, cujas propriedades mudam de acordo com a temperatura. (ELECTRICAL 4 U , 2020)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar como foi realizado o estudo dos movimentos involuntários apresentados no braço de inclinação de um guindaste articulado.

Esses movimentos foram observados inicialmente em um equipamento de momento máximo de elevação de 30,4 tm (tm=tonelada/metro), denominado PK32080, entregue pela empresa Madal Palfinger a um cliente/parceiro de negócios no Chile. Este, por sua vez, revende o guindaste a uma empresa que trabalha no ramo de mineração e perfuração em ambiente não explosivo.

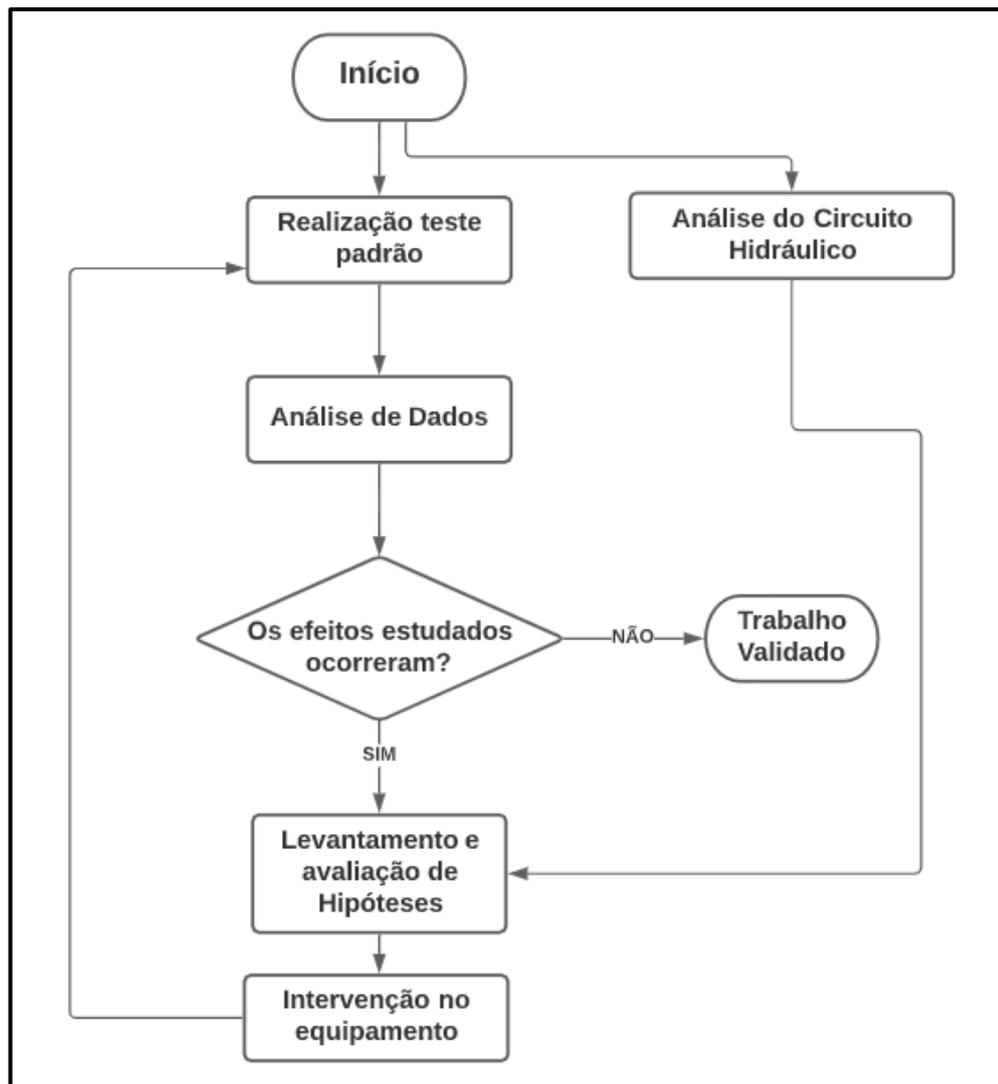
O equipamento é considerado de porte médio, possuindo 31,3 kN de peso, alcances horizontal e vertical máximos de 14 m e 18 m respectivamente, em suas lanças hidráulicas, podendo elevar até 8,5 kN de carga.

O PK32080 teve seu projeto na matriz iniciado em 2002 e lançamento realizado em 2003. Apesar do modelo já ter sido substituído por outro no mercado europeu a algum tempo, continua sendo comercializado na América latina. Por se tratar de um projeto concebido a mais de 18 anos, não possui diversas características hidráulicas e eletrônicas presentes nos produtos mais atuais.

Para realizar a entrega técnica o guindaste precisa ser aprovado em um ensaio especificado pelo cliente, para a liberação ao trabalho em minas. Segundo o cliente este ensaio não possui uma norma específica. Baseia-se em movimentar o guindaste até uma dada posição e então realizar o monitoramento de máquina parada. Segundo relato do cliente, ao realizar os testes para entrega técnica, foi percebido que o guindaste não só não se mantém imóvel, como realizava movimento contrário à força peso.

A partir desta reclamação, a empresa Palfinger tomou a decisão de realizar um trabalho de diagnóstico e proposta de correção dos movimentos involuntários, tomando como base o guindaste em questão, mas já sabendo que o efeito é apresentado em outros modelos da mesma linha. Esta necessidade veio ao encontro da escolha de um tema para realização do TCC. Para realizar o estudo, foram definidas as etapas mostradas na Figura 16, que são detalhadas na sequência.

Figura 16 - Fluxograma de atividades



Fonte: o autor (2021)

3.1 TESTE PADRÃO

Consiste no procedimento abaixo:

- com o guindaste em condição de operação, realizar movimentos em todos os eixos, promovendo o aquecimento do óleo do sistema hidráulico, até que chegue a uma temperatura próxima a 60 °C;
- posicionar no piso um cone de sinalização a uma distância da base do guindaste correspondente ao comprimento da primeira até a penúltima lança hidráulica completamente estendidas, mais 50% da última lança;
- estender as lanças hidráulicas do guindaste até que a ponta do conjunto esteja alinhada com o cone de referência;

- abaixar o braço de inclinação do guindaste até que a ponta do pacote de lanças ou o gancho montado nela toque levemente o topo do cone;
- interromper a operação do guindaste pressionando o botão de emergência e monitorá-lo por 10 minutos. A ponta do conjunto não pode afastar-se do cone, realizando movimento vertical para cima.

