

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

NATHÁLIA CARDOSO DE MIRANDA

SELEÇÃO DE ROBÔS PARA PALETIZAÇÃO INDUSTRIAL: UM ESTUDO
BASEADO EM CRITÉRIOS DE DESEMPENHO VALIDADOS POR MEIO DE
SIMULAÇÃO

Joinville

2024

NATHÁLIA CARDOSO DE MIRANDA

SELEÇÃO DE ROBÔS PARA PALETIZAÇÃO INDUSTRIAL: UM ESTUDO
BASEADO EM CRITÉRIOS DE DESEMPENHO VALIDADOS POR MEIO DE
SIMULAÇÃO

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica, no Curso de Engenharia Mecatrônica, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Antônio Otaviano Dourado

Joinville

2024

Dedico este trabalho aos meus pais,
que renunciaram aos seus sonhos para que eu pudesse realizar os meus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina por proporcionar um ensino de qualidade que me permitiu concluir meu curso de Engenharia Mecatrônica. Tendo estudado toda a vida em instituições públicas, sinto-me privilegiada por ter recebido um investimento tão valioso na minha educação. Obrigada por todos os desafios e oportunidades que contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Antônio Otaviano Dourado, por aceitar minha proposta de tema, apesar do tempo limitado para seu desenvolvimento. Agradeço pelas conversas valiosas, este trabalho só se concretizou graças ao seu apoio.

Agradeço aos meus pais, Geovane e Tatiana, à minha irmã, Eduarda, e a toda a minha família, que me apoiaram desde o início da minha jornada pessoal e profissional, respeitando minhas escolhas, me dando suporte em todos os momentos e nunca me deixando desistir, acreditando em mim mesmo quando eu já não tinha esperanças.

Agradeço aos meus amigos e colegas por me acompanharem e trazerem leveza aos dias difíceis, compartilhando risadas e conselhos, e comemorando juntos todos os pequenos passos que me permitiram chegar até aqui.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, Dheovana e João, que me passaram boa parte dos conhecimentos contidos neste trabalho e me deram segurança para transmiti-los, sem vocês provavelmente este trabalho não existiria.

Agradeço ao meu namorado, Murilo, por seu amor e apoio incondicional. Sua presença constante, suas palavras encorajadoras e sua paciência inabalável fizeram toda a diferença nesta jornada. Obrigada por acreditar em mim e estar ao meu lado em cada pedaço desse caminho que estamos trilhando juntos.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. A cada um de vocês, minha eterna gratidão.

“You can shine no matter what you’re made of.”

— Bigweld, Robots (de Chris Wedge)

RESUMO

A paletização eficiente é crucial para a otimização da produção em diversos setores, sendo o uso de robôs uma solução comum, porém desafiadora, devido à variedade de opções disponíveis e aos custos associados. Considerando isso, apresenta-se neste trabalho um procedimento para seleção de robôs visando à automatização de uma linha de paletização em ambientes industriais. Desenvolveu-se um procedimento que auxilie a escolha do robô mais adequado em termos de desempenho e custo para atender às necessidades específicas de uma linha de paletização. Utilizando uma abordagem metodológica que combina a revisão da literatura com um estudo de caso, foram estudados diferentes modelos de robôs da marca KUKA em relação a critérios como tempo de ciclo, alcance e *payload*. A validação dos resultados foi realizada por meio de simulação utilizando o software KUKA.Sim, o que permitiu análise detalhada do desempenho teórico em comparação com a prática simulada. Acredita-se que este trabalho fornece orientações claras para a seleção de robôs para paletização, considerando tanto aspectos técnicos quanto econômicos, e contribui para a eficiência e competitividade das operações de paletização na indústria.

Palavras-chave: seleção de robôs; paletização industrial; simulação computacional.

ABSTRACT

Efficient palletizing is crucial for optimizing production in various sectors, with the use of robots being a common yet challenging solution due to the variety of available options and associated costs. Considering this, this paper presents a procedure for selecting robots aimed at automating a palletizing line in industrial environments. A procedure was developed to assist in choosing the most suitable robot in terms of performance and cost to meet the specific needs of a palletizing line. Utilizing a methodological approach that combines a literature review with a case study, different models of KUKA robots were studied concerning criteria such as cycle time, reach, and payload. The validation of the results was conducted through simulation using the KUKA.Sim software, which allowed for a detailed analysis of theoretical performance compared to simulated practice. It is believed that this work provides clear guidelines for the selection of robots for palletizing, considering both technical and economic aspects, and contributes to the efficiency and competitiveness of palletizing operations in the industry.

Keywords: robot selection; industrial palletizing; computational simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Robô KR 240 R3330	19
Figura 2 - Robô Cartesiano para paletização	20
Figura 3 - Eixos de um robô de coordenadas cilíndricas	21
Figura 4 - Exemplo de robô polar	22
Figura 5 - Exemplo de robô SCARA.....	22
Figura 6 - Robô do tipo Delta modelo FANUC M-3iA/6A.....	23
Figura 7 - Robô colaborativo UR10e	24
Figura 8 - Espaço de trabalho de um robô KUKA	26
Figura 9 - Mosaico Linha 1	39
Figura 10 - Caixa Linha 1	39
Figura 11 - Mosaico Linha 2	40
Figura 12 - Caixa Linha 2	40
Figura 13 - Célula completa	41
Figura 14 - Tabela de tempo de ciclo	42
Figura 15 - Alcance do robô	43
Figura 16 - Dados da garra obtidos através do projeto feito no <i>SolidWorks</i>	44
Figura 17 - Dados utilizados para o <i>payload</i> do robô	45
Figura 18 - Programação feita para a simulação.....	47
Figura 19 - Configuração da <i>Tool</i> do robô.....	48
Figura 20 - Sinais utilizados na programação	49
Figura 21 - Tempo de ciclo para produto KR 120 R2700-2.....	50
Figura 22 - Tempo de ciclo para <i>slipsheet</i> KR 120 R2700-2	50
Figura 23 - Tempo de ciclo para produto KR 120 R3200 PA	51
Figura 24 - Tempo de ciclo para <i>slipsheet</i> KR 120 R3200 PA	51
Figura 25 - Tempo de ciclo para produto KR 180 R3200 PA	52
Figura 26 - Tempo de ciclo para <i>slipsheet</i> KR 180 R3200 PA	52
Figura 27 - Configuração do KUKA <i>Load</i>	53
Figura 28 - Análise KUKA <i>Load</i> para o robô KR 120 R2700-2.....	54
Figura 29 - Análise KUKA <i>Load</i> para o robô KR 120 R3200 PA	54
Figura 30 - Análise KUKA <i>Load</i> para o robô KR 180 R3200-2 PA	55
Figura 31 - Comparação do <i>payload</i> entre os três modelos de robôs selecionados	58

