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

FELIPE BETTIN SACHET

ANÁLISE CINEMÁTICA VIRTUAL DAS EXTENSÕES DE LANÇA DE UM GUINDASTE ARTICULADO

CAXIAS DO SUL
2020

FELIPE BETTIN SACHET

ANÁLISE CINEMÁTICA VIRTUAL DAS EXTENSÕES DE LANÇA DE UM GUINDASTE ARTICULADO

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à Universidade de Caxias do Sul para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me.Adelair Lino Colombo

CAXIAS DO SUL

2020

FELIPE BETTIN SACHET

ANÁLISE CINEMÁTICA VIRTUAL DAS EXTENSÕES DE LANÇA DE UM GUINDASTE ARTICULADO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos de fabricação, seleção econômica

Aprovado em / /

Banca Examinadora

_____
Prof. Me. Adelair Lino Colombo
Universidade de Caxias do Sul - UCS

_____
Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul - UCS

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

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha mãe, Fernanda e ao meu padrasto Alessandro, pelo auxílio, apoio e dedicação que me proporcionaram ao longo desta jornada. Sem eles, esta conquista não seria possível.

Aos meus avós, Astério Pedrinho Bettin e Catarina Schneider Bettin, por terem influenciado na minha escolha, e me apoiado em todas minhas escolhas pessoas e profissionais.

Ao meus padrinhos, Laoni e Marina, juntamente a minha dinda Juliana e meu primo João Vitor, pelos ensinamentos e pela confiança que sempre depositaram em mim.

A minha namorada, Louise, que me acompanhou durante todo o período de graduação com muito amor e paciência.

Ao meu orientador, Prof. Me. Adelair Lino Colombo, que sempre esteve presente e disposto a me auxiliar diretamente para desenvolvimento e aprimoramento desse trabalho.

Aos meus colegas da Palfinger, por me auxiliarem e muitas vezes me orientarem, tornando possível a produção do trabalho desenvolvido.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a reproduzir o sistema hidráulico e simular a movimentação de extensão da lança de um guindaste articulado. Utilizando os dados do sistema hidráulico, foi possível reproduzi-lo no módulo do Matlab denominado Simulink, com a ajuda da ferramenta Simscape. O modelo representativo propiciou a retirada de dados da bomba hidráulica, da válvula de retenção de carga e dos cilíndros, verificando o tempo do processo de abertura das lanças. O conjunto de lanças também foi simulado em software de análise virtual de movimentações, permitindo retirar velocidades, acelerações e deslocamentos de cada componente do sistema. O comparativo entre os dados de simulação com os dados obtidos de testes experimentais mostraram boa assertividade com a simulação realizada, e permitem afirmar que a utilização das análises virtuais realizadas, podem agregar no preço agregado do produto final e no custo final de desenvolvimento de projetos hidráulicos.

Palavras-chave: *Simulink, MSC Adams View*, sistema hidráulico, guindaste articulado.

ABSTRACT

This analysis is based on the reproduction of the hydraulic system and the simulation of the movement of the boom extension system at an articulated crane. Using the data from the hydraulic system present in the crane boom extension set, it was possible to reproduce the system in the Matlab module called Simulink, aided by the Simscape tool. The representative model provided the data collection from the hydraulic pump, the load check valve and the cylinders, checking the time of the boom opening process. The set of spears was also simulated in virtual movement analysis software, allowing the removal, acceleration and displacement of each component of the system. The comparison between the simulation data with the data obtained from experimental tests shows good assertiveness with a simulation performed and allow to affirm that the use of the virtual analyzes performed, can add to the aggregate price of the final product and the final cost of developing hydraulic projects.

Keywords: Simulink, MSC Adams View, hydraulic system, crane.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Princípio da transmissão da energia hidráulica 12
Figura 2 - Princípio da Conservação de Energia 14
Figura 3 - Bomba de pistões radiais. 15
Figura 4 - Bomba de pistões axiais. 15
Figura 5 - Bomba de engrenagens. 16
Figura 6 - Bomba de palhetas. 17
Figura 7 - Cilindro de haste dupla 19
Figura 8 - Cilindro de dupla ação 19
Figura 9 - Modelo de deslocamento 22
Figura 10 - Fluxograma de atividades 25
Figura 11 - Componentes de um guindaste articulado 26
Figura 12 - Modelo 3D 28
Figura 13 - Conjunto de lanças e movimentações 29
Figura 14 - Juntas de conexão do sistema 31
Figura 15 - Posicionamento inicial e final do sistema 32
Figura 16 - Trajetória da última lança hidráulica 32
Figura 17 - Parâmetros Bomba Hidráulica 34
Figura 18 - Parâmetros de tubulações 36
Figura 19 - Componentes do sistema 37
Figura 20 - Modelo Virtual 38
Figura 21 - Velocidades em X para a extremidade do conjunto 39
Figura 22 - Velocidades em Y para a extremidade do conjunto 40
Figura 23 - Acelerações em X para a extremidade do conjunto 40
Figura 24 - Acelerações em Y para a extremidade do conjunto 41
Figura 25 - Deslocamento da extremidade da terceira lança hidráulica no eixo X 41
Figura 26 - Deslocamento da extremidade da terceira lança hidráulica no eixo Y 42
Figura 27 - Deslocamento da extremidade da terceira lança hidráulica em X e Y. 43
Figura 28 - Constante de rotação da bomba hidráulica 44
Figura 29 - Pressão na bomba hidráulica 45
Figura 30 - Vazão da Bomba Hidráulica 46
Figura 31 - Pressão na Saída da Válvula de retenção 47
Figura 32 - Velocidades dos cilindros hidráulicos 48

Figura 33 - Deslocamentos dos cilindros 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos e cursos de abertura dos cilindros do sistema.....33
Tabela 2 - Tubulações do sistema de extensão de lanças.....36
Tabela 3 - Tubulações de alimentação do sistema 37
Tabela 4 - Comparativo de tempos de abertura dos cilindros hidráulicos.....50

LISTA DE SIGLAS

A	área
di	diâmentro interno (pistão)
F	Força
g	aceleração da gravidade
h	altura
m	massa
P	pressão
s	deslocamento inicial
s'	deslocamento final
Δs	variação do deslocamento
V	velocidade angular
v	velocidade (tubulação)
α	aceleração angular
ω	aceleração angular
v	viscosidade cinemática

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8
1.1 AMBIENTE DE TRABALHO 9
1.2 JUSTIFICATIVA 9
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO 9
1.3.1 Objetivo geral 9
1.3.2 Objetivos específicos 9

2 REFERENCIAL TEÓRICO 11
2.1 TEORIA HIDRÁULICA BÁSICA 11
2.2 TRANSMISÃO DE ENERGIA HIDRÁULICA 12
2.3 COMPONENTES HIDRÁULICOS DE UM GUINDASTE ARTICULADO 14
2.3.1 Bombas hidráulicas 14
2.3.2 Válvulas hidráulicas 17
2.3.3 Cilindros hidráulicos 18
2.3.4 Fluidos hidráulicos 19
2.3.5 Reservatórios e comandos hidráulicos 21
2.4 PRINCÍPIOS DE DINÂMICA E CINEMÁTICA 21
2.5 SISTEMA DE MULTICORPOS 23

3 PROPOSTA DE TRABALHO 25
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA HIDRÁULICO 26
3.2 ELABORAÇÃO DO PROJETO 3D EM SOFTWARE VIRTUAL 27
3.2.1 Projeto 3D em software CAD 28
3.3 ANÁLISE VIRTUAL DO MOVIMENTO DE EXTENSÃO DE LANÇAS 29
3.3.1 Simulação do movimento de extensão de lanças 29
3.4 ELABORAÇÃO DO CIRCUITO HIDRÁULICO EM SOFTWARE VIRUAL 33
3.4.1 Blocos de parâmetros 34
3.4.2 Blocos de sinais físicos 34
3.4.3 Blocos de solução 35
3.4.4 Tubulações do sistema 35
3.4.5 Sistema hidráulico completo modelado com a ferramenta Simscape 37

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....39
4.1 DADOS COLETADOS DA SIMULAÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO 39
4.2 DADOS COLETADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA HIDRÁULICO 43
4.2 DADOS COLETADOS EM TESTES FÍSICOS 49

5 CONCLUSÕES 51

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 52

1 INTRODUÇÃO

A indústria e a construção civil possuem destaque no cenário mundial atual por serem a principal fonte econômica de diversos países. A evolução e a expansão desses segmentos ocorrem cada vez mais pelo globo e seus reflexos já apresentam importância fundamental para a constituição econômica e social de cidades, estados e países.

A necessidade de garantir uma produtividade suficiente para se manterem competitivas no mercado fez com que as empresas atuantes nesses segmentos buscassem alternativas para otimizar seus processos e suprir as necessidades dos consumidores.

Devido à alta demanda de produção e à necessidade de transporte de produtos e matérias-primas, surgiram as máquinas de elevação e transporte de cargas e pessoas, que proporcionaram aos segmentos da indústria, da construção civil e até do agronegócio, a agilidade e a facilidade de manipular grandes lotes e volumes de inventário, além de abrir portas para trabalhos e possibilidades até então desconsiderados.

No cenário atual, a presença de equipamentos utilizados para elevação de cargas já é de caráter comum. Nesse segmento, o mercado brasileiro visa uma positiva projeção futura em relação às demandas, de forma geral, baseado nas licenças de obras e serviços públicos, diretamente ligados às áreas de petróleo, energia eólica e gás. (CRANE BRASIL, 2018).

Dentre os equipamentos mais utilizados para a movimentação de pessoas e, principalmente, de cargas, está o guindaste articulado. autopropulsado, que tem uma base fixa instalada sobre um caminhão e possui um alojamento para os braços de estabilização que, com o auxílio de cilindros, apoiam-se ao chão para garantir a estabilidade na operação do equipamento. A base recebe um eixo ligado a um mecanismo de giro, permitindo a rotação do equipamento. No topo desse eixo, encontra-se a coluna do guindaste que, juntamente a um cilindro hidráulico, proporciona a elevação do braço principal da máquina. Diretamente ligado ao braço principal, também por meio de cilindros hidráulicos, encontram-se o braço secundário e um conjunto de lanças telescópicas, que permitem o alcance de aplicação e a elevação das cargas.

Visando estar à frente, empresas atuantes no ramo de elevação de cargas investem no constante aperfeiçoamento de seus produtos e de seus diversificados sistemas, sendo estes elétricos, mecânicos, hidráulicos ou apenas para atendimento de demandas específicas.

Para o aperfeiçoamento desses produtos e sistemas, existem muitas variáveis passíveis de análise que podem proporcionar melhorias, seja no desempenho do equipamento, na

diminuição das perdas existentes durante os processos ou, até mesmo, no reflexo de custos do produto.

1.1 AMBIENTE DE TRABALHO

O presente trabalho de conclusão será realizado na área de Engenharia de desenvolvimento da empresa Madal Palfinger S/A, que ainda contempla mais duas áreas: a Engenharia de Produto e a Engenharia de Integração Veicular. A empresa possui mais de noventa anos de atuação na área de equipamentos de movimentação de cargas e pessoas e agrega mais de quarenta plantas em três continentes.

1.2 JUSTIFICATIVA

Devido à alta demanda de mercado deste segmento e aos trabalhos a que os equipamentos são submetidos, a qualidade dos equipamentos é de caráter fundamental para a produtividade e durabilidade dos produtos, bem como para as visões financeiras da companhia.

Após a obtenção de dados dessa movimentação, pode-se fazer um comparativo entre os dados simulados e os dados obtidos em testes físicos, a fim de definir quesitos de melhoria no sistema e de garantir mais agilidade e qualidade de operação dos guindastes articulados, com os recursos virtuais, ainda não utilizados no ambiente de trabalho.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar virtualmente o sistema cinemático e hidráulico de extensões de lança de um guindaste articulado, para validar o modelo produzido e a utilização de análises virtuais no desenvolvimento de um projeto.

1.3.2 Objetivos específicos

a) Compreender a teoria cinemática e hidráulica básica.
b) Modelar o sistema de lanças de um guindaste articulado em *software* CAD.

c) Caracterizar o funcionamento do sistema hidráulico e o movimento cinemático da extensão de lança de um guindaste articulado por meio de análises virtuais.

d) Analisar os resultados obtidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, são apresentados os dados bibliográficos necessários para fundamentar o funcionamento básico de um sistema hidráulico e a análise dos movimentos cinemático e dinâmico do sistema de extensões de lança de um guindaste articulado.

2.1 TEORIA HIDRÁULICA BÁSICA

Desde o princípio, o homem utiliza recursos hídricos para facilitar seu trabalho e tornar possível uma série de tarefas. O segmento de trabalho que utiliza líquidos para efetuar movimentações ou transportes no ramo de engenharia denomina-se hidráulica.

Hidráulica é a parte da física que tem como objetivo estudar o comportamento dos líquidos incompressíveis em repouso ou em movimento. A palavra hidráulica é de origem grega, derivada das palavras *hydra* e *aulos*, que significam água e condução/tubos, respectivamente (FIALHO, 2013).

Os sistemas hidráulicos permitem a execução de grandes esforços em um pequeno espaço, além de garantir a versatilidade e um desempenho ímpar, principalmente tratando-se do ramo metal/mecânico.

. A fonte de energia que com que o sistema hidráulico funcione, ou seja, um impulsionador, como um motor elétrico que impulsiona a bomba hidráulica (VICKERS, 1983).

A finalidade de um sistema hidráulico, principalmente a óleo, é transformar sua energia de entrada em energia mecânica na sua saída, por meio de uma transferência de força através de uma pequena área. Tendo isso em vista, os guindastes articulados utilizam um sistema hidráulico a óleo baseado nesse conceito para se tornarem solução na movimentação de cargas e pessoas.

Os sistemas hidráulicos proporcionam diversas vantagens aos equipamentos neles acoplados. Como os motores elétricos trabalham em velocidades constantes, os sistemas hidráulicos surgem como alternativas para que a velocidade de atuação de um mecanismo seja variável. Além disso, uma válvula de alívio de pressão em um sistema hidráulico o protege do dano que a sobrecarga impõe sobre o sistema. O abastecimento da bomba é restringido aos reservatórios com limites definidos, de acordo com o torque ou força de saída do sistema. A válvula de alívio de pressão também auxilia o ajuste de uma máquina para uma demanda específica de pressão ou força exercida por alguns equipamentos. Além disso, os sistemas

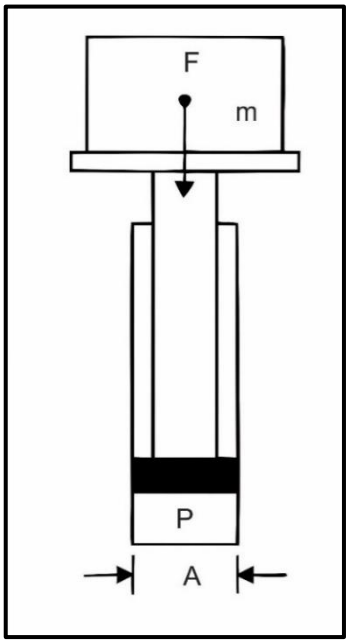
hidráulicos podem ser parados em meio a uma atividade, sem causar danos aos seus componentes e equipamentos (VICKERS, 1983).

O guindaste utilizado nesse estudo possui um sistema hidráulico relativamente simples e abrange componentes, como comandos, bomba, cilindros, válvulas, reservatório e utiliza a tomada de força do caminhão onde é instalado como impulsionador da bomba. Cada equipamento exerce o seu papel no sistema, de modo a permitir ou restringir os trabalhos e movimentações dos equipamentos.