3.2 ANÁLISE DO CIRCUITO HIDRÁULICO

Nesta etapa do trabalho foi realizado o redesenho do circuito hidráulico do equipamento. O diagrama hidráulico original é fornecido juntamente com o manual do equipamento, apresentado em formato modular, ou seja, cada função em uma página separada, para facilitar a identificação de componentes no momento de uma possível intervenção de manutenção do equipamento.

A fim de facilitar as análises realizadas, o diagrama hidráulico foi redesenhado em um circuito unificado, apresentado no Anexo 1 deste trabalho.

3.3 ANÁLISE DE DADOS

Afim de agrupar e avaliar os resultados obtidos, esta etapa ocorreu após a conclusão de cada bateria de testes.

3.4 LEVANTAMENTO DE HIPÓTESES

Após a realização do primeiro teste, descrito no capítulo 4, antes de qualquer intervenção realizada no equipamento, foram levantadas as descritas na seção 4.1

3.5 INTERVENÇÃO NO EQUIPAMENTO

Consiste na substituição de itens e/ou instrumentação do equipamento, a fim de testar as hipóteses levantadas.

A primeira intervenção foi a instalação de uma giga de testes, mostrada na Figura 17. Este equipamento possui um flow meter, para a leitura da vazão de óleo, e dois transdutores,

para leitura dos sinais de pressão e de temperatura. O sensor utilizado para o teste foi o de temperatura, e foi instalado junto ao pórtico de admissão de óleo frontal do cilindro de inclinação do guindaste.

Figura 17 - Imagem da giga de testes utilizada



Fonte: Parker Hannifin (2020)

A segunda intervenção foi uma troca de *spool* do comando hidráulico principal do guindaste.

A terceira e última intervenção foi a troca do modelo de válvula de contrabalanço conectada ao cilindro de inclinação. O modelo original é uma válvula simples, que controla o fluido apenas uma via, e a válvula instalada em seu lugar é uma dupla, que controla o fluido em duas vias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discorre a respeito dos resultados obtidos nos testes executados no equipamento

4.1 TESTE PARA CONFIRMAÇÃO DO PROBLEMA

No dia 15 de julho de 2020, na área de teste de produto da empresa Palfinger, iniciou-se a bateria de testes em um equipamento com a mesma capacidade e configuração do que recebeu reclamações dos clientes chilenos (Figura 18) com o intuito de observar os movimentos involuntários.

Para a realização deste teste o equipamento não recebeu nenhum tipo de instrumentação ou alteração de projeto.

Figura 18 – Realização do primeiro teste



Fonte: o autor (2020)

A execução do teste seguiu rigorosamente o procedimento descrito na seção 3.1. Conforme esperado o equipamento apresentou os movimentos relatados pelo cliente. Durante o repouso a ponta do equipamento subia lentamente entre 120 e 150 milímetros no decorrer dos

10 minutos monitorados.

Após a execução do teste aconteceu a reunião dos envolvidos para o levantamento das possíveis hipóteses para o efeito, descritas abaixo.

- expansão térmica do fluido no interior do cilindro hidráulico gerando trabalho;
- vazamentos internos do comando hidráulico pilotando os seus êmbolos;
- tempo de histerese das molas e vedações do comando hidráulico muito elevados;
- mau funcionamento da válvula de contrabalanço ligada ao cilindro de inclinação;

Foram então realizados testes específicos para verificar cada uma das hipóteses.

4.2 TESTE HIPOTESE DA EXPANSÃO TÉRMICA DO FLUÍDO

Entre os dias 29 e 30 de setembro de 2020 foi realizado o segundo teste. Foi utilizado um guindaste de modelo e configuração idênticas ao do primeiro teste. Contudo o equipamento foi instrumentado, conforme Figura 19, com uma giga de testes, instalada no pórtilco de admissão de óleo frontal do cilindro de inclinação para monitorar as condições do óleo em contato com a haste do cilindro (área da coroa).

Figura 19 – Giga de teste instalada no equipamento.



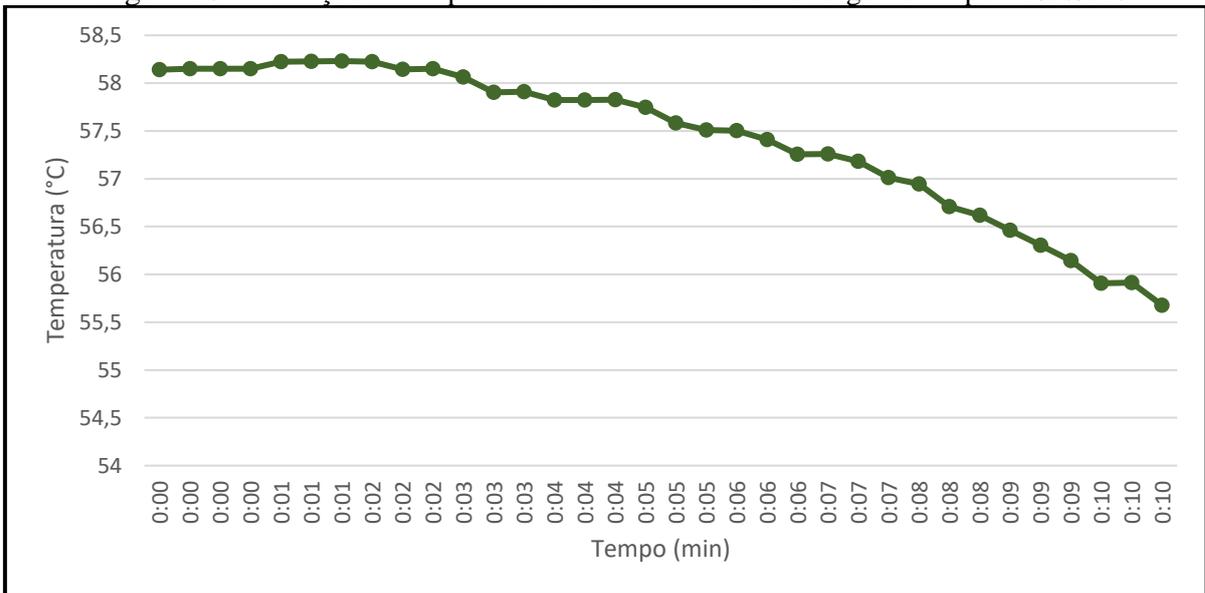
Fonte: o autor (2020)