Figura 32 - Exemplo para cálculo de módulo	59
Figura 33 - Resultado do alcance do KR 120 R2700-2 para o palete da Linha 1.....	60
Figura 34 - Resultado do alcance do KR 120 R3200 PA para o palete da Linha 1 ...	61
Figura 35 - Resultado do alcance do KR 180 R3200 PA para o palete da Linha 1 ...	61
Figura 36 - Procedimento padronizado para seleção de robôs	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado dos tempos de ciclo.....	56
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IN Sinais de entrada

Kg Quilograma

Kg.m² Quilograma metro quadrado

mm Milímetro

OUT Sinais de saídas

s Segundos

SCARA Conjunto de Conformidade Seletiva Robot Arm

TC Tempo de Ciclo

LISTA DE SÍMBOLOS

τ – Torque

r – Braço de alavanca (distância do ponto de aplicação da força ao eixo de rotação)

F – Força aplicada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivos Gerais	16
1.1.2 Objetivos Específicos	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 ROBÔS INDUSTRIAIS E AUTOMAÇÃO	18
2.1.1 Tipos de robôs	19
<u>2.1.1.1 Robôs Articulados</u>	<u>19</u>
<u>2.1.1.2 Robôs cartesianos</u>	<u>20</u>
<u>2.1.1.3 Robôs de coordenadas cilíndricas</u>	<u>21</u>
<u>2.1.1.4 Robôs polares</u>	<u>21</u>
<u>2.1.1.5 Robôs SCARA</u>	<u>22</u>
<u>2.1.1.6 Robôs Delta</u>	<u>23</u>
<u>2.1.1.7 Robôs Colaborativos</u>	<u>23</u>
2.1.2 Parâmetros de robôs	24
<u>2.1.2.1 Payload de um robô</u>	<u>24</u>
<u>2.1.2.2 Alcance de um robô</u>	<u>26</u>
<u>2.1.2.3 Tempo de ciclo</u>	<u>27</u>
2.1.3 Simulação	27
3. METODOLOGIA	29
3.1 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DA MARCA KUKA	29
3.2 SOFTWARE KUKA.SIM	30
3.2.1 Funcionamento do Software KUKA.Sim	31
3.3 SOLIDWORKS E OBTENÇÃO DOS DADOS DE PAYLOAD	32
3.4 KUKA LOAD	33
3.5 CÁLCULO DO TEMPO DE CICLO	33
3.6 OBTENÇÃO DO ALCANCE	34
3.7 ESCOLHA DOS TIPOS DE ROBÔS ADEQUADOS	34
3.7.1 Robôs Industriais KUKA	34
3.7.2 Robôs Paletizadores KUKA	36
4. DESENVOLVIMENTO	38
4.1 INFORMAÇÕES DA CÉLULA PROPOSTA	38

4.1.1 Descrição da célula	38
4.1.2 Funcionamento do sistema	40
4.2 ANÁLISE DA CÉLULA	41
4.2.1 Cálculo do tempo de ciclo da célula	41
4.2.2 Alcance necessário	43
4.2.3 <i>Payload</i> necessário	44
4.2.4 Avaliação do tipo de robô necessário para a aplicação	46
4.3 SIMULAÇÃO NO KUKA.SIM	46
4.3.1 Programação	46
4.3.2 Tool do robô	48
4.3.3 Sinais da simulação	49
4.3.4 Timers para medir os tempos de ciclo	49
4.4 SIMULAÇÃO KUKA LOAD	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	56
5.1.1 Resultados do tempo de ciclo	56
5.1.2 Resultados do <i>payload</i>	57
5.1.3 Resultados do alcance	60
5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	62
5.2.1 Interpretação dos Resultados	62
5.2.2 Limitações do Estudo	62
5.2.3 Procedimento de escolha de robôs	63
6. CONCLUSÕES	65
6.1 POSSÍVEIS MELHORIAS	65
REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia, a automação da produção vem sendo utilizada por diversas empresas como forma de fazer melhorias na eficiência e na qualidade de processos de produção, onde, basicamente, ocorre a troca da mão de obra humana por máquinas, promovendo o aumento da produtividade e a diminuição dos erros e dos riscos de acidentes (Ribeiro, 2001). Uma das formas de automação é o uso de robôs para impulsionar essas melhorias. Estima-se que, em todo o mundo, já existam mais de três milhões de robôs operando em fábricas, segundo a *International Federation of Robots* (2021).

Uma das principais tarefas realizadas por robôs nas indústrias é a paletização, que consiste em agrupar objetos em uma única unidade de carga, formando um volume organizado e compacto para facilitar o manuseio e transporte. A automação dos sistemas de paletização visa otimizar o espaço disponível, agilizar os processos de transporte e armazenagem, além de reduzir a exposição dos funcionários a movimentos repetitivos e cansativos (Rios; Marcarini, 2021 apud Pastorio, 2022).

Contudo, a escolha do melhor tipo de robô para essa tarefa é algo que pode impactar significativamente nos resultados das produções de uma indústria. Porém, segundo a *Universal Robots Brasil* (2020), o investimento necessário para integrar um robô industrial convencional em uma indústria pode chegar a dezenas ou até mesmo centenas de milhares de dólares. Assim, é necessário que um estudo robusto seja realizado antes da implementação de uma célula robótica, para que o valor investido possa retornar à empresa.