2.2 TRANSMISÃO DE ENERGIA HIDRÁULICA

Na hidrostática, a pressão é definida como a força exercida pelo fluido por unidade de área do recipiente que o contém. Considerando essa informação, conhecendo a pressão na qual um fluido encontra-se confinado em um reservatório, é possível saber a força que ele exerce contra as suas paredes, ou seja, a força que é necessária para que um sistema se encontre em equilíbrio (FIALHO, 2013). Para a resolução do problema proposto, utiliza-se a Equação 1.

Figura 1 - Princípio da transmissão da energia hidráulica



Fonte: Adaptado de Fialho (2013).

$$P = \frac{F}{A} = \frac{m.g}{A} \tag{1}$$

onde: P: pressão na câmara [N/m^2];

F: força exercida pela massa m [N];

A: área do pistão [m^2];

m: massa que empurra o pistão [kg];

g : aceleração da gravidade [m/s^2].

Tendo como princípio que um sistema hidráulico tem como objetivo transformar a sua energia mecânica de entrada em força mecânica de saída e sabendo que, em um determinado momento, é resultado da soma da energia cinética com a energia potencial, pode-se deduzir a seguinte equação.(FIALHO, 2013):

$$Ec = \frac{1}{2}.m.v^2 \tag{2}$$

$$\mathrm{Ep} = \mathrm{m.g.h} \tag{3}$$

$$\mathrm{Em} = \frac{1}{2}.\mathrm{m.v^2} + \mathrm{m.g.h} \tag{4}$$

onde: Ec: energia cinética;

Ep: energia potencial;

EM: energia mecânica;

m: massa [kg];

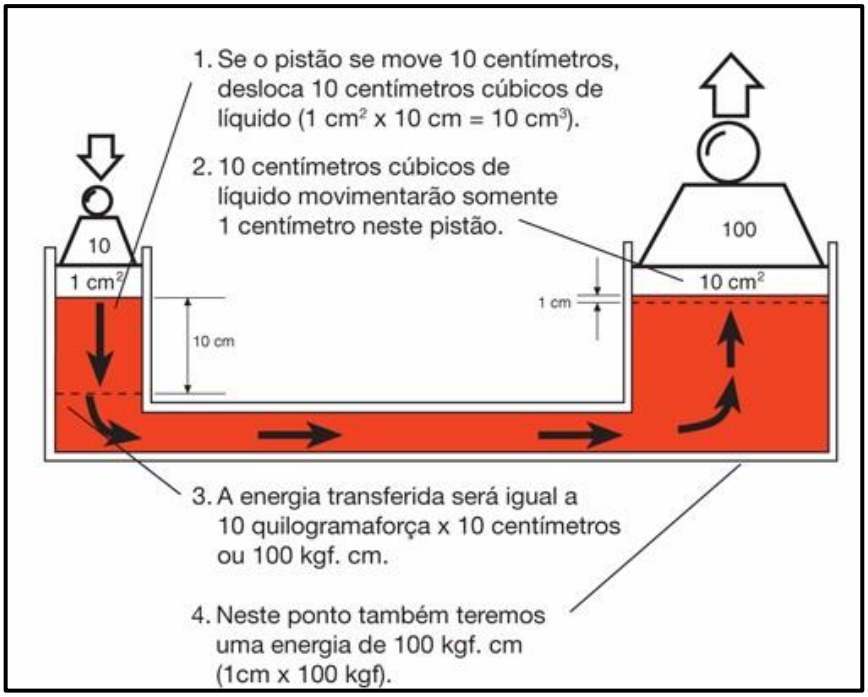
v: velocidade [m/s];

g: aceleração da gravidade [m/s^2];

h: altura [m].

Utilizando esse conceito em sistemas confinados, podem-se potencializar a energia do sistema para adquirir os resultados desejados. A energia de entrada pode ser potencializada e transformar-se numa energia hidráulica suficiente para mover cargas necessárias, ou garantir movimentações de elevação e extensão, como no caso dos guindastes articulados, conforme apresentado na Figura 2 (PARKER, 2002).

Figura 2 - Princípio da Conservação de Energia



Fonte: Parker (2002).

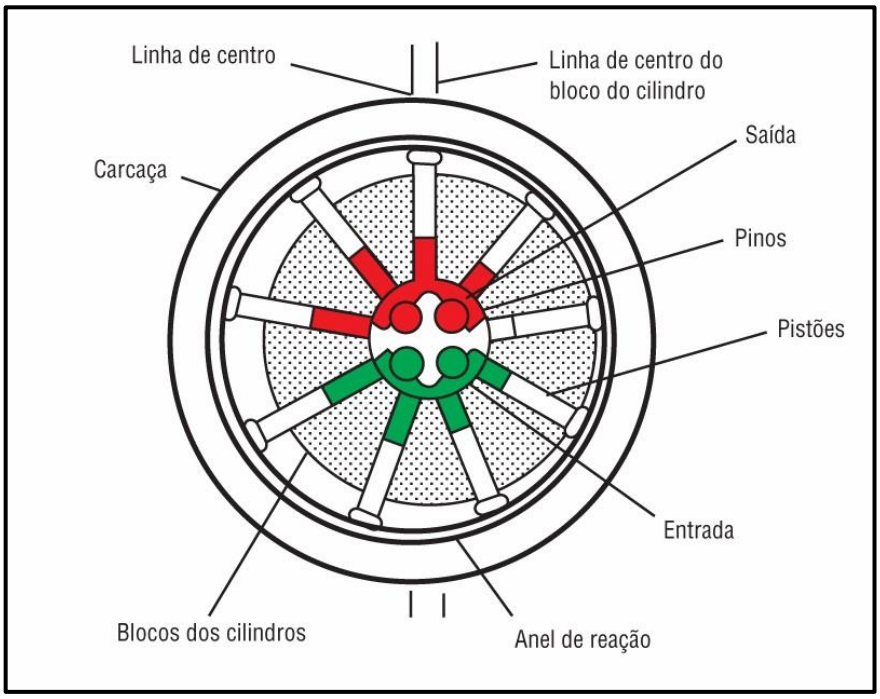
2.3 COMPONENTES HIDRÁULICOS DE UM GUINDASTE ARTICULADO

2.3.1 Bombas hidráulicas

Bombas hidráulicas são, provavelmente, os componentes mais importantes de um sistema hidráulico. Sua função é converter a energia mecânica em hidráulica ao impulsionar o fluido para dentro de um sistema. As bombas encaixam-se nas classes hidrodinâmicas ou hidrostáticas e podem ser de três diferentes tipos: de engrenagens, de palhetas e de pistões - além de possuir os mais distintos tamanhos, mecanismos e propósitos (VICKERS, 1983).

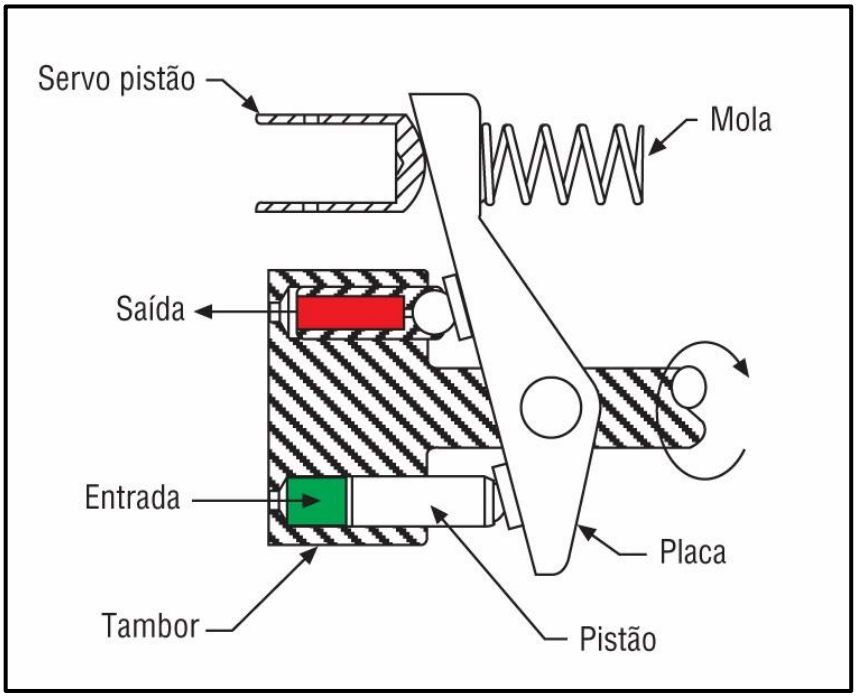
As bombas de pistões podem ser radiais ou axiais, mas ambas têm como base de funcionamento o movimento alternado dos pistões, ou seja, em um sentido os pistões se preenchem de fluido e, no sentido contrário, expulsam o líquido. As diferenças entre elas residem principalmente, na disposição e no número dos pistões na construção da bomba. As radiais são constituídas de cinco a nove pistões, que são distribuídos ao redor do eixo que os movimenta. Já a bomba de pistões axiais, eles trabalham paralelos ao eixo, onde a rotação do eixo arrasta os pistões consigo, fazendo com que, no movimento de ascendência, os pistões suguem fluido e o descarreguem no movimento de descida (FIALHO, 2013). Os exemplos desses dois tipos de bombas são mostrados nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 - Bomba de pistões radiais.



Fonte: Parker (2002).

Figura 4 - Bomba de pistões axiais.



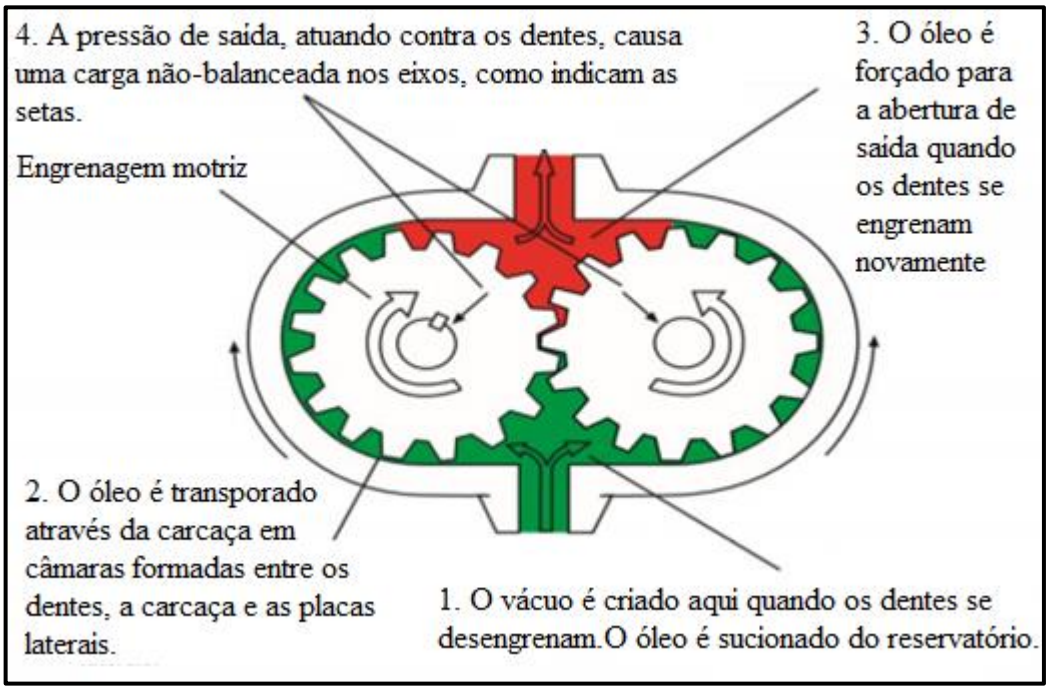
Fonte: Parker (2002).

Outro tipo de bomba hidráulica muito usual é a bomba de engrenagens que, basicamente, apresenta uma carcaça que aloja um mecanismo composto por duas delas e um eixo. A carcaça possui dois canais, um que permite a entrada de fluido na bomba e outro que permite sua saída. (VICKERS, 1983)

O princípio de funcionamento desse tipo de bomba é carregar o fluido hidráulico, por meio do espaço entre os dentes das engrenagens e a parede da carcaça da bomba, do orifício de entrada para o de saída. Uma das engrenagens é acoplada a um eixo, que é impulsionado, normalmente por um motor, a sua rotação faz com que a outra engrenagem do sistema gire em sentido oposto ao movimento da motriz, carregando fluido hidráulico por ambos os lados da bomba (VICKERS, 1983). O funcionamento básico da bomba de engrenagens pode ser visualizado na Figura 5.

Segundo Parker (2002), as bombas de engrenagens são utilizadas em sistemas que permitam a utilização de variados tipos de fluídos e necessitem de componentes compactos, que possam evitar a contaminação do sistema.

Figura 5 - Bomba de engrenagens.

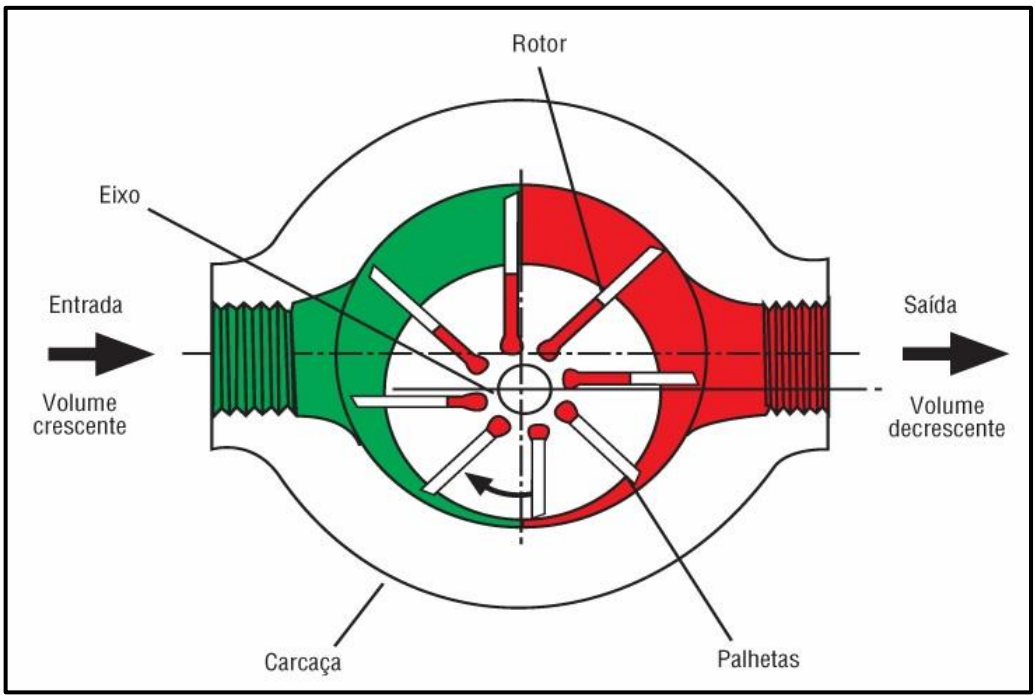


Fonte: Parker (2002).

As bombas de palhetas são constituídas por uma carcaça, que também contêm dois orifícios, um de entrada e outro de saída, por onde escoa o fluido hidráulico. Dentro dessa carcaça, encontram-se um rotor com ranhuras, que é movimentado por um eixo acoplado a um

impulsionador. As palhetas são acopladas ao rotor e acompanham a superfície interna da carcaça quando em movimento de rotação. Devido à força centrífuga e à pressão, as palhetas afastam-se da superfície do anel, gerando câmaras de bombeamento. Quando o espaço entre o rotor e o anel aumenta, um vácuo parcial é criado na entrada da bomba e faz com que o óleo fique confinado nas câmaras de bombeamento, que é empurrado para a saída da bomba quando o espaço entre o rotor e o anel é diminuído. O deslocamento da bomba depende da largura do anel e do rotor (VICKERS, 1983), conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 - Bomba de palhetas.