O intuito deste teste foi avaliar se a variação de temperatura e pressão do sistema poderia alterar o volume de óleo no interior do cilindro, gerando uma diferença de pressão entre as duas câmaras do cilindro, frontal e traseira, resultando no movimento no cilindro.

Os resultados obtidos estão estratificados nos gráficos mostrados nas Figuras 20 e 21.

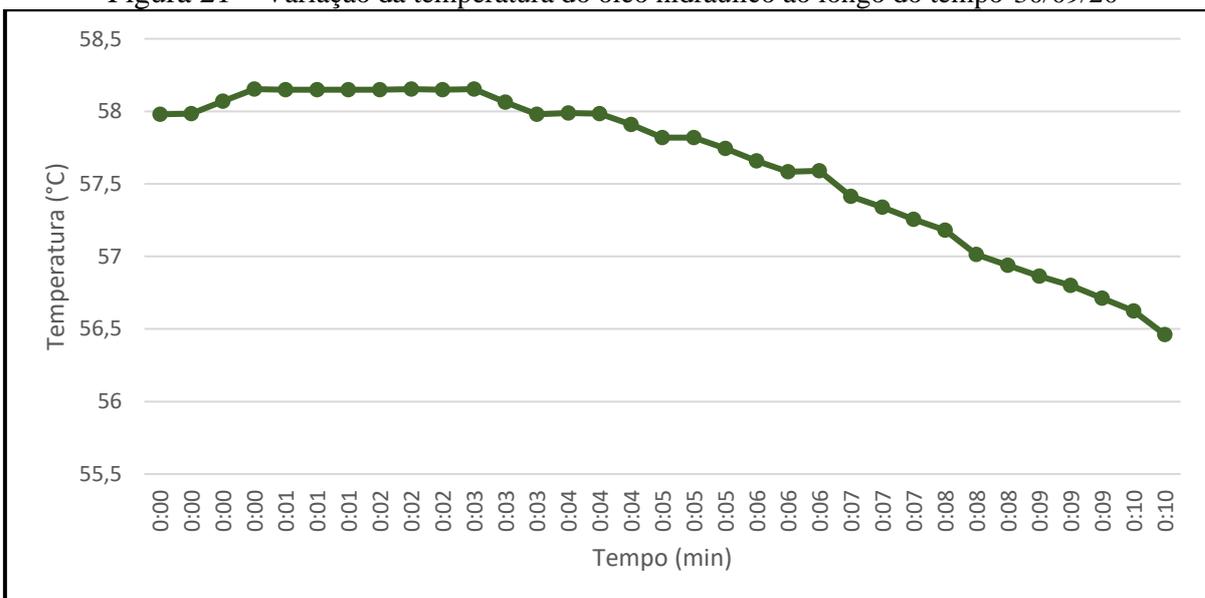
Observa-se que a temperatura do óleo reduziu de 58,5 para 55,5 °C no 1° teste, e de 58,5 para 56,5 °C no 2° teste.

Figura 20 – Variação da temperatura do óleo hidráulico ao longo do tempo – 29/09/20



Fonte: o autor (2021)

Figura 21 – Variação da temperatura do óleo hidráulico ao longo do tempo-30/09/20



Fonte: o autor (2021)

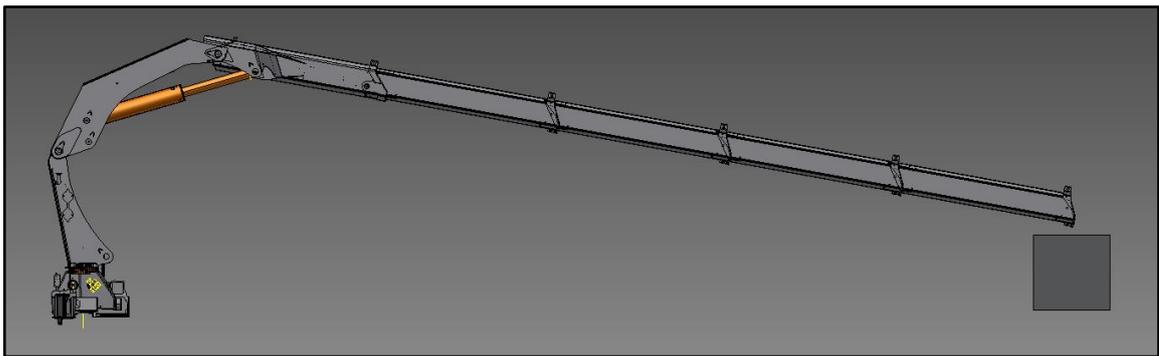
Devido a um mau funcionamento da giga de testes e a indisponibilidade de repetir o teste em outro momento, a medição de pressão acabou não acontecendo, o que impediu verificar se a pressão do sistema permaneceu inalterada.

Apesar disto, para o teste da hipótese térmica a massa de óleo em ambas as câmaras do cilindro é considerada constante, logo assumiu-se que o fluxo de óleo é inexistente e o diferencial de pressão constante.

O cilindro avaliado possui medidas de $\varnothing 200$ mm em seu embolo, $\varnothing 125$ mm de haste e um curso total de 1058 mm.

Com o auxílio do *software CAD*, conforme a Figura 22, foi possível visualizar que para a ponta da lança do guindaste afastar-se 100 mm verticalmente para cima do ponto de referência, é necessário que a variação da temperatura do óleo mova o embolo do cilindro 3,17 mm para fora, correspondendo a um aumento de volume de $9,95 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$.