Dadas essas circunstâncias, uma série de critérios de desempenho precisam ser avaliados no momento da escolha do robô, entre os quais destaca-se o tempo de ciclo, alcance, *payload*, precisão, flexibilidade, velocidade de movimentação, confiabilidade e facilidade de programação e operação (Bianchi, 2016a). Para essas avaliações, é possível fazer o uso da simulação virtual, que consiste em utilizar um robô virtual em ambientes virtuais para testar o desempenho do robô sem exigir o robô físico (Andrews, 2023).

A simulação robótica desempenha papel essencial na otimização de sistemas, permitindo planejamento rápido e personalizado sem necessidade de construção física e além de economizar tempo e recursos, contribui para aumentar o volume de

negócios ao apresentar soluções de forma profissional. Também garante segurança de planejamento ao desenvolver conceitos com tempos de ciclo precisos desde as fases iniciais, aumentando a competitividade. Por fim, a verificabilidade é assegurada por testes de alcance e detecção de colisões, garantindo a viabilidade dos programas e layouts de células (KUKA.Sim, 2024). Esses benefícios ressaltam a importância da simulação robótica na engenharia e automação industrial.

Dado o contexto da automação industrial e a importância da escolha correta de robôs para a eficiência na paletização de linhas de produção, realiza-se neste trabalho uma análise e desenvolvimento de um procedimento para a seleção de robôs adequados à realização da paletização industrial. O objetivo é fundamentar essa seleção em critérios como tempo de ciclo, alcance e *payload*, visando otimizar o desempenho e reduzir custos operacionais. Para validar as escolhas técnicas e teóricas, foram realizadas simulações com diferentes robôs selecionados para a mesma tarefa, utilizando um software especializado, o KUKA.Sim, desenvolvido pela empresa KUKA, permitindo uma análise detalhada e aferição dos resultados obtidos.

Para a obtenção dos resultados, foi realizado um estudo de caso que iniciou com uma revisão da literatura, seguido por uma simulação computacional e a aplicação do método comparativo. Essas abordagens foram empregadas para desenvolver um procedimento de seleção de robôs para a paletização industrial, visando melhorar a eficiência e a competitividade das operações. O objetivo é fornecer diretrizes claras e fundamentadas para a seleção de robôs em diversos contextos de produção.

1.1 OBJETIVOS

Para resolver a problemática de propor um procedimento para seleção de robôs KUKA visando a automatização eficiente de linhas de paletização em ambientes industriais, estabeleceu-se os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivos Gerais

Desenvolver um procedimento para seleção de robôs visando a automatização eficiente de linhas de paletização em ambientes industriais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar os critérios de desempenho chave para a seleção de robôs na paletização;
- Comparar diferentes modelos de robôs em relação a esses critérios;
- Validar os resultados teóricos por meio de simulação computacional;
- Proporcionar orientações claras e fundamentadas para a escolha de robôs em diferentes contextos de produção.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para propor um procedimento de seleção de robôs visando a automatização eficiente de linhas de paletização, primeiramente é necessário ter o mínimo de conhecimento sobre os conceitos que cercam este assunto. Desta forma, é possível fazer uma avaliação precisa, levando em consideração todos os aspectos importantes gerados pela problemática.

Portanto, neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos sobre a utilização de robôs na automatização, os tipos de robôs presentes no mercado, os seus parâmetros e o conceito de simulação.

2.1 ROBÔS INDUSTRIAIS E AUTOMAÇÃO

A automação industrial tem sido uma tendência crescente nas últimas décadas, impulsionada pela busca contínua por eficiência, qualidade e competitividade nas operações de produção. Nesse cenário, os robôs desempenham um papel fundamental como agentes de automação, proporcionando uma variedade de benefícios, desde o aumento da produtividade até a melhoria das condições de trabalho.

Os robôs industriais são máquinas programáveis capazes de executar tarefas de forma autônoma ou semiautônoma, realizando uma ampla gama de atividades com precisão, rapidez, força e eficiência (Solutions, 2023). Eles são utilizados em diversos setores industriais, como automotivo, eletrônico, alimentício, entre outros, para realizar operações de montagem, pintura e soldagem, além de sua aplicação em movimentação de cargas, inspeção de produtos e deslocamento (Cravo, 2024).

A evolução da tecnologia robótica tem permitido o desenvolvimento de robôs cada vez mais sofisticados e versáteis, capazes de lidar com ambientes e tarefas complexas. Dentro deste contexto, diversos tipos de robôs industriais surgiram, entre os mais conhecidos estão: Robôs Articulados, Cartesianos, Cilíndricos, Polares, SCARA, Delta e Colaborativos (*Universal Robots Brasil*, 2022). Na próxima seção, uma breve explicação sobre a classificação e suas principais características serão discutidas.

2.1.1 Tipos de robôs

Para Bastos (2015), pode-se classificar os robôs industriais pelo seu número de eixos, tipos de controle, de geometria e acionamento. Esta classificação inclui robôs cartesianos, robôs de coordenadas circulares, de coordenadas cilíndricas e robô SCARA. Porém, nesta seção serão abordados os seguintes tipos de robôs: Robôs Articulados, Cartesianos, Cilíndricos, Polares, SCARA, Delta e Colaborativos, que são mais utilizados atualmente.

2.1.1.1 Robôs Articulados

Os robôs articulados são os mais comuns na indústria devido à sua versatilidade e capacidade de imitar os movimentos do braço humano. Com uma estrutura semelhante à de um braço humano, esses robôs são compostos por vários eixos que se dobram em diferentes direções, o que aumenta consideravelmente o alcance e as possibilidades de aplicação. O número de eixos pode variar de 2 a 10, dependendo das necessidades específicas ou do tamanho da máquina, sendo os robôs de 6 eixos os mais comuns, incluindo os robôs colaborativos (Universal Robots, 2022). Na Figura 1 tem-se um exemplo de robô articulado da KUKA, do modelo KR 240 R3330.