Fonte: Parker (2002).

2.3.2 Válvulas hidráulicas

Entre os componentes de um sistema hidráulico, as válvulas possuem papel fundamental para permitir um controle absoluto do sistema e podem exercer diversificados tipos de trabalho, como as válvulas controladoras de vazão, de bloqueio e direcionais.

Segundo Fialho (2013, p.37), “as válvulas controladoras de vazão são usadas para regular a velocidade dos atuadores (lineares e rotativos)”. Portanto, pode-se concluir que a função dessas válvulas é controlar o volume e a velocidade de fluído que sai da bomba e chega até os atuadores hidráulicos. Esse grupo de válvulas, ainda, pode ser subdivido em dois segmentos, as válvulas reguladoras de vazão e as válvulas redutoras de vazão. Essas

segmentações abrangem diversos tipos de válvulas com diferentes características, porém, ambos os grupos de válvulas possuem a mesma finalidade.

Válvulas de bloqueio são elementos que restringem o fluxo de fluido por um sentido e o permitem em outro. Esse grupo de válvulas abrange tipos diferentes de válvulas hidráulicas como as válvulas de retenção simples, as válvulas de retenção com bloqueio hidráulico, as válvulas de retenção pilotada geminada e as válvulas de sucção e preenchimento (FIALHO, 2013).

As válvulas de controle direcional, como seu próprio nome diz, são utilizadas para controlar a direção do fluido hidráulico dentro de um sistema. Apesar de exercerem a mesma função, as válvulas direcionais podem variar consideravelmente, seja em seu modo de operação ou no seu modo de construção (VICKERS, 1983).

Esse grupo de válvulas pode ser subdividido em quatro grupos: as válvulas direcionais do tipo pistão ou esfera (*poppet type*), as vávulas 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, 2013).

2.3.3 Cilindros hidráulicos

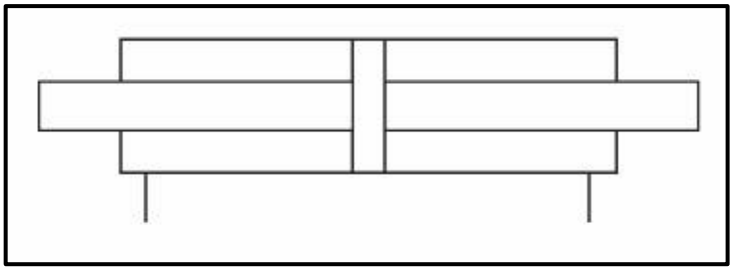
Os cilindros hidráulicos são atuadores lineares, o que significa que sua força ou seu movimento de saída são em linha reta, tendo como objetivo transformar a energia hidráulica de entrada em energia mecânica de saída (VICKERS, 1983).

O mercado atual proporciona uma vasta diversidade de cilindros, como os cilindros do tipo pistão, os cilindros telescópicos, os cilindros de dupla ação e os cilindros de haste dupla. Devido à utilização mais comum no ramo de equipamentos de içamento de cargas e pessoas, serão abordados nesse trabalho apenas os cilindros de dupla ação e os cilindros de haste dupla.

2.3.3.1 Cilindros de haste dupla

Cilindros de haste dupla são utilizados em casos onde é necessário acoplar uma carga a cada extremidade do cilindro, ou quando o mesmo deslocamento é necessário para ambos os cursos. Contendo áreas iguais em ambos os lados do pistão, é possível garantir forças e velocidades iguais em ambos os sentidos do curso do cilindro (VICKERS, 1983). Este tipo de cilindro pode ser representado conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Cilindro de haste dupla

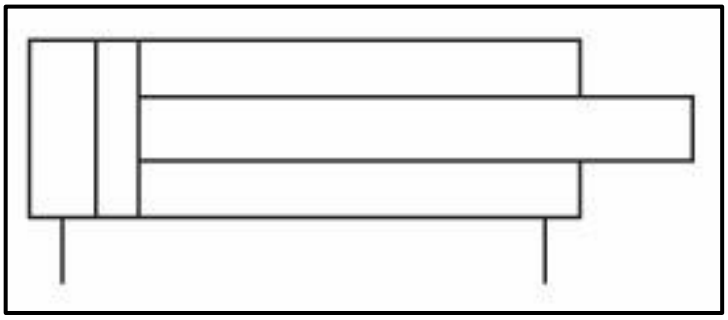


Fonte: Parker (2002).

2.3.3.2 Cilindros de dupla ação

O cilindro de dupla ação é capaz de proporcionar um curso com potência em qualquer sentido de atuação, devido ao fluido hidráulico que atua em ambos os sentidos, movendo o pistão para os dois lados. Esse tipo de cilindro é utilizado afim garantir forças e velocidades iguais em ambos os sentidos do curso do cilindro. Esse tipo de cilindro também pode atuar em apenas uma direção, sendo representado em um diagrama conforme a Figura 8.

Figura 8 - Cilindro de dupla ação



Fonte: Parker (2002).

2.3.4 Fluidos hidráulicos

Um equipamento hidráulico, normalmente, possui um custo elevado e, devido a isso, justifica-se obter dele o maior rendimento possível. Para isso, a escolha do fluido hidráulico é um fator determinante no rendimento do equipamento (PALMIERI, 1997).

Segundo Vickers (1983), o fluido hidráulico possui quatro finalidades principais: transmitir a potência, lubrificar as peças móveis, selar as tolerâncias entre os componentes do sistema e refrigerar o sistema.

Tratando-se de transmissão de potência, pode-se obter uma compressibilidade variável entre 0,5 e 2% a cada 70 bar de pressão para fluidos hidráulicos líquidos, dependendo do tipo e da temperatura de trabalho do fluido. Dessa forma, pode-se concluir que o fluido poderá transmitir a energia fornecida a ele de modo satisfatório, tendo em vista que ele é praticamente incompressível (PALMIERI, 1997).

No mercado atual, pode-se encontrar uma vasta gama de opções de fluidos hidráulicos, cada qual com suas características. Dentre as características mais importantes de um fluido hidráulico, está a viscosidade. Segundo Palmieri (1997), a viscosidade de um fluido é a resistência que ele apresenta ao escoamento ou a sua capacidade de evitar um contato, ou seja, uma alta viscosidade, significa uma alta resistência ao escoamento.

As viscosidades dos fluidos são comumente representadas por unidades de medida como o *Second Saybolt Universal* (SSU), o *Centistoke* (cSt) e os graus Engler (ºE). Essas unidades de medida podem ser convertidas entre elas, conforme o Anexo 1.

Os fluidos hidráulicos dentro de uma tubulação podem conter diferentes comportamentos, que são chamados de regimes de escoamento, sendo subdivididos em escoamento laminar e escoamento turbulento. A definição desses escoamentos pode ser fornecida através do número de Reynolds, que pode ser calculado a partir da Equação 7:

$$\mathrm{Re} = \frac{\mathrm{v} * \mathrm{di}}{\mathrm{v}} \tag{7}$$

onde: $\mathrm{Re} = \text{número de Reynolds};$

$\mathrm{v} = \text{velocidade recomendada para a tubulação [cm/s]};$

$\mathrm{di} = \text{diâmetro interno da tubulação [cm]};$

$v = \text{viscosidade do fluido [St]}.$

Segundo Palmieri (1997), se o número de Reynolds de uma tubulação estiver entre 0 e 2000, o regime é laminar, se estiver na faixa entre 2000 e 3000, não se pode afirmar em que tipo de regime encontra-se o fluido e, se o número de Reynolds for maior ou igual a 3000, o regime pode ser considerado turbulento. O ideal para um circuito hidráulico é que o regime de escoamento seja laminar, pois as perdas de pressão nesse tipo de escoamento são menores.

2.3.5 Reservatórios e comandos hidráulicos

O fluido utilizado em um sistema hidráulico deve ser armazenado de forma que não se apresente em excesso ou insuficiência. Além da quantidade de armazenamento, o fluido hidráulico deve ser mantido nas temperaturas recomendadas para o seu trabalho e o mais livre possível de impurezas em sua composição. Os reservatórios hidráulicos são os responsáveis por garantir essas exigências, sendo que, para isso, eles normalmente dispõem de componentes que realizam a filtragem do fluido e são projetados de formas planejadas, a fim de garantir uma estabilidade térmica e um dimensionamento correto, evitando excessos ou insuficiências de fluido (PARKER, 1999).

Quando um equipamento necessita de acionamento manual de diversos atuadores hidráulicos, também se faz necessário o uso dos comandos hidráulicos. Eles funcionam como um conjunto de válvulas que trabalham independentemente em um único bloco, contendo um canal de entrada vindo da bomba e um canal de retorno para o reservatório. As válvulas podem ser acionadas por cabos e alavancas, permitindo, assim, determinar manualmente o movimento que exercerá o equipamento (PARKER, 1999).

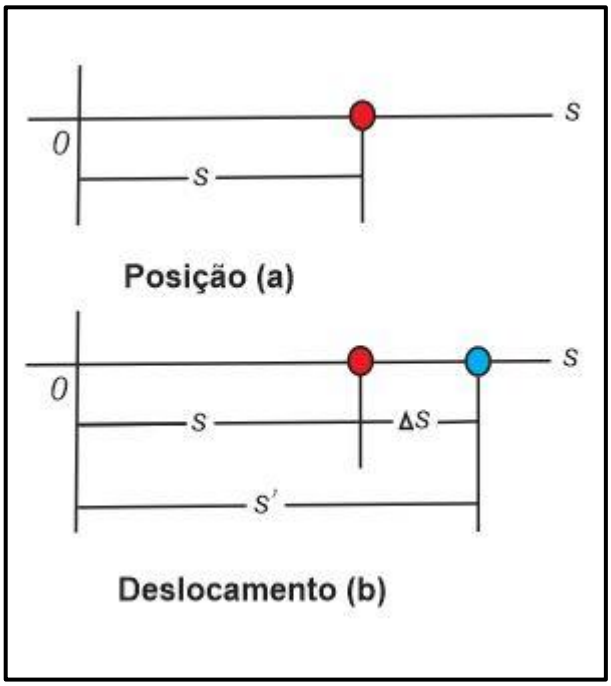
2.4 PRINCÍPIOS DE DINÂMICA E CINEMÁTICA

A mecânica que se aplica à engenharia pode ser dividida em duas áreas de estudo, a estática e a dinâmica dos corpos. A estática trata de um corpo que se encontra em equilíbrio, ou se move a velocidade constante, e a dinâmica que diz respeito ao movimento acelerado de um corpo (HIBBELER, 2010).

O campo de estudo da dinâmica abrange as propriedades do material movimentado, bem como seu movimento impulsionado pelas forças a ele associadas. Um objeto, enquanto se desloca, pode exercer diversos movimentos simultâneos ao percorrer um determinado caminho, seja ele de rotação ou vibração, como é o caso de uma gota d’água ao cair. Porém, matematicamente, uma partícula é tratada como um ponto, um objeto sem dimensões, de modo que os movimentos de rotação e vibração não estão envolvidos em seu movimento (HALLIDAY, 2009).

Dentre as principais variáveis necessárias para realizar as análises de movimento, encontra-se o deslocamento. O deslocamento de uma partícula é dado como a variação em sua posição (HIBBELER, 2010). A variação da posição de uma partícula pode ser visualizada na Figura 9 e deduzida matematicamente a partir da Fórmula 8.

Figura 9 - Modelo de deslocamento



Fonte: Hibbeler (2010).

$$\Delta s = s' - s \tag{8}$$

onde: Δs: variação da posição [m];

s': posição final [m];

s: posição inicial [m].

Dentre as grandezas indispensáveis para o tipo de análise proposto no presente trabalho, ainda há a velocidade e a aceleração. Para Halliday (2009), a velocidade é a razão entre o deslocamento e o intervalo de tempo para que esse deslocamento ocorra. Essa grandeza pode ser representada de diferentes formas, de acordo com o seu propósito, ou seja, se a velocidade tiver caráter linear, pode ser representada por V; se for de caráter angular, pode ser representado pela letra ω. A obtenção das velocidades desejadas pode ser derivada das Equações 9 e 10.

$$V = \frac{ds}{dt} \tag{9}$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \tag{10}$$

Nas Equações 9 e 10, V representa a velocidade linear [m/s], ω é a velocidade angular [rad/s], *s* representa o deslocamento [m], θ o deslocamento angular [rad] proposto e *t* representa o intervalo de tempo [s].

Do mesmo modo que a velocidade, a aceleração também pode ser definida de acordo com o seu propósito, podendo ser linear ou angular. Para Norton (2010) a aceleração é o resultado da razão entre a taxa de variação da velocidade em função do tempo, podendo ser definida pelas Equações 11 e 12, nos casos linear e angular, respectivamamente.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \tag{11}$$

$$A = \frac{dV}{dt} \tag{12}$$

A variável α na equação 11 representa a aceleração angular [rad/s²], a variável A na equação 12 representa a aceleração linear [m/s²], ω é a variação da velocidade angular [rad/s], V é a variação da velocidade [mm/s²] e t é a variação de tempo [s].

2.5 SISTEMA DE MULTICORPOS

A metodologia de Sistemas de Multicorpos *(MBS - Multibody Systems)* é baseado na construção de sistemas mecânicos compostos por corpos rígidos ou flexíveis, interconectados por juntas e, sujeitos a movimentos e influenciados por esforços e movimentos preestabelecidos (COSTA, 1992).

A utilização de softwares para simulação de movimentos baseia-se no método de multicorpos, possibilitando a análise de diversos parâmetros relacionados a movimentação de mecanismos e sistemas. Para a análise virtual proposta para esse trabalho, foi utilizada a teoria de multicorpos no software *Adams View*.

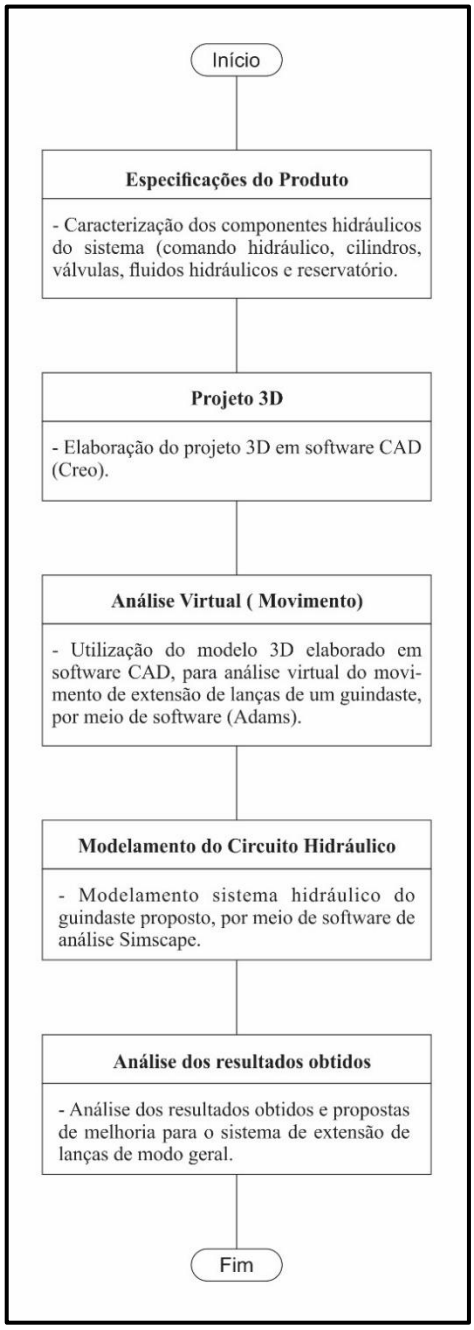
Em um mecanismo com múltiplos corpos, cada um deles ser submetido a movimentos de rotação, translação e deslocamento separadamente. Dessa forma, pode-se analisar cada componente do mecanismo de forma individual, e também de forma conjunta.