Figura 22 – Esquema para verificação via *software cad*.



Fonte: o autor (2021)

Também com o auxílio do software de cad, foi verificado que, no início do teste, o cilindro hidráulico de inclinação estava com seu embolo 86% avançado com relação ao seu curso total. Considerando que ambas as câmaras do cilindro hidráulico estão sempre cheias de óleo, e que, ao final do teste, a ponta do guindaste terá subido os 100 mm, temos os seguintes volumes de fluído no interior do cilindro no início e ao final do teste:

- lado do êmbolo no início do teste: $0,02845 \text{ m}^3$;
- lado da haste no início do teste: $0,00292 \text{ m}^3$;
- lado do êmbolo ao final do teste: $0,02855 \text{ m}^3$;
- lado da haste no final do teste: $0,00280 \text{ m}^3$.

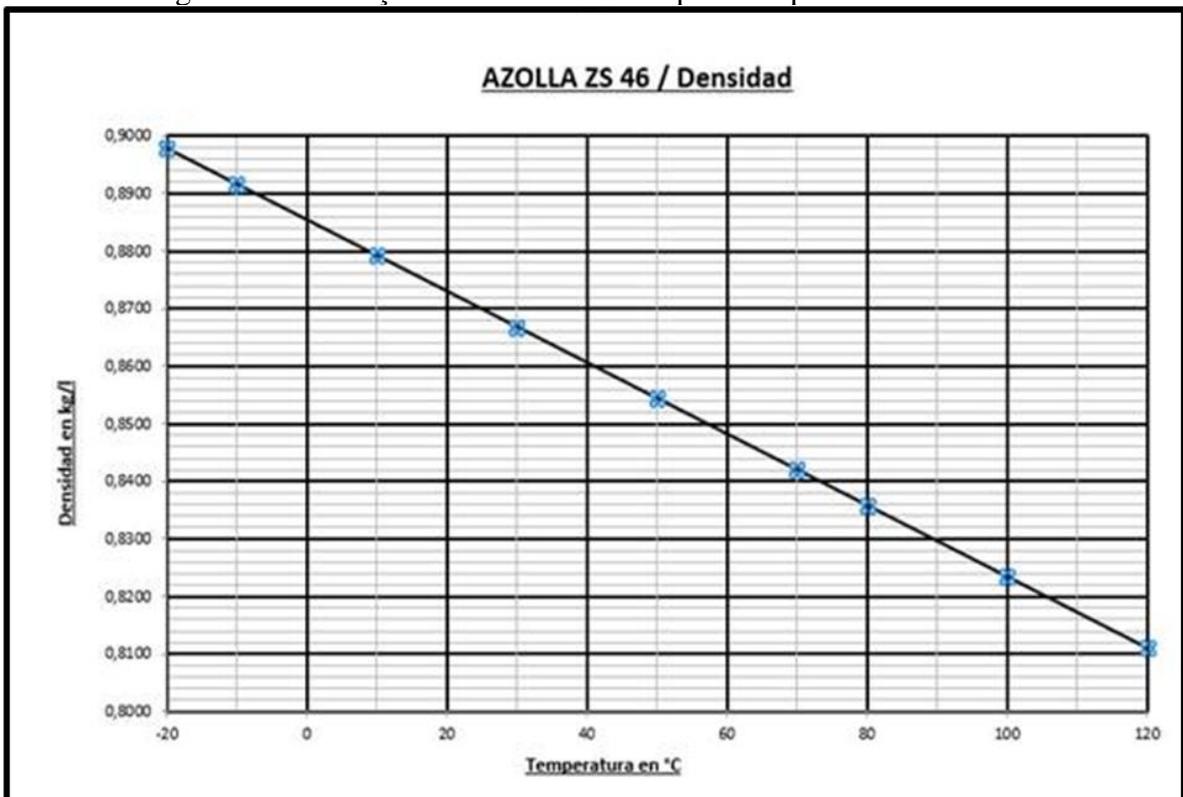
Com as informações de volume e densidade do óleo pode-se calcular a sua massa, usando a Equação 3.

$$m = V\rho \quad (3)$$

onde: m é a massa [kg];
 V é o volume [m³];
 ρ é a densidade [kg/m³].

O óleo utilizado no equipamento é o Azolla ZS46, cuja densidade varia conforme a sua temperatura, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Variação da densidade x temperatura para o óleo hidráulico



Fonte: Total (2020)

Para a temperatura de 58 °C, encontrada no óleo do cilindro no momento do início do monitoramento do teste, as massas de óleo são:

- lado do êmbolo a 58 °C: 24,16 kg;
- lado da haste a 58 °C: 2,48 kg.

Assumindo que, ao longo do teste, a massa de óleo do lado do êmbolo não variou, pois estava sendo descartada a hipótese de vazamentos internos do sistema, a densidade do óleo necessariamente precisaria ter sido alterada, devido à variação do volume. Logo para calcular

a nova densidade do fluido foi usada novamente a Equação 3, conforme abaixo:

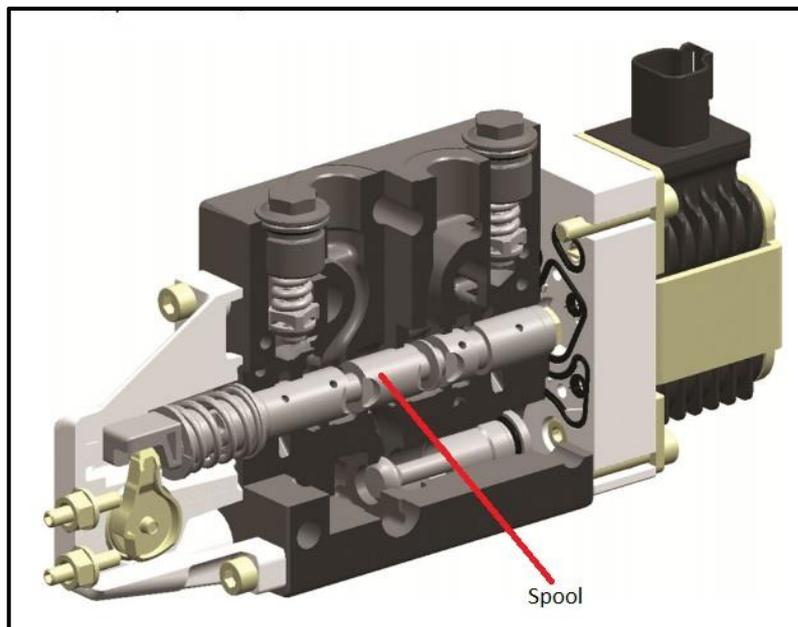
$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{24,16 \text{ kg}}{0,02855 \text{ m}^3} = 846,23 \text{ kg/m}^3$$