Figura 1 - Robô KR 240 R3330



Fonte: Datasheet KR 240 R3330 (2024).

As desvantagens deste modelo envolvem a necessidade de um controlador de robô específico, programação complexa e uma cinemática mais complexa, exigindo mais estudo antes da implementação (Universal Robots, 2022).

2.1.1.2 Robôs cartesianos

Os robôs cartesianos, também conhecidos como robôs retilíneos ou *gantry* de, apresentam uma configuração retangular com três juntas prismáticas que proporcionam movimentos lineares em três eixos perpendiculares. Esses robôs têm a capacidade de deslocar-se em conjunto, permitindo movimentos de rotação (Universal Robots, 2022). Sua simplicidade de operação os torna ideais para aplicações industriais, uma vez que seguem coordenadas x, y e z em um arranjo linear, tanto horizontal quanto verticalmente.

Essa característica os torna particularmente adequados para tarefas que requerem precisão espacial, como aquelas executadas em máquinas CNC, onde pontos do desenho inseridos no programa são utilizados para orientar o robô em suas operações (Bastos, 2015). Na Figura 1 é possível observar uma imagem de um robô cartesiano desenvolvido para aplicações de paletização.

Figura 2 - Robô Cartesiano para paletização



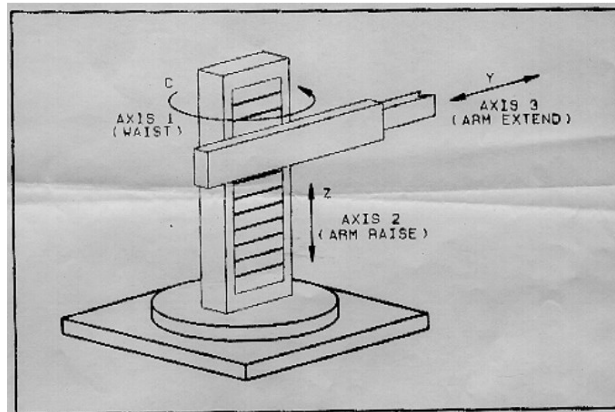
Fonte: Catálogo de produtos da GuiaLat (2024).

Apesar de sua versatilidade e facilidade de manipulação, os robôs cartesianos podem apresentar limitações em alcance, o que os torna menos adequados para determinadas aplicações (Universal Robots, 2022).

2.1.1.3 Robôs de coordenadas cilíndricas

O robô de coordenadas cilíndricas combina movimentos lineares e rotacionais. Geralmente, esse tipo de robô apresenta um movimento rotacional na cintura (*waist*) e movimentos lineares, conforme ilustrado na Figura 3. Os movimentos desses eixos formam um cilindro.

Figura 3 - Eixos de um robô de coordenadas cilíndricas



Fonte: Bastos (2015, p. 4)

Os robôs de coordenadas cilíndricas operam em espaços de trabalho cilíndricos e são conhecidos por seu design compacto que permite acesso a locais estreitos sem sacrificar velocidade ou precisão. São comumente empregados em tarefas simples de manuseio e montagem (Universal Robots, 2022).

2.1.1.4 Robôs polares

De acordo com Carrara (2015), este tipo de braço robótico foi desenvolvido para suportar grandes cargas e ter um amplo alcance. Esse robô é comumente empregado em tarefas de carga e descarga de máquinas, embora o braço revoluto seja mais predominante nessas aplicações. Ele consiste em duas juntas rotativas seguidas por uma junta prismática, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Exemplo de robô polar



Fonte: Carrara (2015, p. 16).

A primeira junta permite o movimento do braço em torno de um eixo vertical, enquanto a segunda junta gira o conjunto em torno de um eixo horizontal. O espaço de trabalho é esférico, originando o nome "polar" para esse manipulador devido às coordenadas polares, que são compostas por duas coordenadas angulares (juntas rotativas) e uma coordenada radial (junta prismática). Atualmente, esse tipo de braço está sendo substituído pelos braços revolutos, tornando-se menos comum (Carrara, 2015).

2.1.1.5 Robôs SCARA

Os robôs denominados Conjunto de Conformidade Seletiva *Robot Arm* (SCARA) são comumente utilizados em tarefas de montagem, caracterizando-se por possuir duas juntas paralelas que proporcionam conformidade no plano de instalação. Seu alcance de trabalho é em formato de anel, com os eixos rotativos dispostos verticalmente e o eixo final do braço movendo-se horizontalmente, como mostrado na Figura 5 (Universal Robots, 2022).

Figura 5 - Exemplo de robô SCARA



Fonte: Carrara (2015, p. 16).

Especializados em movimentos laterais, os robôs SCARA são amplamente empregados na montagem devido à sua velocidade e facilidade de integração em comparação com outros tipos de robôs (Universal Robots, 2022).

2.1.1.6 Robôs Delta

Os robôs Delta, conhecidos como robôs de link paralelo, apresentam conexões de junções paralelas ligadas a uma base comum, conferindo-lhes uma aparência semelhante à de uma aranha. Com o controle individual de cada junta sobre a ferramenta final, a manipulação pode ser facilmente ajustada, proporcionando uma notável velocidade de operação (Universal Robots, 2022). Na Figura 6 é apresentado um exemplo de robô Delta da fabricante FANUC do modelo M-3iA/6A.

Figura 6 - Robô do tipo Delta modelo FANUC M-3iA/6A



Fonte: Catálogo de produtos FANUC (2024).

Esses robôs têm um espaço de trabalho em formato de cúpula e são frequentemente empregados em operações rápidas de *pick-and-place*, que são soluções de automação de manuseio feito por robôs, onde *pick* significa o movimento de pega do robô e *place* significa o movimento de depósito do robô (Universal Robots, 2022).