A técnica de multicorpos permite aos elaboradores, uma forma de testar e criar sistemas mecânicos complexos, prevenindo-se de falhas e erros. A técnica também auxilia na resolução de problemas já existentes em máquinas e equipamentos e garante uma economia significativa de tempo, o que não ocorre ao optar pela construção e teste de um protótipo físico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia utilizada para realizar a análise do movimento de extensão de lanças de um guindaste articulado e o levantamento das especificações técnicas utilizadas no seu sistema hidráulico. A figura 10 mostra o fluxograma das atividades realizadas.

Figura 10 - Fluxograma de atividades



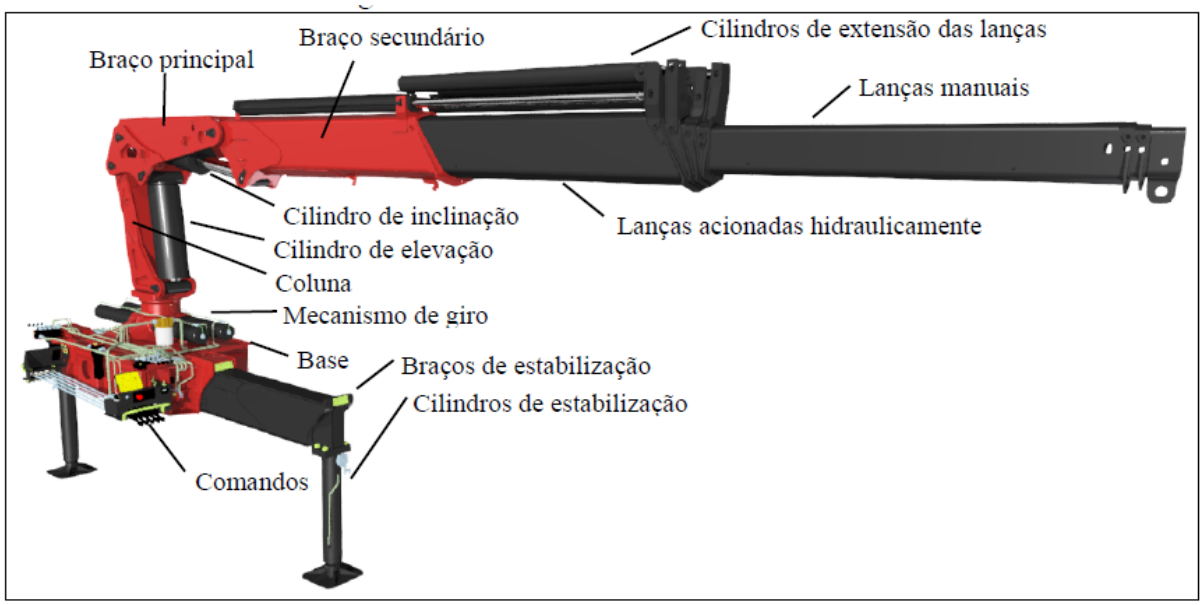
Fonte: o autor (2020).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA HIDRÁULICO

O guindaste utilizado para a realização deste estudo é um modelo versátil, para funções como içamento do componentes e materiais pesados, ou para içamento de pessoas, via cesto acoplado, para realização de trabalhos específicos. Para tanto, o guindaste possui três lanças hidráulicas acopladas ao braço posterior do guindaste, que permitem que o equipamento alcance maiores distâncias de trabalho.

A figura 11 abaixo, apresenta os principais componentes do equipamento estudado.

Figura 11 - Componentes de um guindaste articulado



Fonte: Santini (2016).

O conjunto hidráulico do o sistema de extensão de lanças do guindaste é composto pelos elementos listados abaixo:

a) 1 comando hidráulico com válvulas de centro aberto com atuadores mecânicos e seis fatias, que possui uma pressão máxima de trabalho de 350 a 420 *bar* e uma vazão máxima de aproximadamente 180 *L/min*. Esse componente permite que o equipamento opere cada uma das funções individualmente.

b) 1 bomba hidráulica com vazão máxima de aproximadamente 120 L*/min* e uma rotação máxima de 2400 rpm e uma pressão máxima de trabalho de 400 *bar*.

c) 1 válvula de retenção de carga dupla com um fluxo de vazão de 70 *L/min*, que pode oferecer uma resistência entre 210 e 430 *bar* para o sistema onde opera, que permite

que as lanças do guindaste sejam estendidas e se mantenham nessa posição pelo tempo desejado pelo operador.

d) 3 cilindros hidráulicos, responsáveis pela movimentação de cada uma das lanças. Os cilindros iguais das primeiras lanças, possuem uma pressão de trabalho de 400 *bar*, com comprimentos fechado de 2187 *mm* e aberto de 4187 *mm*, diâmetros externo da camisa Ø82 *mm* e interno de Ø52 *mm*. O terceiro cilindro, responsável pelo acionamento da terceira lança possui um comprimento fechado 2312 *mm* e um comprimento aberto de 4460 *mm*, e possui os mesmos 400 *bar* de pressão de trabalho dos cilindros anteriores e o diâmetro externo da camisa é de Ø69*mm* e o diâmetro interno da camisa é de Ø40*mm*.

e) fluído hidráulico com viscosidade de aproximadamente 67,8 *cSt*, se utilizado a uma temperatura de aproximadamente 40 ºC.

O processo hidráulico de extensão de lanças desse equipamento, parte do bombeamento de óleo hidráulico para o comando hidráulico, que quando acionado, direciona o óleo até a válvula de retenção de carga, configurada para limitar uma pressão de 30 Mpa do sistema, e posteriormente chega aos cilindros hidráulicos responsáveis por estender as lanças hidráulicas.

3.2 ELABORAÇÃO DO PROJETO 3D EM SOFTWARE VIRTUAL

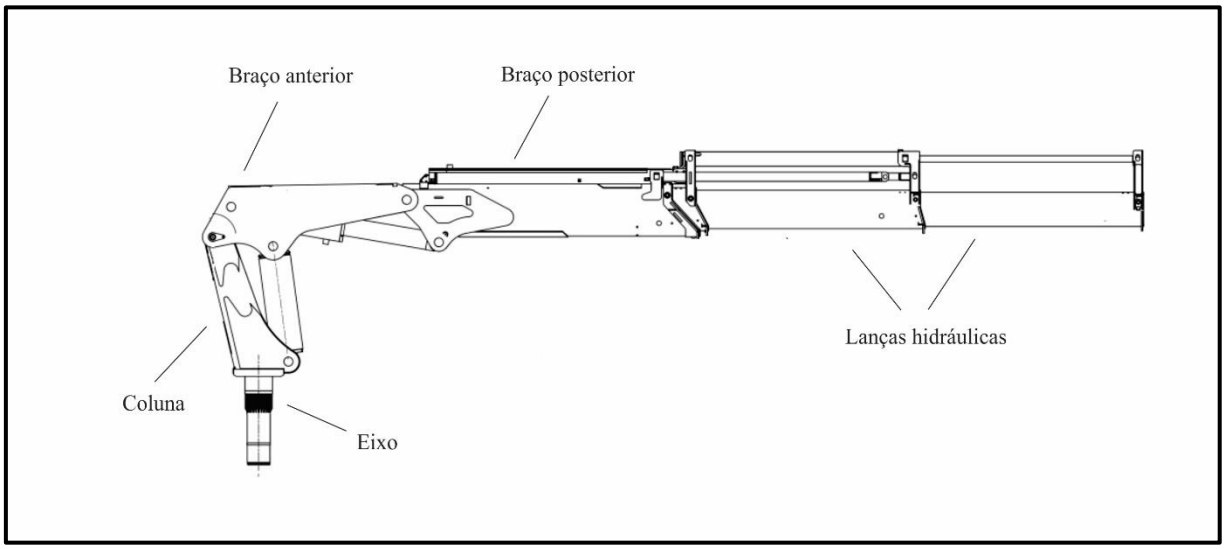
O modelamento elaborado em CAD, é composto pela coluna, braços anterior, braço posterior e o conjunto de três lanças hidráulicas. O modelo foi elaborado por meio do ambiente de modelamento de chapas metálicas presentes no *software ProE (Creo).*

O modelo 3D possuirá as três lanças hidráulicas nas dimensões apresentadas pela máquina, que são montadas junto ao braço posterior do guindaste, que também estará presente no modelo elaborado.

O braço anterior do guindaste por sua vez, suporta o braço posterior e todo o seu conjunto de lanças hidráulicas também foi modelado, a fim de obter um ponto de fixação do projeto para a realização da análise virtual do movimento das lanças.

Para melhor entendimento, os componentes presentes no projeto 3D podem ser visualizados na figura 12.

Figura 12 - Modelo 3D



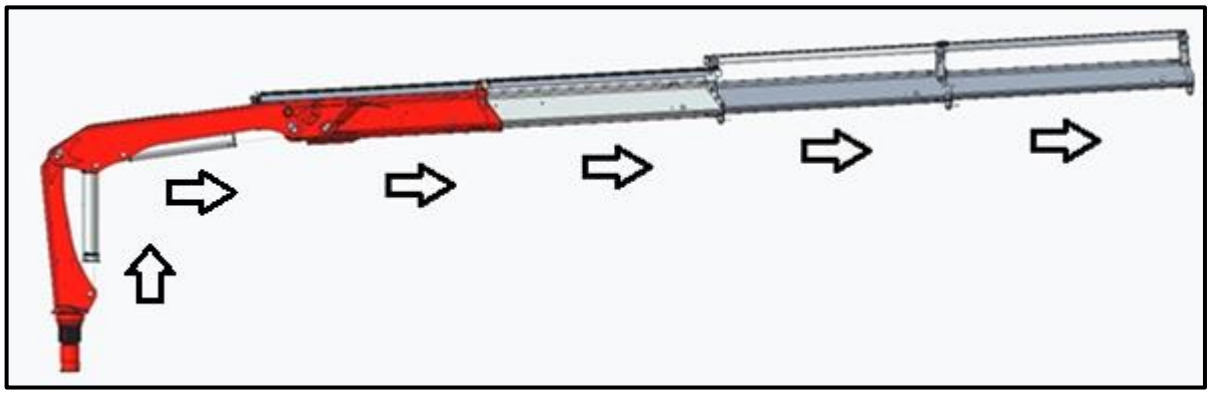
Fonte: o autor (2020).

3.2.1 Projeto 3D em software CAD

O modelo produzido possui características fieis ao guindaste proposto como objeto de estudo deste trabalho. Dentre as características que se mantiveram fiéis ao projeto original, pode-se citar principalmente o comprimento das lanças, visando o seu movimento de extensão, e as espessuras das chapas do conjunto e os devidos alívios de espaço, visando o movimento de translação entre a primeira lança hidráulica e o braço posterior, e o mesmo movimento de translação aplicado a extensão e ao recolhimento das lanças posteriores, evitando dessa forma, colisões e interferências.

A elaboração da coluna e do eixo do guindastes também foram produzidas, pensando no ponto de sustentação dos braços e do conjunto de lanças para a realização das movimentações propostas. O cilindros hidráulicos acoplados a coluna e ao braço anterior do guindaste fornecem os movimentos de inclinação do braço posterior e do conjunto de lanças, permitindo que a análise do movimento de extensão das lanças do guindaste seja realizada em diversas angulações, gerando maiores dados para análise dos resultados. A figura 13 abaixo, mostra os componentes estáticos e o movimentos gerados pelos cilindros hidráulicos da coluna, dos braços e do conjunto de lanças.

Figura 13 - Conjunto de lanças e movimentações



Fonte: o autor (2020).

3.3 ANÁLISE VIRTUAL DO MOVIMENTO DE EXTENSÃO DE LANÇAS

O sistema de lanças de um guindaste articulado pode ser composto por diversos componentes, porém para análise de seu movimento, pode-se considerar apenas a quantidade de lanças utilizadas e seus pontos de conexão. Para o mecanismo de três lanças hidráulicas de um guindaste, a análise da movimentação foi realizada através da técnica de multicorpos, que consiste no estudo do comportamento do movimento de corpos rígidos interligados.

O projeto em 3D elaborado no software ProE (Creo), serviu como modelo para executar o modelamento de forma esquemática e geométrica do conjunto de lanças do *software Adams View*, possibilitando a simulação do movimento de extensão conjunto de lanças do guindaste de modo fiel, para que os resultados obtidos possam condizer com a realidade, e posteriormente evolucionar o produto.

3.3.1 Simulação do movimento de extensão de lanças

Para a simulação do movimento de extensão de lanças de um guindaste articulado, foi desenvolvido por meio do *software Adams View* ®, um mecanismo de barras composto por seis corpos, que representam a coluna, o braço anterior, o braço posterior e três lanças hidráulicas de um guindaste. Cada componente do sistema foi criado a partir da ferramenta de modelamento disponibilizada pelo software, utilizando as dimensões reais retiradas do projeto realizado em CAD.

O desenvolvimento do mecanismo iniciou-se com a construção da coluna, onde foi utilizado um corpo em formato de "caixa", partindo da origem, com uma altura de 1556 mm e 393 mm de largura e comprimento. A origem nesse caso específico, representa a base do guindaste, e a extremidade da coluna que tem contato com a origem, possui uma conexão de junta fixa, afim de bloquear os movimentos da mesma.

Foi elaborado o braço anterior do guindaste, que tem seu início demarcado no topo da coluna e se estende por uma distância de 2257mm em formato cilíndrico com um diâmetro de 488mm, afim de simular as dimensões reais do braço anterior do guindaste, bem como o seu posicionamento inicial. A junta que une a coluna e o braço anterior, recebeu uma conexão de junta de revolução, permitindo a rotação do braço.

O terceiro passo para a produção do modelo, foi a construção do braço posterior em formato de cilindro com diâmetro de 360mm e comprimento de 2310mm. O braço posterior do guindaste é acoplado a extremidade do braço anterior, e também recebe uma junta de revolução entre os dois braços, permitindo o movimento de inclinação do braço.

Para representar as lanças hidráulicas, foram criados três corpos cilíndricos com os diâmetros de 340 mm, 302 mm e 265 mm respectivamente. O tamanho dos cilindros não atende o tamanho real e todos partem da junta de revolução existente entre o braço anterior e o braço anterior, porém, o tamanho dos cilindros não interfere neste caso, pois as restrições de movimentação utilizando os cursos em tamanho real, limitarão o movimento das lanças. Entre a primeira lança hidráulica e a extremidade do braço posterior do guindaste, foi criada uma junta de translação, permitindo a movimentação da lança de dentro para fora do braço posterior.