Segundo a figura 23, para este valor de densidade, a temperatura do óleo ao final do teste deveria estar em torno de 63 °C. Como houve redução de 58 °C para cerca de 54 °C apenas, como observado na média dos testes realizados, a hipótese de que o movimento do cilindro é causado pela variação de temperatura do óleo foi descartada.

4.3 TESTE PARA VERIFICAÇÃO DE VAZAMENTOS INTERNOS

Foi realizado em 26 de março de 2021 para verificar à possibilidade de vazamentos internos no comando hidráulico, causados por motivos como histerese das vedações que pilotariam o *spool* (carretel do comando, mostrado na Figura 24) realizando assim o movimento do cilindro.

Figura 24 - Imagem em corte de uma fatia comando do hidráulico



Fonte: Danfoss (2020)

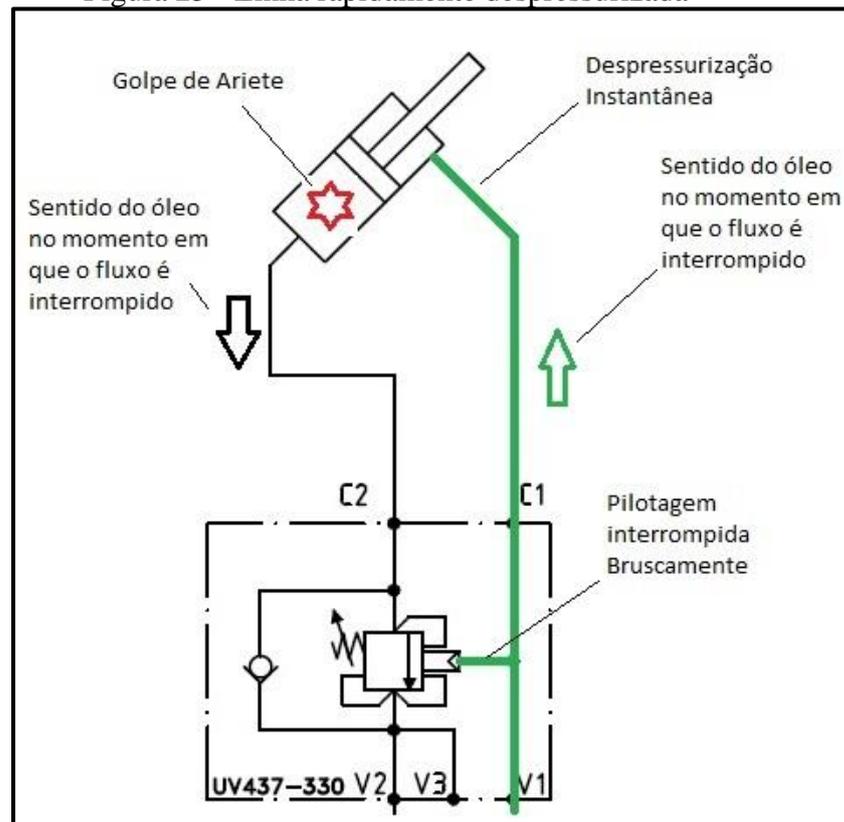
Para a execução deste teste foi contatada a Sauer Danfoss, fabricante e distribuidora do comando hidráulico, e solicitado uma alternativa ao *spool* de centro fechado na fatia responsável por comandar o cilindro de inclinação do guindaste. A empresa concedeu para

testes um *spool* na configuração de centro aberto e com controle de acionamentos por pressão. O *spool* fornecido foi montado no comando hidráulico no lugar do original e o teste foi realizado conforme procedimento padrão.

Foi observado que, ao cessar o acionamento pelo controle remoto para abaixar o braço de inclinação do guindaste, o cilindro operado moveu cerca de 120 mm aproximadamente na direção oposta, de forma instantânea. Durante o restante dos 10 minutos o guindaste não apresentou novos movimento de subida.

Avaliando este efeito pode-se considerar a hipótese de que, no momento em que é encerrado o acionamento no controle remoto do guindaste e o *spool* do comando hidráulico volta à posição de neutro, a pilotagem da válvula de contrabalanço é interrompida de forma instantânea. Sendo assim o óleo que fluía até então na direção V1-C1, destacado na Figura 25, é rapidamente despressurizado, em decorrência da troca do *spool* para centro aberto.

Figura 25 - Linha rapidamente despressurizada



Fonte: o autor (2021)

Sendo assim a válvula de contrabalanço fecha e o fluxo entre os pórticos C2-V2 é interrompido muito rapidamente, podendo assim gerar um golpe de aríete na câmara traseira do cilindro (área do pistão), implicando no seu movimento instantâneo na direção oposta.