2.1.1.7 Robôs Colaborativos

Os robôs colaborativos, também chamados de *cobots*, são robôs de seis eixos caracterizados por sua operação segura sem células de segurança, baixo peso, boa capacidade de carga e flexibilidade nas linhas de produção. Eles complementam

outras formas de automação na fábrica e liberam os trabalhadores de tarefas repetitivas, cansativas e propensas a lesões. Isso permite que os trabalhadores assumam novas responsabilidades, melhorando a qualidade das tarefas na fábrica e reduzindo erros e prejuízos (Universal Robots, 2022). A Figura 7 apresenta um robô colaborativo UR10e da fabricante Universal Robots.

Figura 7 - Robô colaborativo UR10e



Fonte: Catálogo de produtos Universal Robots (2024).

A adoção de robôs colaborativos representa não apenas um avanço na automação industrial, mas também uma oportunidade para promover um ambiente de trabalho mais seguro, eficiente e produtivo (Universal Robots, 2022).

2.1.2 Parâmetros de robôs

Antes de selecionar e implementar um robô em uma linha de produção, é fundamental compreender os diversos parâmetros que definem suas capacidades e limitações. Estes parâmetros incluem, entre outros, o *payload* máximo que o robô pode manipular, o alcance efetivo de seus movimentos, e o tempo necessário para completar ciclos de trabalho. Uma análise abrangente desses parâmetros permite uma seleção precisa do robô mais adequado às necessidades específicas da aplicação, garantindo eficiência operacional e maximização dos resultados. Nesta seção, exploraremos em detalhes esses parâmetros essenciais e sua importância na escolha e operação de robôs industriais.

2.1.2.1 Payload de um robô

Um aspecto crucial ao determinar as especificações de um robô é sua capacidade de carga, também conhecida como *payload*. Essa medida é influenciada pelo design do robô, pela forma e superfície do objeto a ser manipulado, pela posição do robô (considerando a inércia tanto da carga quanto do próprio robô) e pela velocidade de movimentação. Algumas empresas fornecem duas capacidades de carga – uma normal e outra máxima, ou estática e dinâmica. É importante verificar as condições sob as quais esses valores são estabelecidos, bem como o tipo de efetuator a ser utilizado, já que a capacidade de carga é determinada pelo efetuator e pela carga (Silva, 1990).

Esse parâmetro não só define o peso máximo que o robô pode manipular, mas também influencia diretamente sua dinâmica de movimento, acelerações, e a corrente elétrica necessária para operar os motores. Entender a relação entre o *payload* e essas variáveis é crucial para garantir a precisão, eficiência e durabilidade do robô. Operar acima do *payload* nominal pode resultar em problemas significativos, como desarmes por sobrecorrente, aumento no desgaste dos componentes e redução na produtividade. Portanto, a correta especificação e dimensionamento do *payload* são essenciais para o sucesso e segurança das operações robóticas (Hadad, 2024).

Quando um robô manipula uma carga, ele precisa não apenas suportar o peso estático da carga, mas também movimentá-la de forma controlada. A força necessária para acelerar a carga aumenta linearmente com o aumento da massa. Se o *payload* é maior, a força necessária para mover o robô com a mesma aceleração também aumenta.

Além disso, há o momento de inércia, uma medida da resistência de um corpo à rotação. Para um robô, ele depende da massa da carga e da distância dessa massa ao eixo de rotação. Quanto maior o momento de inércia, maior será a resistência do robô a mudanças na sua rota de movimento, impactando diretamente nas acelerações e desacelerações (*Motion Controls Robotics*, 2024).

Outro fator influenciador no *payload* é a corrente elétrica nos motores. O torque (τ) exigido dos motores aumenta com o aumento do *payload*, já que o torque segue a Equação 1.

$$\tau = r * F \tag{1}$$

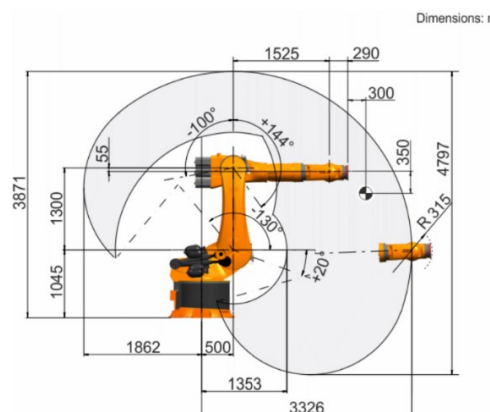
Onde r é o braço de alavanca (distância do ponto de aplicação da força ao eixo de rotação) e F é a força aplicada (Bianchi, 2016b). Motores elétricos requerem mais corrente para gerar maior torque. A relação é aproximadamente linear, então um aumento no *payload* leva a um aumento correspondente na corrente necessária (Kollmorgen, 2020).

Devido à maior inércia, os movimentos do robô se tornam mais lentos, podendo impactar diretamente no tempo de ciclo e reduzindo a produtividade (*Robots Done Right*, 2024). A precisão e a estabilidade do controle do movimento também são comprometidas, pois pode resultar em vibrações, erros de posicionamento e dificuldades em realizar tarefas que requerem alta precisão (Zhu; Zu; Goldenberg, 2000). Por fim, os componentes como engrenagens, eixos e rolamentos sofrem desgaste acelerado quando submetidos a cargas excessivas. Isso resulta em maior necessidade de manutenção e substituição de peças (Borvultex, 2024).

2.1.2.2 Alcance de um robô

O espaço de trabalho de um robô é a área tridimensional dentro da qual o manipulador robótico pode mover sua extremidade efetuada enquanto executa suas tarefas (Masulo; Cardoso, 2012). Ele é determinado pelos limites físicos dos movimentos dos braços e juntas do robô, incluindo alcance, limites de rotação e restrições de movimento impostas pelo ambiente de trabalho. Em essência, o espaço de trabalho define o espaço operacional disponível para o robô realizar suas funções. A Figura 8 traz um exemplo de informações do espaço de trabalho de um robô KUKA.

Figura 8 - Espaço de trabalho de um robô KUKA



Fonte: Datasheet KR 240 R3330 (2024).