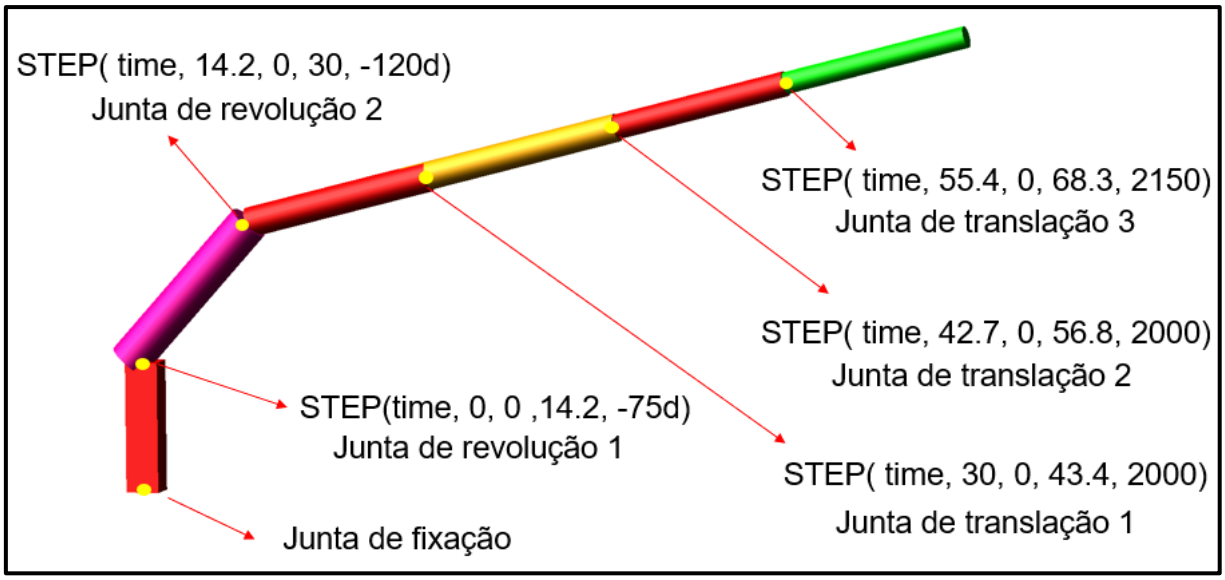
A construção da segunda e terceira lanças hidráulicas, também foram criadas a partir de cilindros com respectivamente 302mm e 265mm de diâmetro e ficando 100mm maior do que a lança anterior, simulando a posição das lanças com o guindaste fechado. Ambas as lanças também receberam juntas de translação, afim de permitir o movimento de transpasse entre elas.

A determinação dos movimentos executados por cada corpo rígido do sistema é definido pela ferramenta de movimentação utilizando a função "step" proporcionada pelo *Adams View*. Essa ferramenta proporciona a movimentação do sistema em passos, podendo configurar o movimento desejado para cada conexão. A função "step" permite determinar o tempo inicial e final de cada movimento e o deslocamento inicial e final de cada movimento de acordo com uma variável, que nesse caso é o tempo. Para o caso do modelo proposto para esse trabalho, primeiramente foi determinado o movimento de rotação nas juntas de revolução entre a coluna e o braço anterior e entre o braço anterior e o braço posterior do guindaste.

Para as juntas de translação (sistema de lanças), foram adicionadas movimentações de translação, também utilizando a função "step". Os dados de deslocamento utilizados, são os cursos dos cilíndros utilizados e especificados nesse capítulo. Os tempos utilizados nas funções "step" foram calculados de acordo as dimensões de área e curso do cilíndro e posteriormente cronometrados integralmente com o guindaste em atuação.

A configuração de todas as juntas conectadas, podem ser verificadas na figura 16 abaixo:

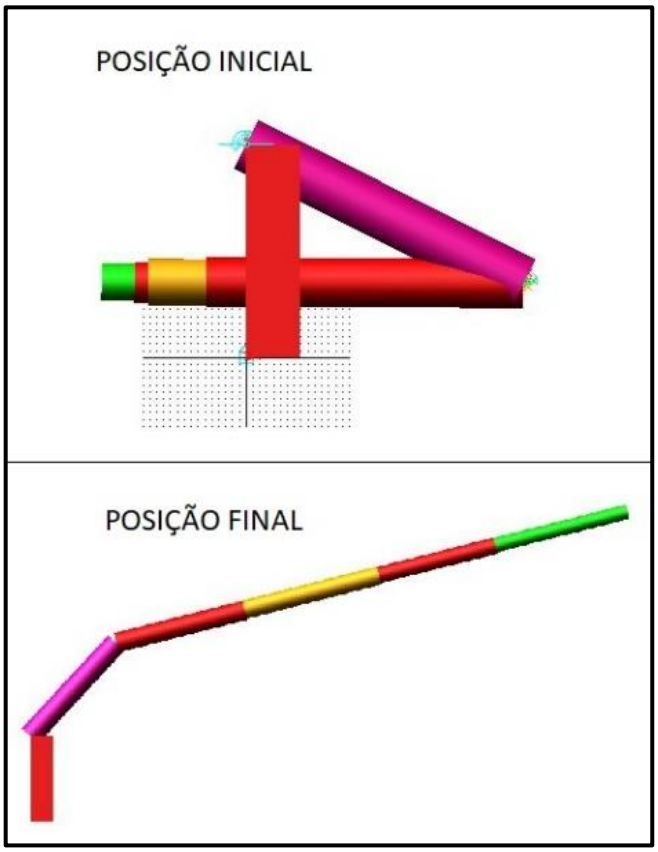
Figura 14 - Juntas de conexão do sistema



Fonte: o autor (2020).

A Figura 18 ilustra o posicionamento inicial do sistema considerando o guindaste fechado e o posicionamento final, considerando a elevação e inclinação dos braços e a extensão das três lanças hidráulicas.

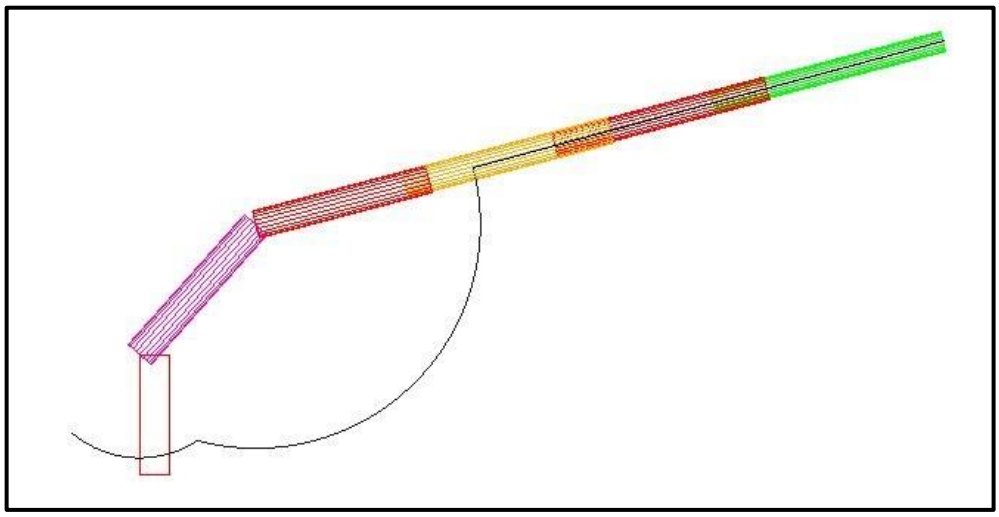
Figura 15 - Posicionamento inicial e final do sistema



Fonte: O autor (2020).

A trajetória dessa movimentação também pode ser analisada na figura 19, disposta abaixo. A linha de trajetória mostrada refere-se a extremidade da última lança hidráulica, que se mantém em movimento durante todo o processo.

Figura 16 - Trajetória da última lança hidráulica



Fonte: O autor (2020).

Os tempos que foram configurados nas funções "step" foram medidos experimentalmente e podem ser visualizados na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Tempos e cursos de abertura dos cilindros do sistema

Denominação	Tempo de abertura do cilindro (s)	Curso do cilindro (mm)
Braço anterior	14,2	703
Braço posterior	15,8	857
Lança hidráulica 1	13,4	2000
Lança hidráulica 2	13,4	2000
Lança hidráulica 3	11,5	2140
Tempo Total de abertura dos cilindros	68,3	-

Fonte: o autor (2020).

3.4 ELABORAÇÃO DO CIRCUITO HIDRÁULICO EM SOFTWARE VIRUAL

Essa etapa do trabalho consiste em replicar o diagrama hidráulico do sistema de extensão de lança dos guindastes, em um software virtual com o intuito de analisar o desempenho desse sistema.

O software utilizado para essa tarefa é disponibilizado como uma ferramenta dentro do programa *Matlab®*, denominado *Simscape®*. Essa ferramenta permite criar, adaptar e analisar os mais variados circuitos hidráulicos ou elétricos, fornecendo uma grande diversidade de componentes que podem ser inseridos dentro de um único sistema.

Após replicado o diagrama hidráulico do sistema proposto como modelo, o módulo traz resultados de desempenho de todo o sistema em formas gráficas, tornado possível visualizar os pontos falhos ou pontos onde o sistema hidráulico pode funcionar de modo mais produtivo. Desse modo, utilizou-se os dados obtidos do Simscape e realizar um comparativo com os testes práticos de extensão de lança já efetuados no equipamento, a fim de fazê-lo operar com o melhor desempenho possível.

Para a configuração de sistemas, o *Simscape*, separa o sistema em alguns blocos com funções distintas. Esses blocos são responsáveis pela configuração dos parâmetros dos componentes, pelo funcionamento dos elementos mecânicos e pelo registro dos dados obtidos.

Dentre esses blocos, pode-se encontrar o bloco para configuração das tubulações, denominado *hydraulic pipeline*, o bloco de sinais físicos, o bloco de solução, e os blocos de parâmetros.

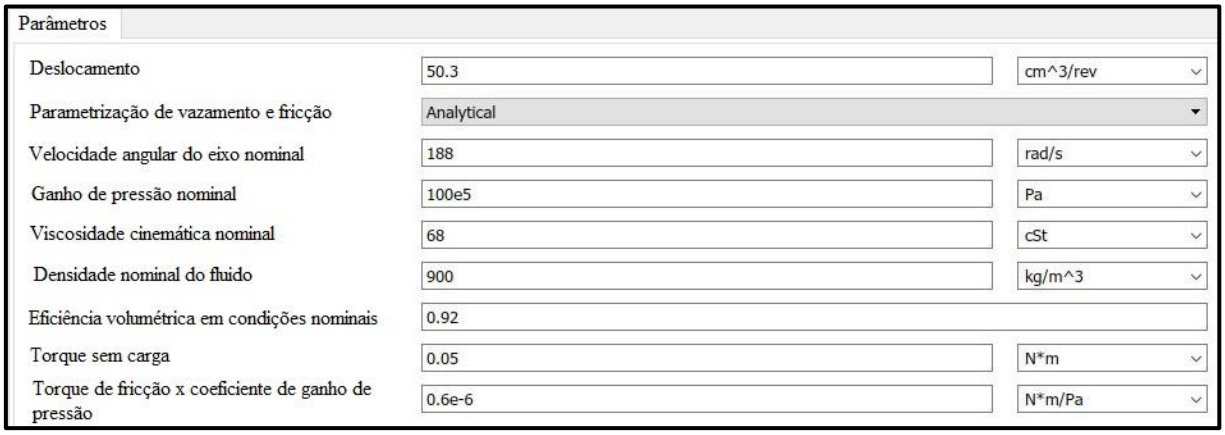
3.4.1 Blocos de parâmetros

A fim de garantir a fidelidade entre o modelamento do sistema hidráulico e o equipamento proposto como material de estudo, todos os componentes do conjunto te extensão de lanças do equipamento devem fazer parte do modelamento virtual. As características de fluido hidráulico e dos componentes do sistema também devem ser configurados de acordo com as suas especificações técnicas. Para a determinação desses dados, a ferramenta utiliza os blocos de parâmetros, que viabiliza a inserção dos dados específicos de cada componente.

Os parâmetros determinados para o fluído hidráulico, foram os mesmos citados na caracterização do produto, ou seja, viscosidade de aproximadamente 67,8 *cSt* e considerando uma temperatura normal de 40 °C.

A Figura 17, mostra os parâmetros utilizados para a configuração do primeiro cilindro hidráulico do sistema. Essas configurações variam para cada componente do sistema, de acordo com o tipo do componente e suas especificações.

Figura 17 - Parâmetros Bomba Hidráulica



Fonte: O autor (2020).

3.4.2 Blocos de sinais físicos

Para possibilitar a atuação mecânica dos componentes do sistema, foi necessária a criação de blocos de sinais físicos. Esses blocos de sinais são configurados de acordo com os dados caracterizados do produto a fim de determinar os momentos e as constantes de atuação dos componentes mecânicos.

Esses blocos possuem diversos campos que são preenchidos, afim de enviar um sinal aos elementos que transformam a energia mecânica em energia hidráulica. A finalidade desses blocos, é tornar possível a movimentação inicial do sistema hidráulico.

Para manter a rotação da bomba constante, foi utilizado um bloco de sinal, que envia até a bomba o sinal que faz com que a bomba opere a 1000 rpm durante seu período de trabalho.

3.4.3 Blocos de solução

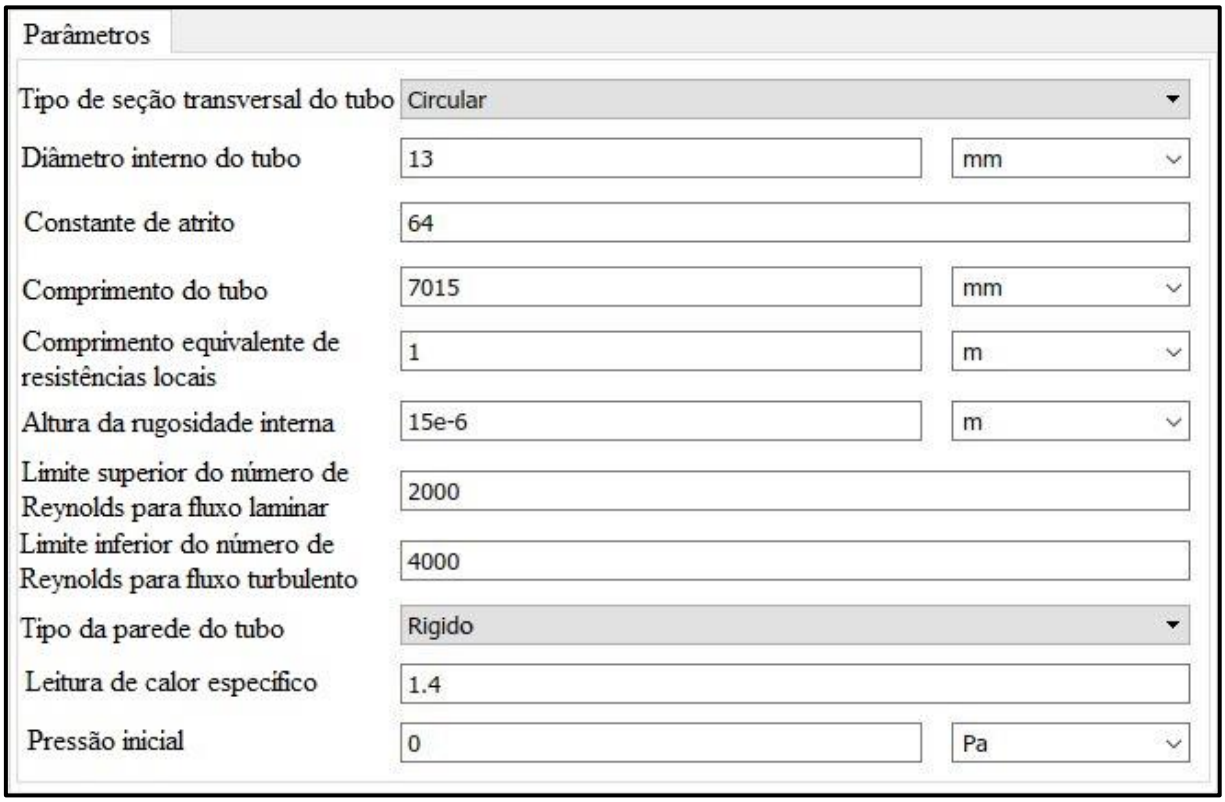
O bloco de solução da ferramenta *Simscape*, tem como finalidade registrar os resultados obtidos através de diversas análises de desempenho para um determinado período de tempo. Para a análise do movimento de extensão de lanças de um guindaste articulado, esse bloco é configurado de acordo com os dados de elevação, inclinação e extensão do sistema de lanças do guindaste, dispostos na tabela 1, neste mesmo capítulo.