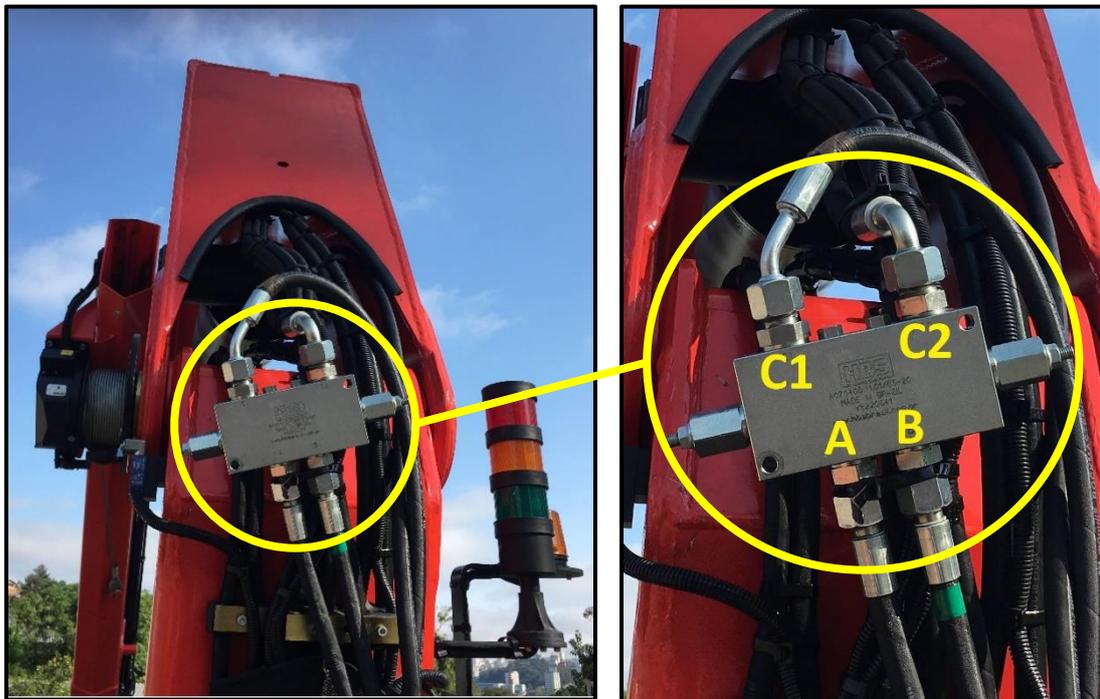
4.4 TESTE PARA VERIFICAÇÃO DA VÁLVULA DE CONTRABALANÇO

No dia 26 de março de 2021 foi realizado também o quarto teste no equipamento.

A quarta hipótese levantada foi que inserindo uma válvula de contrabalanço dupla no lugar da simples do cilindro de inclinação, o isolamento do cilindro seria mais eficiente, inibindo os movimentos.

Foi então instalado no cilindro, de maneira improvisada, uma válvula de contrabalanço dupla retirada de outro equipamento, conforme mostrado na figura 26.

Figura 26 – Instalação provisória da válvula de contrabalanço dupla



Fonte: o autor (2021)

A válvula em questão é fabricada pela empresa italiana HBS, seu diagrama é mostrado na Figura 12 (p. nº 21) e possui o seguinte princípio de funcionamento:

A válvula permite fluxo livre de A para C1 e B para C2 e controlado nas direções opostas. A cilindro e sua carga são bloqueados quando não houver fluxo (vazamento máximo 5 gotas / min), ou seja, quando o comando hidráulico não está acionando o cilindro ou quando a bomba hidráulica não está funcionando. A válvula deve ser ajustada em 1,3 vezes a pressão induzida da carga máxima. A contrapressão a jusante da válvula aumenta a pressão piloto solicitada.

Durante o teste o jogo de lanças apresentou um movimento de subida em torno de 40

mm durante os 4 primeiros minutos, nos 6 minutos seguintes houve a descida do conjunto de lanças, já esperado neste equipamento.

Com os resultados obtidos no quarto teste, a segunda explicação possível é que, durante os movimentos estudados, havia fluxo de óleo da câmara frontal do cilindro para o comando hidráulico. Quando instalada uma válvula de contrabalanço dupla, que impede por completo a comunicação do óleo, enquanto não for pilotada, os movimentos praticamente não ocorreram.

Desta informação o que se pode propor como causa raiz dos movimentos involuntários do cilindro é que, quando o movimento do teste padrão é cessado e o guindaste deixado em repouso, uma pressão residual no comando encontra o cilindro de inclinação do guindaste, movimentando-o. O fluxo de óleo gerado por esta pressão residual poderia se comunicar com o cilindro hidráulico através das válvulas de controle de pressão máxima encontradas internamente no comando, (linha laranja na Figura 27).

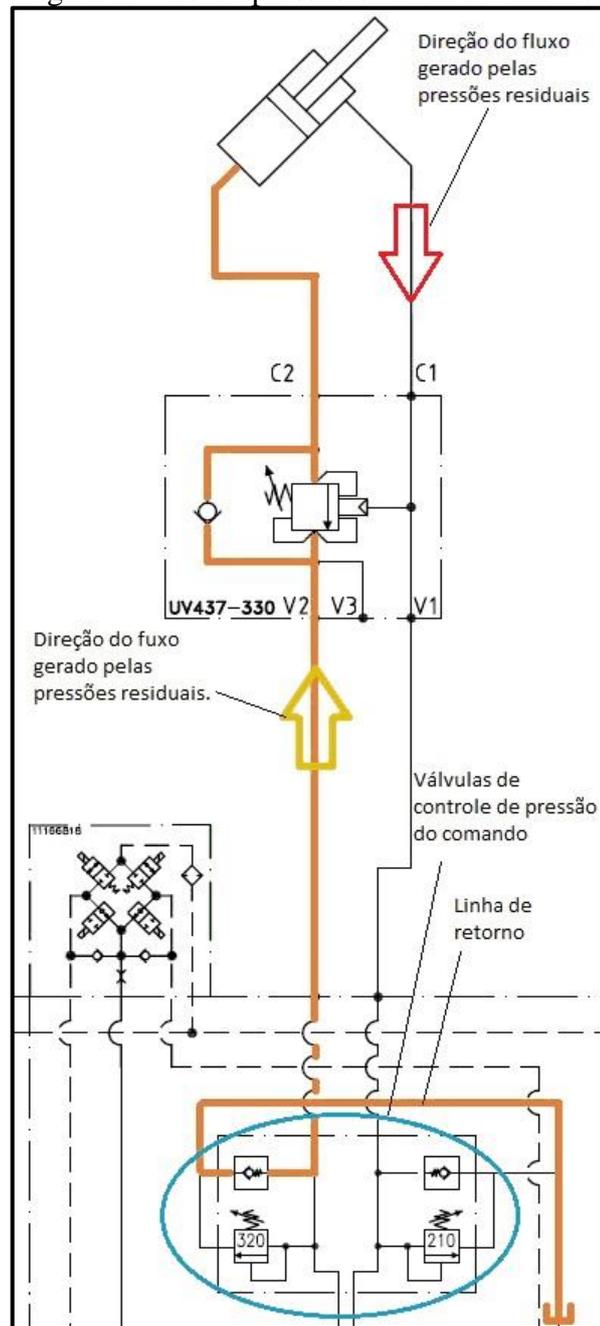
Tal pressão residual pode ter origem nas restrições encontradas pela linha de retorno do comando hidráulico até o tanque, instalado no chassi do caminhão.