Segundo *Robotics* (2024), um espaço de trabalho é como um limite para o alcance do braço robótico, determinando a área que ele pode cobrir. Essa medida é importante especialmente em ambientes onde humanos e robôs interagem, pois estabelece uma zona segura para evitar acidentes na fábrica. Ao selecionar um robô industrial, é essencial considerar o tipo e o tamanho do espaço de trabalho, pois isso afetará as atividades que o robô pode realizar na planta.

2.1.2.3 Tempo de ciclo

Para Pereira (2023), o Tempo de Ciclo (TC), conhecido em inglês como *Cycle Time*, é empregado como uma medida da eficácia de um procedimento e indica o intervalo de tempo entre a conclusão de duas peças sequenciais. Ou seja, em uma operação de paletização, por exemplo, o tempo de ciclo refere-se ao intervalo de tempo necessário para que o robô inicie o processo de paletização a partir de um ponto específico, até o momento em que o robô retorna a esse ponto para iniciar novamente o processo.

É importante salientar que a relação entre o TC e a velocidade do robô é crucial, pois uma maior velocidade de operação tende a reduzir o tempo de ciclo (Ottoni, 2010). Quando o robô executa suas tarefas em uma velocidade mais rápida, o intervalo de tempo necessário para completar uma tarefa diminui, impactando diretamente o tempo de ciclo total da operação. Portanto, ao considerar a eficiência de um processo robótico, é fundamental avaliar tanto o TC quanto a velocidade do robô, pois esses aspectos estão intimamente relacionados e influenciam significativamente o desempenho global da operação.

2.1.3 **Simulação**

A simulação pode ser definida como uma técnica em que se utiliza um simulador, considerando-se simulador como um objeto ou representação parcial ou total de uma tarefa a ser replicada (Ziva; Wolpe; Small; Glick, 2003). Essa técnica reproduz o comportamento de um sistema, processo ou fenômeno de interesse, utilizando modelos computacionais ou físicos.

Neste contexto, a simulação permite experimentar e testar cenários hipotéticos, sem os riscos associados à implementação direta em ambientes reais. As

aplicações da simulação são vastas e abrangem tanto as áreas das Ciências quanto as Engenharias. Ela pode destacar aspectos tecnológicos, como desenvolvimento de projetos, criação de protótipos e estímulo à inovação, além de abranger aspectos científicos e econômicos (Leal, 2023).

A importância da simulação reside na sua capacidade de oferecer um ambiente controlado e replicável para a experimentação e o treinamento. Ela permite que os profissionais adquiram habilidades e experiência em situações complexas e de alto risco, como procedimentos médicos, operações industriais e emergências. Além disso, a simulação viabiliza a elaboração de cenários e a previsão dos efeitos ao implementar estratégias industriais, contribuindo para otimizar os processos e aumentar a competitividade ao identificar antecipadamente os desafios e benefícios de uma cadeia produtiva específica (Amaral, 2022).

Segundo Wolf et al. (2009), o uso de ambientes virtuais de simulação de robôs tem se destacado como uma ferramenta poderosa, oferecendo uma série de vantagens significativas:

- Economia de recursos financeiros: Diversos testes podem ser realizados antes da implementação física do robô, reduzindo custos.
- Economia de tempo: A simulação permite realizar um maior número de experimentos em menos tempo, evitando a necessidade de recarregar baterias ou posicionar equipamentos.
- Prevenção de danos ao robô: Situações que podem causar danos, como colisões ou exposição a ambientes perigosos, podem ser identificadas previamente.
- Aumento da segurança: A simulação possibilita testes para garantir a segurança do sistema robótico, prevenindo acidentes com pessoas e elementos do ambiente.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, serão discutidos os métodos utilizados para desenvolver um procedimento de seleção de robôs visando a automatização eficiente de linhas de paletização em ambientes industriais. Utilizou-se um estudo de caso prático de uma célula de paletização para simular uma situação real e identificar os requisitos necessários, como *payload*, alcance e tempo de ciclo.

Optou-se por focar na marca KUKA ao selecionar o robô paletizador, devido à facilidade de análise e comparação dos diferentes modelos disponíveis dentro de uma única marca. Considerando a utilização dos robôs KUKA, julgou-se mais adequado empregar o software de simulação da própria fabricante, o KUKA.Sim. Este software foi desenvolvido para fornecer dados simulados de situações reais, garantindo uma pequena margem de erro entre o real e o simulado. O software requer uma licença para uso completo, porém possui uma versão gratuita disponível para testes durante 30 dias.

Para a obtenção dos dados de *payload*, foi utilizado o software *SolidWorks*, que auxiliou na determinação de parâmetros, fornecendo informações como massa, centro de massa e momento de inércia com base no projeto da garra. Além de incluir os dados obtidos no simulador, os dados também foram validados na ferramenta *KUKA Load*.

O tempo de ciclo necessário que o robô precisaria atingir foi obtido através de uma tabela de cálculos específica. Já o alcance foi obtido através de medições dos pontos mais críticos que o robô precisaria alcançar. A escolha dos robôs foi feita baseada no catálogo de robôs industriais disponível, considerando todos esses requisitos citados.

3.1 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DA MARCA KUKA

A escolha da marca KUKA para a paletização industrial foi fundamentada em diversos fatores que objetivaram assegurar eficiência, confiabilidade e adequação aos requisitos do processo. A reputação globalmente reconhecida da KUKA como uma das principais fabricantes de robôs industriais foi um dos principais motivadores dessa

escolha. A extensa trajetória e experiência da empresa no mercado evidenciam um compromisso com a inovação tecnológica e a qualidade de seus produtos.

Os robôs KUKA representam uma vanguarda na indústria robótica, sendo reconhecidos por sua excelência em automação e precisão em diversas aplicações industriais. A trajetória da KUKA teve início em 1898, quando Johann Josef Keller e Jakob Knappich estabeleceram a empresa em Augsburg (História da KUKA, 2024). Desde então, a companhia tem sido reconhecida por suas contribuições e avanços no cenário da automação alemã.