3.4.4 Tubulações do sistema

O sistema avaliado nesse trabalho possui diferentes tipos de tubulações para a condução do fluído hidráulico, sendo mangueiras ou tubos rígidos, de diferentes diâmetros e comprimentos.

O bloco chamado de *hydraulic pipeline* é o bloco responsável por determinar o diâmetro, o comprimento e o perfil de todas tubulações sistema. Com isso, é possível analisar as perdas de carga existentes no sistema. A Figura 22 abaixo, mostra a configuração utilizada para a tubulação da primeira lança hidráulica.

Figura 18 - Parâmetros de tubulações



Fonte: o autor (2020).

As tabela 2 e 3 mostradas abaixo, apresentam os dados de todas as tubulações presentes no sistema de lanças do guindaste articulado modelado no *Simscape*, desconsiderando as curvas das tubulações rígidas. A tabela 3 ainda apresenta os dados das tubulações que ligam a bomba ao comando hidráulico e o comando à válvula que direciona o fluido para as lanças hidráulicas.

Tabela 2 - Tubulações do sistema de extensão de lanças

Denominação	Diâmetro interno	Diâmetro externo	Comprimento
Lança hidráulica 1	13 mm	16 mm	7015 mm
Lança hidráulica 2	13 mm	16 mm	2733 mm
Lança hidráulica 3	13 mm	16 mm	3093 mm

Fonte: o autor (2020).

Tabela 3 - Tubulações de alimentação do sistema

Denominação	Diâmetro interno	Diâmetro externo	Comprimento
Bomba para comando	13 mm	16 mm	600 mm
Retorno do comando para tanque	21 mm	25 mm	1300 mm
Comando para válvula de retenção	9 mm	12 mm	7400 mm

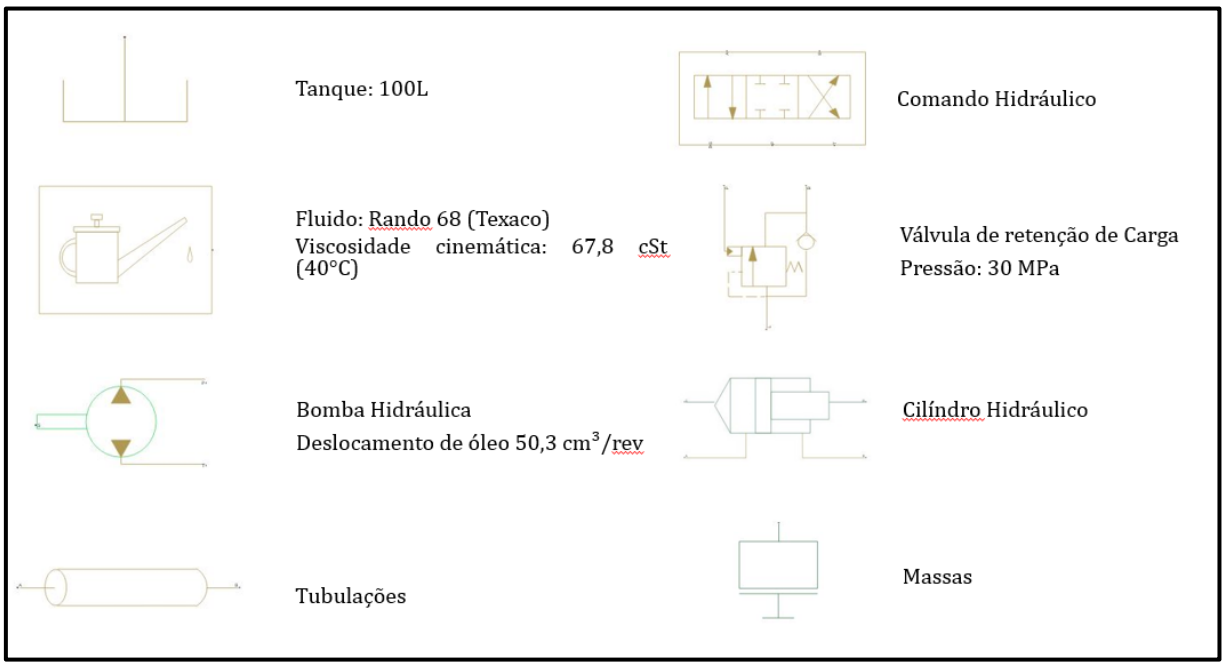
Fonte: o autor (2020).

3.4.5 Sistema hidráulico completo modelado com a ferramenta Simscape

O sistema hidráulico modelado com a ferramenta *Simscape*, não apresenta o sistema hidráulico de todo o guindaste, mostra somente os componentes necessários para a atuação dos cilindros de extensão de lança. O sistema modelado é composto pela bomba hidráulica e seu bloco de sinal físico, denominado como constante de rotação, seguido do comando hidráulico, uma válvula de retenção de carga dupla e os três cilindros responsáveis pela extensão das lanças.

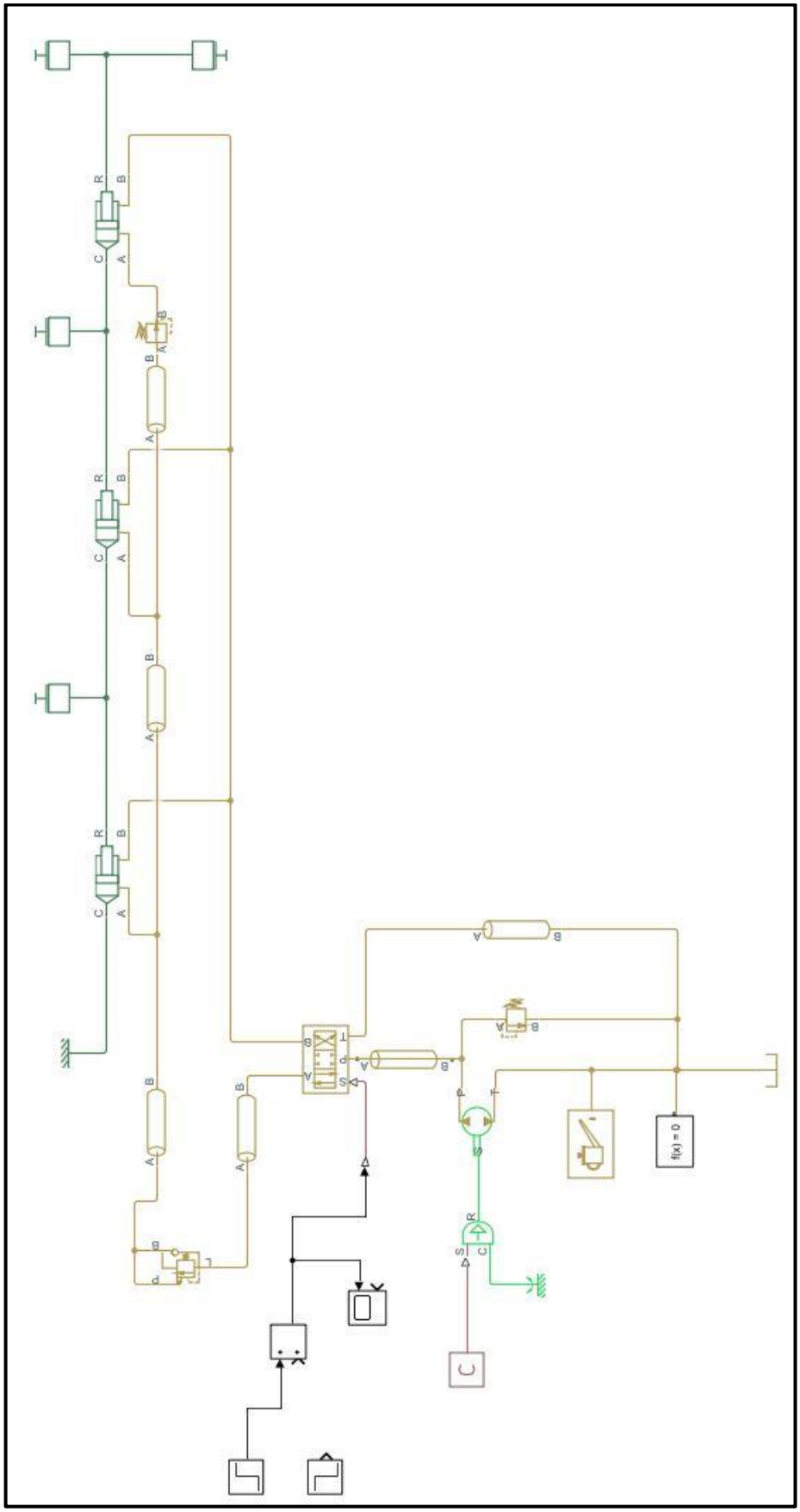
Os ícones que representam cada um dos modelos do sistema e o modelo completo elaborado no módulo do Matlab, podem ser verificados nas figura 19 e 20, respectivamente.

Figura 19 - Componentes do sistema



Fonte: o autor (2020).

Figura 20 - Modelo Virtual



Fonte: o autor (2020) .

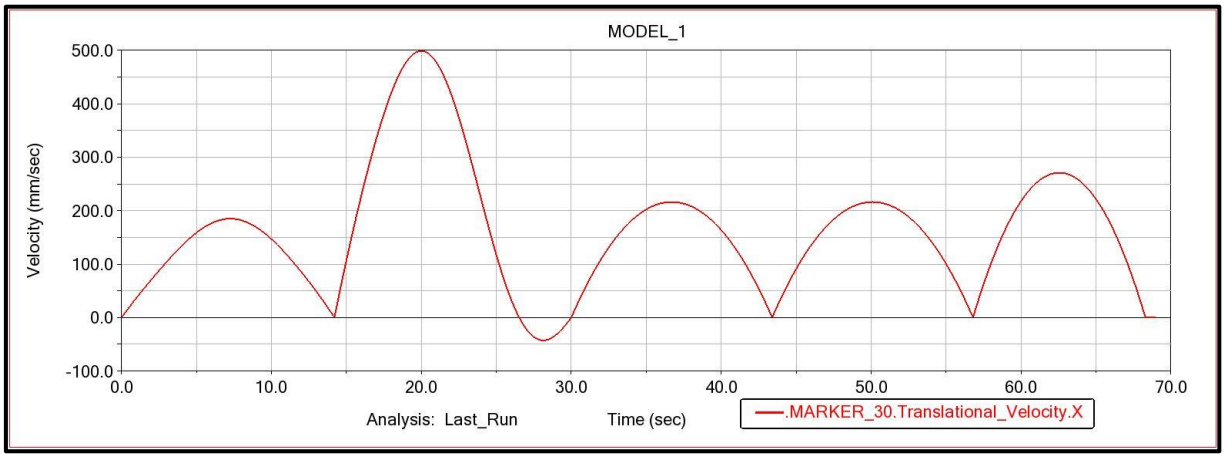
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Essa etapa baseia-se em agrupar e avaliar os resultados obtidos na simulação do movimento e na modelagem virtual do sistema hidráulico de extensão de lança do guindaste proposto.

4.1 DADOS COLETADOS DA SIMULAÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO

A primeira etapa da coleta de dados da movimentação de extensão de lanças do guindaste proposto, teve como finalidade avaliar as velocidades de translação entre as lanças hidráulicas do guindaste. A Figura 21, apresenta graficamente os dados obtidos, na extremidade da última lança hidráulica referente ao movimento gerado no eixo X.

Figura 21 - Velocidades em X para a extremidade do conjunto

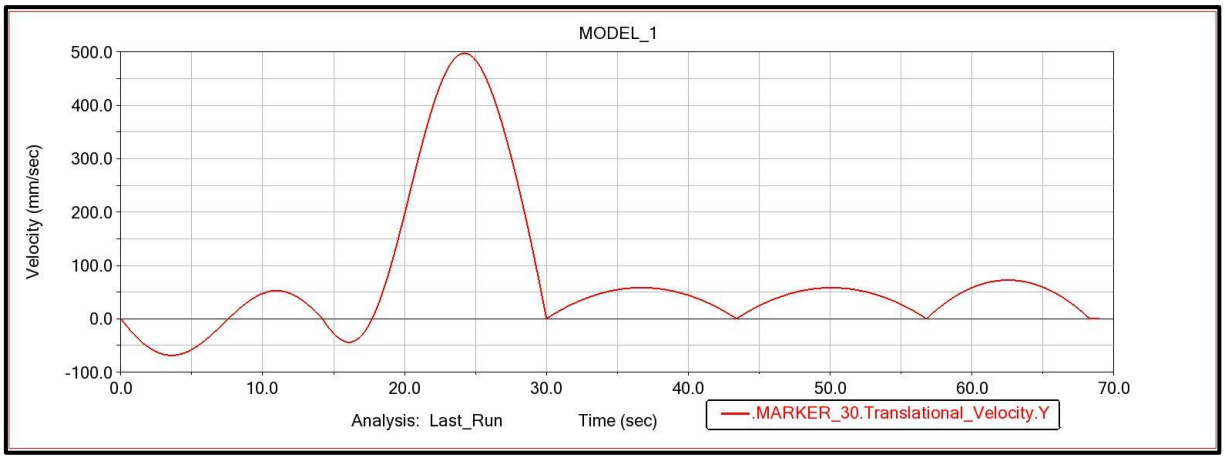


Fonte: o autor (2020).

De acordo com o tempo de 70 segundos, configurado para a movimentação do conjunto, pode-se notar que o sistema alcança a velocidade máxima de aproximadamente 500 mm/s no movimento de elevação do braço posterior do guindaste. Porém, para o movimento de extensão das lanças, o maior valor alcançado para a velocidade de translação no eixo X, foi de aproximadamente 275 mm/s na extremidade da terceira lança, seguido pela extensão das duas primeiras , que alcançaram um valor aproximado de 220 mm/s.

Os valores de velocidade translacional de extensão das lanças coletados para eixo Y, podem ser vistos na Figura 22 abaixo, onde a terceira lança hidráulica alcança uma velocidade aproximada de 75 mm/s e as duas primeiras lanças hidráulicas chegam à uma velocidade aproximada de 55 mm/s.

Figura 22 - Velocidades em Y para a extremidade do conjunto



Fonte: o autor (2020).

Para os dados obtidos das acelerações no eixo X , os maiores valores aproximam-se dos 145 mm/s² nos movimentos de elevação do braço posterior, e na extensão da terceira lança hidráulica. Para os valores de extensão das duas primeiras lanças, foram encontrados valores próximos a 70 mm/s², 90 mm/s² para terceira lança hidráulica do sistema, conforme apresenta a Figura 23 abaixo:

Figura 23 - Acelerações em X para a extremidade do conjunto

Fonte: o autor (2020).

Para o eixo Y, conforme a Figura 24, os valores são menores mas apresentam semelhança com as variáveis encontradas no eixo X, apresentando valores aproximados de 25 mm/s² para a extensão da terceira lança hidráulica e 20 mm/s² para as duas primeiras lanças.

Figura 24 - Acelerações em Y para a extremidade do conjunto

Fonte: o autor (2020).

Os dados de deslocamento gerados pelo *softaware Adams View*, podem ser visualizados na Figura 25, sendo representado também pelo percurso percorrido pela extremidade da terceira lança hidráulica, mostrado graficamente em unidades de comprimento (mm) e tempo (s).