Esta hipótese não pode ser testada devido a não haver tomadores de pressão nos pontos chave do comando hidráulico e a indisponibilidade de realizar mais testes no equipamento.

Outro fato que pode contribuir para os movimentos fantasma é uma possível comunicação entre as câmaras do cilindro hidráulico, oriundas de tolerâncias de fabricação. Em um teste efetuado no centro de excelência da Palfinger, na Áustria, a pedido da engenharia da Palfinger Brasil, um equipamento de configuração similar apresentou o efeito foi observado de maneira muito mais sutil em comparação ao modelo nacional, com a ponta do conjunto de lanças subindo na ordem de 20 mm em 10 minutos de teste. Uma das principais diferenças dos equipamentos é a origem dos cilindros, aonde o equipamento nacional possui cilindros fabricados no Brasil, enquanto o equipamento austríaco possui cilindros fabricados na Alemanha.

Porém a comparação deve ser apenas qualitativa, pois as condições de contorno do teste na Áustria não foram as mesmas dos testes realizados aqui no Brasil. O equipamento testado na Palfinger Austríaca, apesar de similar, não possuía a exata configuração dos equipamentos testados para este trabalho. Somado a isto, os testes na Palfinger da Áustria contavam com um equipamento fixado em uma bancada de testes. O projeto das bancadas de teste da planta austríaca é único e não reproduz as mesmas condições encontradas em um equipamento integrado em um caminhão nacional ou mesmo nas bancadas de teste nacionais.

Figura 27 - contrapressão oriunda do retorno



Fonte: o autor (2021)

4.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Pelos resultados encontrados no primeiro teste, a hipótese da expansão térmica do fluido, foi verificado que caso exista uma variação do volume do óleo, esta seria uma contração, pois o fluido perde calor no processo, o que resultaria na descida do conjunto de lanças, ao contrário do efeito visto.

Os resultados do segundo teste mostraram que a alteração do êmbolo do comando

hidráulico pode, de fato, influenciar no efeito dos movimentos fantasmas. Mais testes utilizando diferentes modelos de êmbolos poderiam ser realizados a fim de encontrar uma solução ótima para o problema.

Com base nos resultados encontrados pode-se determinar que, a hipótese com melhores resultados para a minimização dos efeitos apresentados seria a descrita na seção 4.4: a troca da válvula de contrabalanço. Esta foi a intervenção que se mostrou mais eficaz para inibir o efeito de movimentos fantasma.

Devido a estratégias comerciais da empresa decidiu-se não implementar esta solução neste equipamento, por se tratar de um projeto antigo e já consolidado no mercado, e realizar a oferta de um equipamento de projeto mais recente para o cliente chileno. O equipamento ofertado já possui em sua configuração padrão uma válvula de contrabalanço dupla, similar a testada neste trabalho, nesse mesmo ponto de seu circuito hidráulico, dentre outras melhorias no seu circuito hidráulico e elétrico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizado um estudo acerca do guindaste articulado PK32080 da empresa Madal Palfinger, que apresentava movimentos não comandados quando deixado em repouso. O objetivo deste trabalho foi descobrir a causa de tais movimentos e uma maneira de inibi-los. Para tanto, uma bateria de testes foi realizada, visando obter indícios do motivo do fenômeno indesejado encontrado e uma maneira de diminui-lo ou, se possível, anula-lo.

Antecedendo os testes foi realizada uma análise do diagrama hidráulico com o intuito de levantar possíveis causas para o fenômeno.

Assim, desta análise foram levantadas algumas hipóteses, cada uma implicando no planejamento e execução de teste para sua verificação.

Os resultados obtidos em cada teste foram avaliados e serviram como ponto de partida para o próximo até que se encontrasse uma explicação satisfatória e, se possível, uma solução para o fenômeno estudado.

Baseado nos resultados, é possível afirmar que os objetivos estabelecidos foram alcançados de forma parcial, pois os movimentos indesejados foram minimizados conforme o almejado, mas não ficou comprovado com total certeza a causa dos movimentos.

A implementação de uma válvula de contrabalanço dupla, no lugar da simples, junto ao cilindro de inclinação do guindaste articulado minimizou os movimentos do equipamento quando em repouso de maneira satisfatória, pois a pressão residual do circuito que gerava o efeito visto não era forte o suficiente para pilotar a nova válvula instalada liberando o fluxo até o cilindro.

Assim foi possível sugerir uma alteração para o diagrama hidráulico do equipamento, que passaria a não mais apresentar movimentos involuntários. Por outro lado, a empresa optou por não mais investir em alterar um projeto antigo, e sim ofertar ao mercado uma nova linha de equipamentos, quando o nível de precisão for superior ao que o equipamento pode entregar na configuração atual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOSCH REXROTH CORPORATION. **Using Industrial Hydraulics**. [S.l.]: [s.n.], 2020.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

COIMBRA, A. L. **Mecânica dos Fluidos**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: E-PAPERS, 2015.

DANFOSS. Danfoss. **Danfoss.com**, 2020. Disponível em: <<https://www.danfoss.com/pt-br/products/valves/dps/pvg-proportional-valves/pvg-16-proportional-valves/>>. Acesso em: 16 out. 2020.

ELECTRICAL 4 U. Electrical 4 U. **Electrical 4 U**, 2020. Disponível em: <<https://www.electrical4u.com/temperature-transducers/>>. Acesso em: 18 out. 2020.

FIALHO, A. B. **Automação hidráulica: projetos, dimensionamento e análise de circuitos**. 2ª. ed. São Paulo: Érica, 2003.