Atualmente, a KUKA é uma das principais fornecedoras de soluções de automação inteligente em todo o mundo. Com ampla gama de robôs industriais, desde os modelos de pequeno porte até os de grande capacidade de carga, a KUKA oferece soluções personalizadas para atender às necessidades específicas de seus clientes em diversos setores, como Automotivo, Eletrônico, Indústria em Geral, Bens de Consumo, *E-Commerce/Retail* e Saúde (Sobre a KUKA, 2024).

Além disso, os robôs KUKA são conhecidos por sua precisão e confiabilidade, garantindo resultados consistentes e de alta qualidade em todas as aplicações. Equipados com sistemas avançados de controle e sensores de última geração, esses robôs são capazes de realizar uma ampla variedade de tarefas com rapidez e precisão, desde montagem e soldagem até paletização e manuseio de materiais.

A KUKA oferece uma variedade de modelos de robôs industriais, incluindo os da série KR, ideais para montagem, manipulação e usinagem. Além disso, eles têm os robôs colaborativos da série LBR, projetados para interação segura com humanos em processos de montagem e inspeção. A linha KR AGILUS é conhecida por sua precisão em espaços compactos, enquanto os robôs da série KR QUANTEC são robustos e versáteis para soldagem e manuseio de materiais pesados (Robôs Industriais da KUKA, 2024).

3.2 SOFTWARE KUKA.SIM

Sendo desejado realizar a simulação robótica, é preciso escolher o melhor ambiente virtual que receba as informações de entrada da situação real e calcule a saída simulada com precisão e confiança. Como serão utilizados robôs KUKA, julga-se mais adequado a utilização do software de simulação da própria fabricante, o

KUKA.Sim, desenvolvido pela KUKA para fornecer dados simulados de situações reais com pequena margem de erro entre o real e o simulado.

Segundo a KUKA (KUKA.Sim, 2024), o KUKA.Sim é um “software de simulação inteligente para a programação offline eficiente de robôs KUKA”. Ele permite simular o funcionamento de robôs industriais em um ambiente virtual, oferecendo uma representação precisa e detalhada das operações que os robôs executam no mundo real. Com o KUKA.Sim, é possível testar e validar programas de controle, otimizar processos de produção, realizar treinamentos e até mesmo simular cenários de manutenção, tudo sem a necessidade de acesso direto aos equipamentos físicos.

O KUKA.Sim gera um gêmeo digital e, conseqüentemente, uma representação do processo de produção futuro. A simulação em 3D abrange todas as etapas de planejamento: desde o design do processo até a visualização dos fluxos de materiais e pontos críticos, e até mesmo a codificação PLC. Todos os dados são consistentes em 100%, garantindo que a unidade de controle virtual e a física operem com os mesmos conjuntos de dados (KUKA.Sim, 2024).

No software é possível validar questões como alcance, *payload*, tempo de ciclo e detecção de colisão, assim é possível verificar se os programas de robô e os layouts de ciclos de trabalho são realmente realizáveis ou não. Portanto, o software será suficiente para validar o procedimento de escolha de um robô adequado para uma paletização, proposto durante o trabalho, trazendo segurança aos resultados obtidos durante o estudo.

3.2.1 Funcionamento do Software KUKA.Sim

No software KUKA.Sim é possível montar todo o layout da planta e programar o robô para que ele execute a rotina desejada. A simulação fornece dados de tempo de ciclo, singularidades e limitações de alcance do robô. Além disso, é possível trocar o robô sem que seja necessário criar um programa novo e marcar os pontos novamente, assim, pode-se avaliar o desempenho de diferentes modelos de robôs de forma eficiente.

A programação pode ser feita no ambiente “*Program*” do software e há disponibilidade de recursos como sensores, sinais de entradas e saídas no robô e nos transportadores para controle da célula através da programação. A programação

contém um programa principal denominado “*MAIN My_Job*” que é o programa que o robô executa. Além disso, é possível criar diversos subprogramas que podem ser chamados no programa principal no momento da execução da rotina, dessa forma é possível organizar e otimizar o programa, facilitando o entendimento.

Ainda na programação, é possível adicionar temporizadores para medir o tempo em segundos de um ponto a outro, assim, é possível obter o tempo de ciclo para cada processo que o robô realiza. Já em relação ao alcance, quando ele o robô precisa chegar em um ponto fora de seu alcance, o robô para e um aviso dizendo “*Work envelope exceeded*” é exibido na área de *Output*, significando que o ponto que o robô tentou atingir está fora do seu espaço de trabalho.

Para validação do *payload* via simulação, foi necessário incluir os dados de *payload* na configuração da *Tool* (ou ferramenta) do robô, que é o dispositivo montado na extremidade do braço robótico. É crucial definir corretamente a *Tool* no software de programação para garantir precisão e eficiência na operação do robô. Outro ponto importante é que o software permite a configuração de várias *Tools* que podem ser utilizadas na marcação dos pontos em casos em que o robô trabalha com cargas diferentes, porém, nessa simulação foi utilizado apenas uma *Tool* com o caso mais crítico de carga, simulando o pior caso que o robô precisará realizar.

3.3 SOLIDWORKS E OBTENÇÃO DOS DADOS DE PAYLOAD

O *payload* é a quantidade de peso que o braço do robô pode levantar (Kawasaki Robots, 2024). Nesse peso é necessário incluir o peso dos produtos que o robô manuseará e o peso do efetuador do robô, no caso dessa célula, da garra do robô. O robô recebe os valores de massa, centro de massa e inércia para fazer o cálculo do *payload* e reconhecer se será possível trabalhar com essa carga, no simulador também são incluídos esses dados, visto que esses dados influenciam diretamente no tempo de ciclo do robô.

Para o desenvolvimento do projeto da garra utilizada na paletização industrial, empregou-se o software *SolidWorks*. O *SolidWorks* é uma ferramenta robusta de CAD (*Computer-Aided Design*) que permite a criação detalhada de modelos 3D, além de fornecer capacidades avançadas de análise e simulação (Oliveira, 2022).