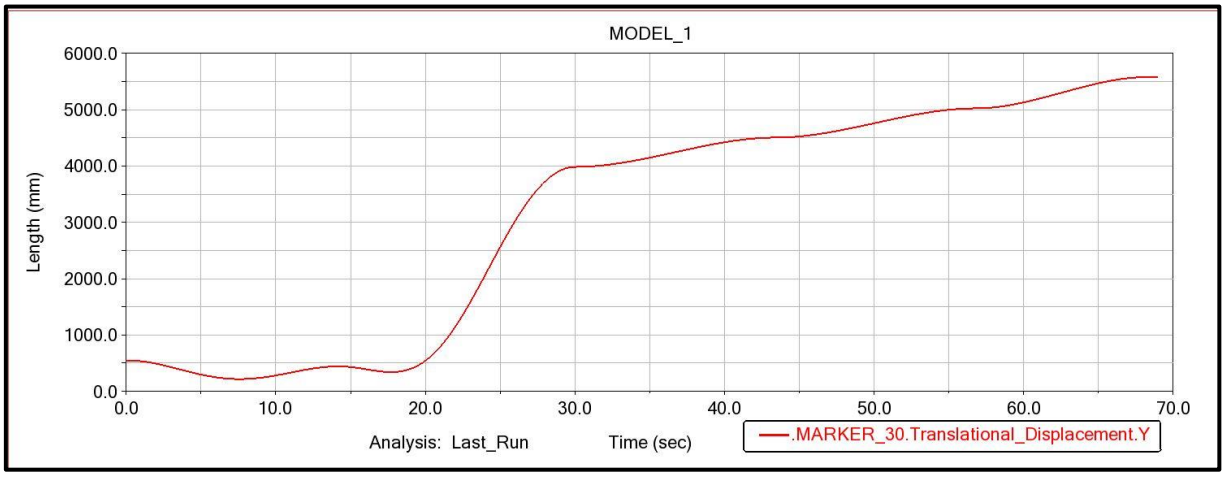
Figura 25 - Deslocamento da extremidade da terceira lança hidráulica no eixo X

Fonte: o autor (2020).

O deslocamento apresentado no gráfico refere-se a extremidade da última lança, avaliado no eixo X, que apresenta os valores de toda a movimentação do sistema, obtendo aproximadamente 10 metros de percurso.

Para o eixo Y esse valor apresenta-se menor, devido aos ângulos configurados para a análise, que simulam as lanças abertas para um maior alcance de comprimento. A análise do percurso nesse eixo, mostra valores próximos a 5,5 metros para o percurso da extremidade da terceira lança hidráulica, conforme a Figura 26 abaixo;

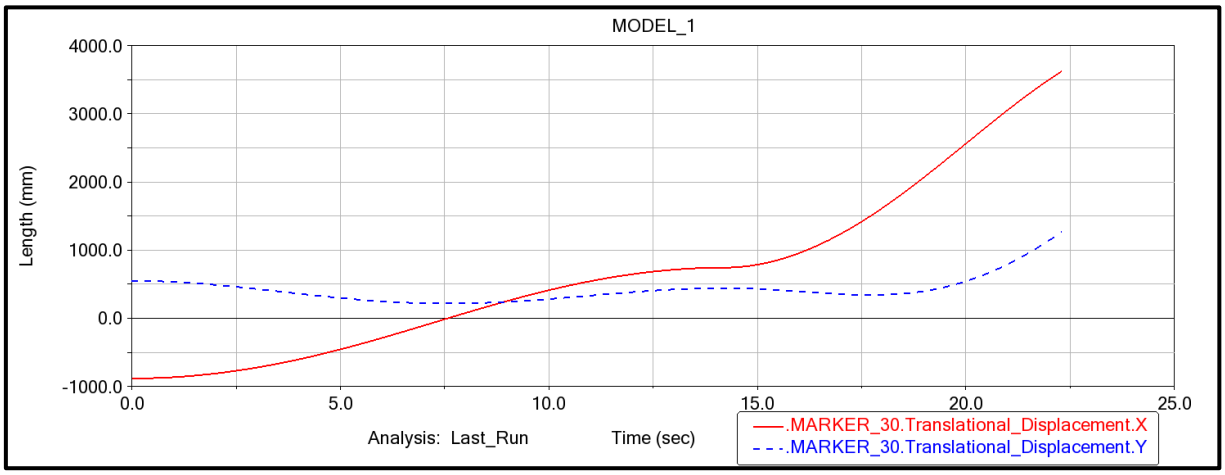
Figura 26 - Deslocamento da extremidade da terceira lança hidráulica no eixo Y



Fonte: o autor (2020).

Para visualização trajetória do marcador localizado na extremidade da terceira lança hidráulica, pode-se visualizar a figura 31 abaixo, que apresenta gráfico do deslocamento desse marcador em ambos os eixos.

Figura 27 - Deslocamento da extremidade da terceira lança hidráulica em X e Y.



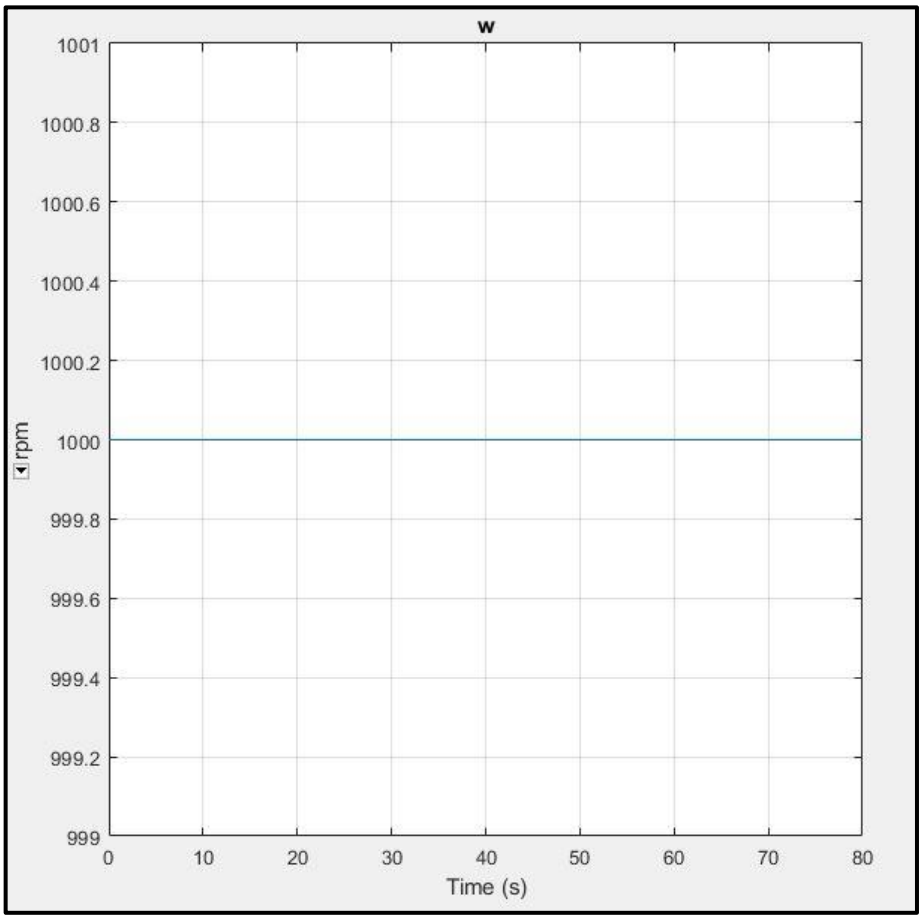
Fonte: o autor (2020).

4.2 DADOS COLETADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA HIDRÁULICO

A segunda etapa da análise realizada, consistiu na obtenção dos dados dos elementos fundamentais do circuito hidráulico responsável pela extensão das lanças do guindaste, como o comando, a bomba e os cilindros. Para isso, alguns dados desses elementos foram retirados da análise produzida no *Simscape* e são apresentadas abaixo.

A Figura 28, mostra a constante rotação da bomba hidráulica durante o período analisado de acordo com as configurações utilizadas para o bloco de sinal da bomba.

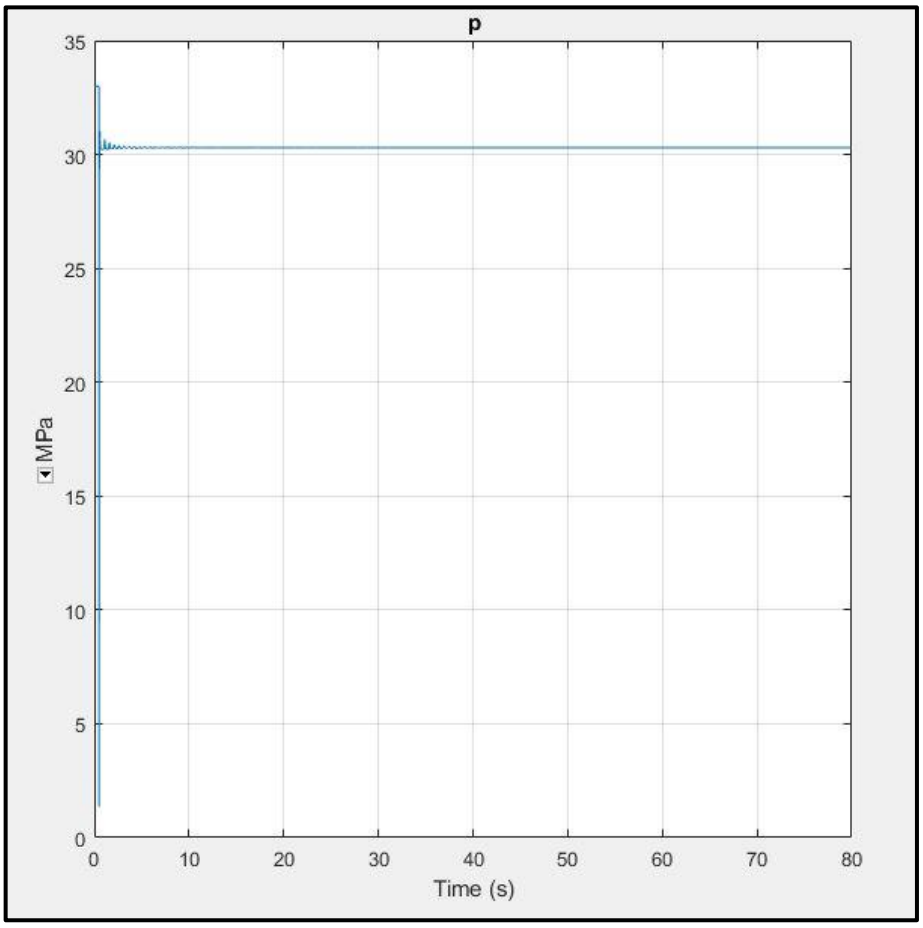
Figura 28 - Constante de rotação da bomba hidráulica



Fonte: o autor (2020).

Os valores de pressão em relação ao tempo, mostram que a bomba trabalha em regime constante durante todo o processo, mantendo pressão de aproximadamente 30.25 MPa, após 3 segundos de processo, conforme apresenta a figura 30 abaixo:

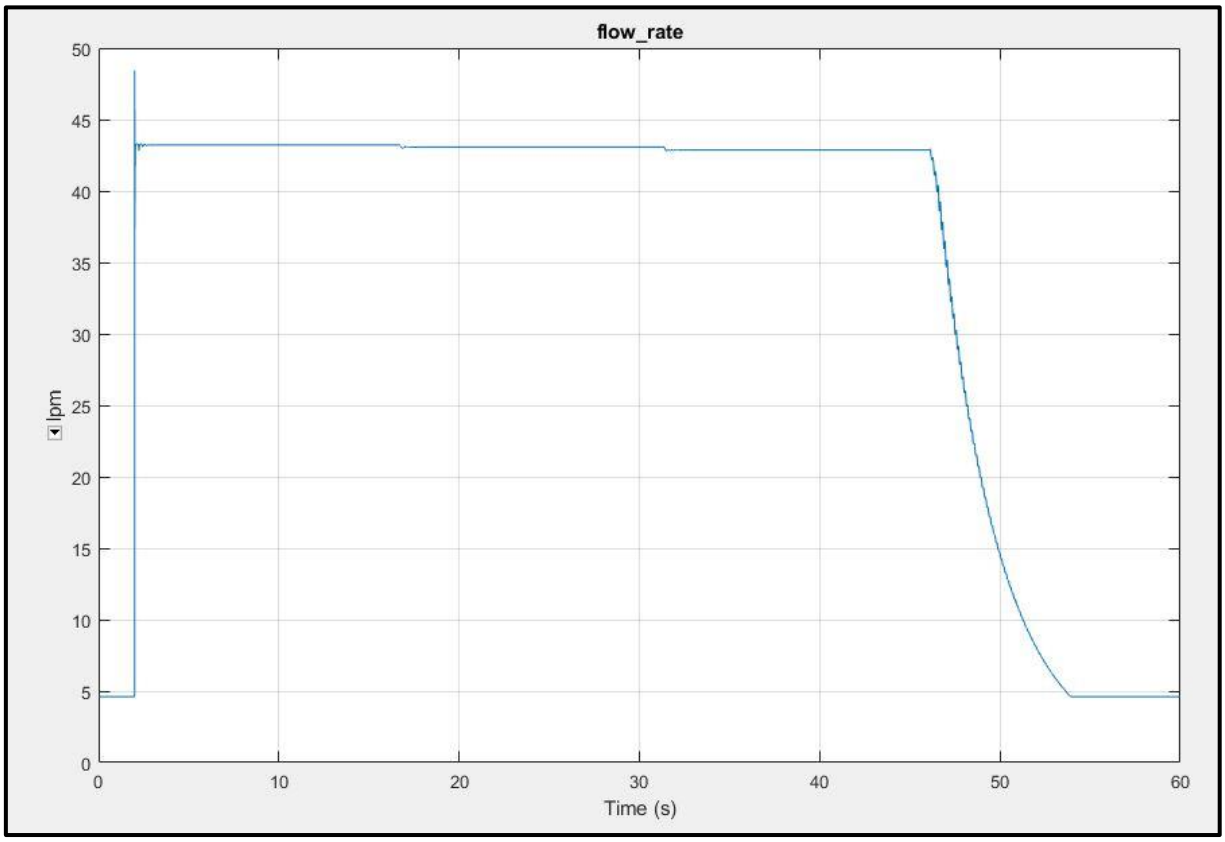
Figura 29 - Pressão na bomba hidráulica



Fonte: o autor (2020).

Por meio da análise virtual realizada no módulo do Matlab os dados mostram que a bomba trabalha com uma vazão constante de aproximadamente 43 L/min durante o período de abertura dos cilindros. Esses dados estão expressos na figura 30 abaixo.