FÍSICA Termodinâmica. **Wordpress**. Disponível em: <<https://fisitermodinamica.wordpress.com/segundo-corte/biografias/joseph-bramah/>>. Acesso em: 14 Outubro 2020.

HALLIDAY, R. W. **Fundamentos da Física**. 8ª. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 1, 2009.

JÚNIOR, J. S. D. S. Brasil Escola. **Brasil Escola**, 2020. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-forca.htm>>. Acesso em: 10 Outubro 2020.

MACHINE-HISTORY.COM. **Site da Machine-History.Com**, 2014. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20140110235111/http://www.machine-history.com/Armstrong%20Hydraulic%20Crane>>. Acesso em: 03 set. 2020.

MADAL PALFINGER S/A. Sobre a empresa: Palfinger S/A. **Palfinger**, 2020. Disponível em: <<https://www.palfinger.com/pt-br/sobre-a-palfinger/historia>>. Acesso em: 04 set. 2020.

NETTO, J. M. D. A. **Manual de Hidráulica**. 9ª. ed. Rio de Janeiro: Blucher, 2015.

PARKER HANNIFIN. **Tecnologia Hidráulica Industrial**. Jacareí: [s.n.], 1999.

PARKER HANNIFIN. **Parker Hannifin**, 2020. Disponível em: <<https://ph.parker.com/br/pt/diagnostic-test-kits-sensocontrol-parker-service-master-easy-meter-and-accessories>>. Acesso em: 17 nov. 2020.

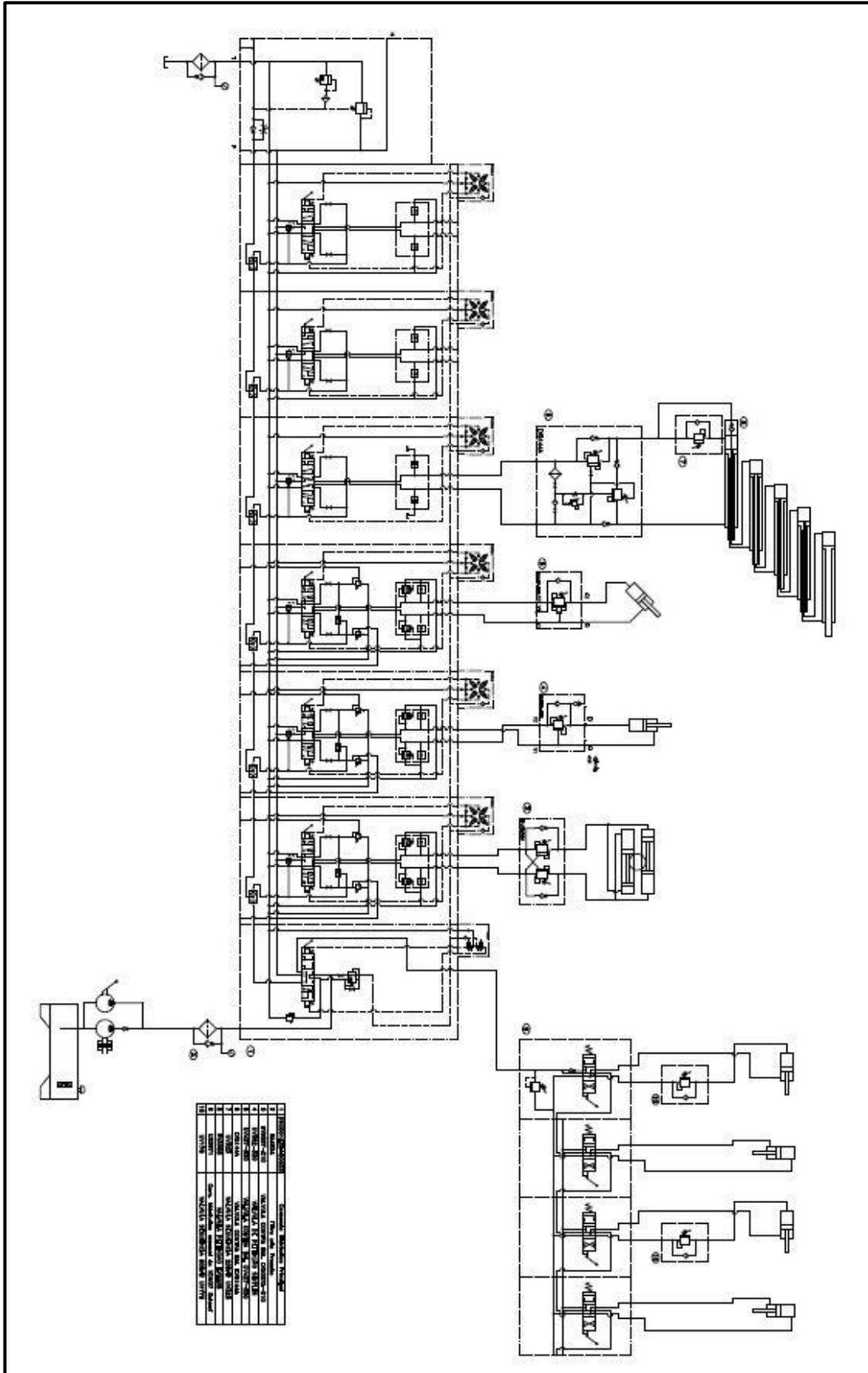
SILVEIRA, C. B. **Citisystems**, 2020. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/transdutor-de-pressao/>>. Acesso em: 18 out. 2020.

THPANORAMA. **Thpanorama**, 2020. Disponível em: <<https://pt.thpanorama.com/blog/cultura-general/las-10-aplicaciones-de-la-prensa-hidraulica-ms-importantes.html>>. Acesso em: 22 out. 2020.

VICKERS. **Manual de oleohidraulica industrial**. [S.l.]: Blume, 1987.

TRONCA, Rafael. Módulo 2 - Filtros Hidráulicos, notas de aula, 2020.

APÊNDICE A - DIAGRAMA HIDRÁULICO DO GUINDASTE ESTUDADO



Fonte: o autor (2020)