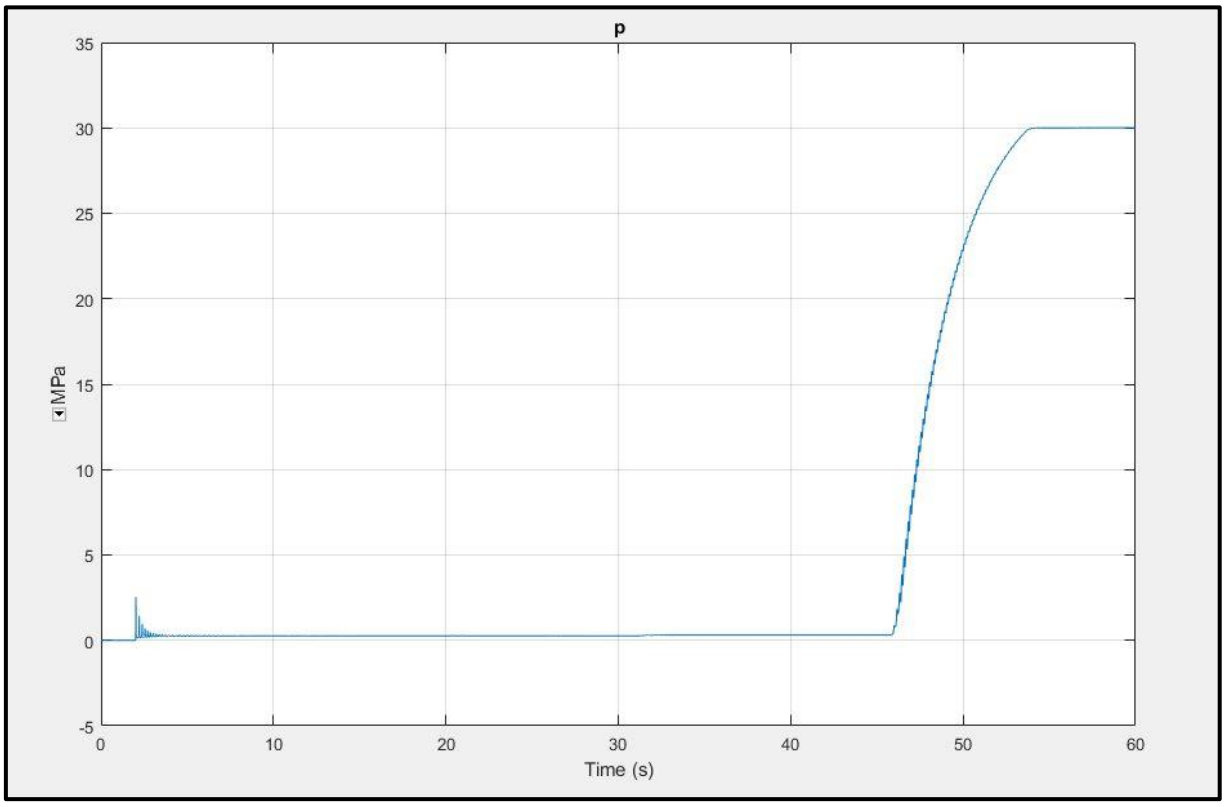
Figura 30 - Vazão da Bomba Hidráulica



Fonte: o autor (2020).

Com os resultados obtidos da análise do comando, pode-se perceber que a pressão que é distribuída pela bomba é a mesma recebida pela válvula do comando, ou seja, o valor na entrada da válvula também é de aproximadamente 30.25 Mpa, portanto, devido ser uma válvula de retenção de carga, o gráfico na sua saída apresenta-se de forma diferente, conforme pode-se visualizar na figura 31.

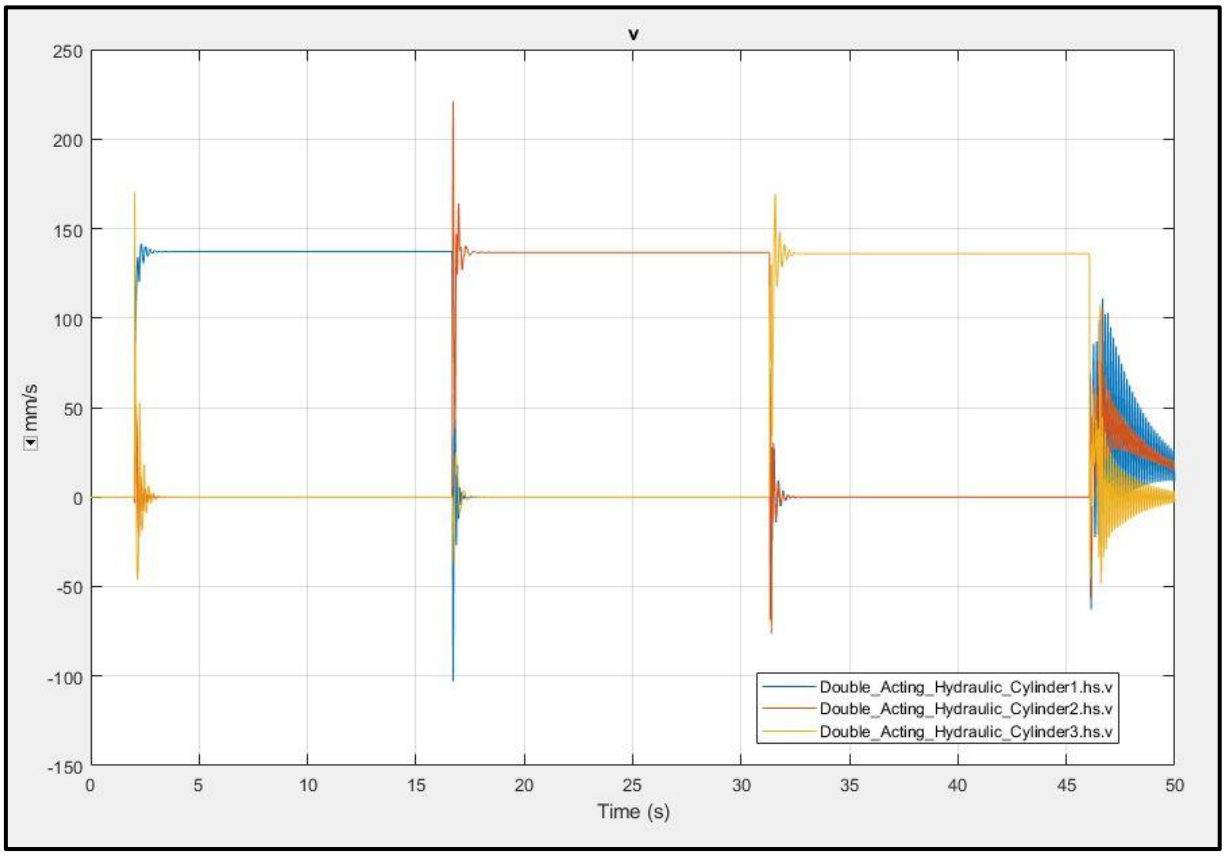
Figura 31 - Pressão na Saída da Válvula de retenção



Fonte: o autor (2020).

A última etapa da análise virtual no *Matlab*, foi a coleta dos dados obtidos nos três cilindros. Os gráficos retirados representam as velocidades e os deslocamentos alcançados por cada cilindro. Na análise do sistema hidráulico virtual, as velocidades dos três cilindros mantem-se próximas aos 140 mm/s nos momentos de movimentação e voltam ao ponto inicial no momento de repouso. A Figura 32 abaixo, apresenta graficamente os resultados obtidos pelos cilindros durante o período de trabalho proposto.

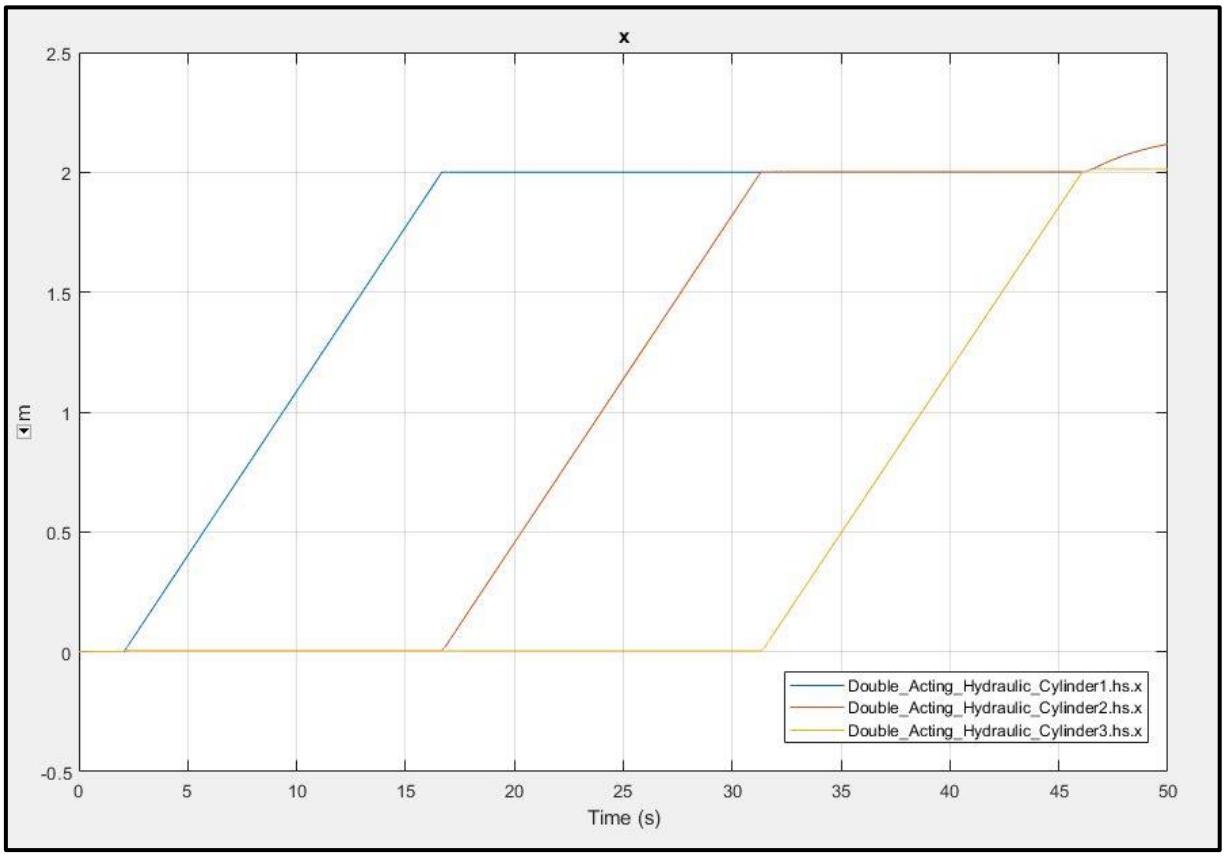
Figura 32 - Velocidades dos cilindros hidráulicos



Fonte: o autor (2020).

Conforme a Figura 34, observa-se que cada um dos três cilindros chegam ao final do seu curso em aproximadamente 16 segundos, e que se mantém em repouso no momento de trabalho dos outros cilindros. Ou seja, o primeiro cilindro entra em trabalho de extensão, enquanto o segundo e o terceiro cilindros mantém-se em repouso, o segundo cilindro hidráulico inicia sua extensão apenas quando o primeiro cilindro estiver estendido e assim sucessivamente com o terceiro cilindro hidráulico.

Figura 33 - Deslocamentos dos cilindros



Fonte: o autor (2020).

4.2 DADOS COLETADOS EM TESTES FÍSICOS

A Madal Palfinger S/A, dispõe de um ambiente exclusivo para testar os equipamentos produzidos e realizar pequenos ajustes antes do equipamento ser entregue ao seu destino final, chamado de "Área de Teste" ou "Montagem final".

Nesse ambiente são verificados diversos fatores do guindaste, como o funcionamento correto de acessórios, os tempos relativos a elevação, inclinação e extensão de lanças, pressões encontradas em alguns componentes críticos, e posicionamento de alguns componentes. Dessa forma, foram coletados os dados de teste do mesmo guindaste utilizado como objeto de estudo desse trabalho.

Dentre os resultados coletados integralmente, alguns podem ser comparados as análises realizadas no *Simscape* e no *software Adams View*. Os dados medidos experimentalmente da bomba hidráulica, por meio de um medidor de pressão, apresentam

valores de pressão de 330 bar ou 33 MPa, ou seja, os valores assimilam-se aos valores de pressão encontrados na análise do *Matlab*.

Os dados de tempo para a extensão de cada lança do guindaste também foram coletados experimentalmente, onde, o primeiro cilindro, responsável pela extensão da primeira lança hidráulica, obteve um tempo de extensão aproximadamente 13,4 até chegar ao fim de seu curso. O segundo cilindro hidráulico, responsável pela extensão da segunda lança hidráulica, apresentou o mesmo tempo do primeiro cilindro para atingir o máximo de sua extensão. O terceiro cilindro hidráulico, responsável pela extensão da última lança, alcançou um tempo de extensão um pouco menor que os dois primeiros cilindros, atingindo um valor de 11,5 segundos. Os cálculos de abertura dos cilindros utilizados para realizar a análise no software *Adams*, são os mesmos valores encontrados nos testes físicos realizados no equipamento.

A tabela 4 abaixo, compara os valores de tempo de abertura dos cilindros encontrados na análise realizada no *Simulink* com os dados obtidos nos testes experimentais, também configurados para a análise do movimento reproduzida no *Adams View*.

Tabela 4 - Comparativo de tempos de abertura dos cilindros hidráulicos

Denominação	Tempo de abertura medido Experimentalmente (s)	Tempo de abertura obtido da análise em *Simulink*
Cilindro 1	13,4	14,5 mm
Cilindro 2	13,4	14,5 mm
Cilindro 3	11,5	14 mm

Fonte: o autor (2020).

5 CONCLUSÕES

A análise realizada neste trabalho, teve como base a coleta de dados simulados e experimentais, na operação de um modelo de guindaste articulado..

Para a realização dessa análise, o conhecimento adquirido sobre o equipamento utilizado e as teorias de hidráulica e cinemática introduzidos ao longo desse trabalho foram de suma importância para o entendimento do sistema que movimenta o equipamento e, também, da forma como este se comporta em período de trabalho.

Sobre a elaboração do circuito hidráulico reproduzido no *software Simscape*, conclui-se que os dados coletados na análise, gerados a partir dos dados conhecidos do equipamento, foram condizentes com os valores obtidos nos testes físicos do equipamento. A partir disso, pode-se afirmar que a utilização desse tipo de análise virtual pode auxiliar no aprimoramento do circuito estudado ou no desenvolvimento de um novo produto, permitindo, assim, evitar a produção prévia de um protótipo ou de um modelo físico.

A análise realizada no *software Adams View* trouxe resultados similares aos dados obtidos na avaliação do circuito hidráulico virtual. Todavia, a análise da movimentação teve como grande diferencial o possível entendimento da movimentação realizada por todo o conjunto superior do equipamento, desde a elevação do braço anterior, seguido da inclinação do braço posterior, até a extensão de todas as lanças hidráulicas do conjunto. Dessa forma, a análise permitiu verificar a trajetória, as velocidades e as acelerações de qualquer componente do sistema de forma virtual.

Em suma, todos os objetivos citados no escopo deste trabalho foram alcançados, garantindo fidelidade aos testes experimentais e resultados assertivos, garantindo dessa forma, a utilização das análises virtuais realizadas para o estudo de novos sistemas e equipamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COSTA, A. **Application of Multibody System (MBS***):* techniques to automotive vehicle chassis simulation for motiron control studies. 1992.

CRANE BRASIL. Projetos e projeções para 2018. **Manuseio, Movimentação e Transporte de Carga**, São Paulo, v. 57, n. VII, p.10-15, fev. 2018. Disponível em: <http://cranebrasil.com.br/projetos-e-projecoes-para-2018/>. Acesso em: 10 mar. 2020.

FIALHO, Arivelto Bustamante. **Automação Hidráulica:** Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos. 6ª ed. São Paulo: Érica, 2013.

HALLIDAY, Resnick, Walker; **Fundamentos da Física**. Vol. 1, 8ª ed. LTC, 2009.

HIBBELER, Russell Charles. **Dinâmica: mecânica para engenharia**. 10. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

NORTON, Robert Lawrence. **Cinemática e dinâmica dos mecanismos**. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2010.

PALMIERI, Antônio Carlos. **Manual de Hidráulica Básica -** 10ª ed. Albarus sistemas Hidráulicos Ltda. Porto Alegre, 1997.

PARKER HANNIFIN. **Tecnologia Hidráulica Industrial** - Apostila M2001-2 BR. Jacareí, 2002. (Apostila).

SANTINI, Maicon Milton. **Otimização paramétrica de um conjunto de lanças de guindaste utilizando método backtracking.** 2016. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 201

SENAI. SC. **Hidráulica e Técnicas de Comando**. Florianópolis, 2004. (Apostila).

VICKERS, Sperry. **Manual de Hidráulica Industrial**. 8. ed. 935100-A, Sperry Vickers, 1983.