O software foi utilizado para o modelamento 3D da garra, levando em consideração as especificações e dimensões necessárias para a manipulação

eficiente do produto. O *SolidWorks* possui uma ferramenta chamada “Propriedades de massa”, que calcula massa, densidade, volume, centro de massa e momento de inércia com base na geometria do modelo e nas propriedades de material (DASSAULT SYSTEMÈMES, 2024).

Com esta ferramenta, foi possível utilizar um modelo de garra padrão fornecido no software KUKA.Sim e fazer o modelamento no *SolidWorks*, atribuindo os materiais corretos e posicionando os produtos que teriam a maior massa, simulando o pior caso que o robô deveria suportar. Assim, os dados de massa, centro de massa e momento de inércia, necessários para informar ao robô o seu correto *payload*, foram coletados para a simulação.

3.4 KUKA LOAD

A KUKA possui uma ferramenta chamada KUKA Load que oferece uma análise detalhada da capacidade de carga estática e dinâmica dos robôs KUKA. Durante essa análise, é possível introduzir dados específicos do cliente, como dimensões, centro de gravidade da massa e inércia. Os usuários podem visualizar diagramas de capacidade de carga, tanto estáticos quanto dinâmicos, para verificar se o robô está sobrecarregado. Além disso, a ferramenta permite uma análise detalhada da carga na flange do robô e em diversos eixos, garantindo uma avaliação precisa e personalizada do desempenho do robô (KUKA Load, 2024).

3.5 CÁLCULO DO TEMPO DE CICLO

Para determinar o tempo de ciclo necessário para que o robô consiga atender às duas linhas sem problemas de acúmulos de produto, foi desenvolvido um procedimento que envolve a criação de uma tabela de cálculos. Essa tabela foi projetada para integrar informações como a taxa de chegada das linhas, o número de caixas por camada, número de *picks* por camada e o número de camadas por palete. Utilizou-se essas informações para calcular os parâmetros necessários e chegar ao tempo de ciclo adequado. O objetivo era garantir que o robô pudesse operar de maneira eficiente, atendendo às exigências de produção sem causar atrasos ou acúmulos indesejados.

3.6 OBTENÇÃO DO ALCANCE

O alcance de um robô industrial é um parâmetro crucial que define a máxima distância que seu braço pode alcançar vertical e horizontalmente (Kawasaki Robots, 2024). Esse alcance determina a área de cobertura do robô e influencia diretamente sua capacidade de realizar tarefas em diferentes posições dentro de uma célula de trabalho.

Para definir o alcance necessário que o robô deveria possuir foi necessário medir a distância entre o centro do robô e o ponto mais distante que ele precisaria alcançar. Essa medida foi feita através do próprio simulador pela função “*Measure*”, da origem do robô até o ponto mais externo do palete em que o robô precisou depositar caixas.

3.7 ESCOLHA DOS TIPOS DE ROBÔS ADEQUADOS

Em cenários onde a complexidade das tarefas é alta e exige uma ampla gama de movimentos em múltiplos planos e orientações, o uso de um robô de 6 eixos pode ser altamente vantajoso. Esses robôs são capazes de realizar uma ampla variedade de movimentos, incluindo rotações em torno de todos os três eixos cartesianos e em torno dos eixos de rotação do próprio robô (Lopes, 2002). Isso os torna ideais para aplicações que requerem flexibilidade e adaptabilidade, como montagem de componentes complexos, manipulação de objetos em espaços confinados e aplicações que exigem movimentações em diferentes ângulos.

Como a marca escolhida para exemplificar o procedimento de escolha de robô foi a KUKA, se fez necessário realizar um estudo sobre as linhas de robôs disponíveis da marca.

3.7.1 Robôs Industriais KUKA

Os robôs industriais da KUKA, disponíveis em seu catálogo, são projetados para diversas aplicações industriais, oferecendo flexibilidade, precisão e eficiência. Entre as principais linhas de robôs industriais KUKA estão: KR AGILUS, KR

CYBERTECH, KR QUANTEC, KR IONTEC e KR FORTEC (Catálogo robôs industriais KUKA, 2024).

- KR AGILUS: Esta linha de robôs é conhecida por sua alta velocidade e precisão. Com capacidades de carga que variam de 6 kg a 10 kg e alcances que variam de 600 mm a 1100 mm, os robôs KR AGILUS são ideais para tarefas que requerem rapidez e agilidade em espaços confinados, como montagem de componentes pequenos e inspeção.
- KR CYBERTECH: Os robôs desta linha oferecem uma combinação de flexibilidade e alta performance para tarefas de manipulação. Com capacidades de carga de 6 kg a 22 kg e alcances de até 2100 mm, são adequados para aplicações em linhas de produção automatizadas, incluindo soldagem, corte e manipulação de materiais.
- KR QUANTEC: A linha KR QUANTEC é conhecida por sua versatilidade e robustez, com capacidades de carga que variam de 120 kg a 300 kg e alcances de até 3100 mm. Esses robôs são amplamente utilizados em aplicações que vão desde a manipulação de materiais até a soldagem e montagem de componentes de grande porte.
- KR IONTEC: Esta linha de robôs é projetada para oferecer alta flexibilidade e eficiência em uma ampla gama de aplicações industriais. Com capacidades de carga de 20 kg a 70 kg e alcances de até 2100 mm, os robôs KR IONTEC são ideais para tarefas de manipulação de materiais, montagem e operações de usinagem.
- KR FORTEC: A linha KR FORTEC é destinada a aplicações que exigem alta capacidade de carga e alcance, com capacidades de carga de 360 kg a 600 kg e alcances de até 3200 mm. Esses robôs são usados em tarefas pesadas, como manipulação de grandes componentes automotivos e estruturas metálicas.

Por outro lado, em situações em que as tarefas são mais simples e envolvem movimentos em apenas um ou dois planos, o uso de um robô de 6 eixos pode ser excessivo e desnecessário. Nesses casos, um robô com menos eixos, como um robô de 3 ou 4 eixos, pode ser mais adequado e econômico. Esses robôs são mais simples

em termos de mecânica e programação, o que pode resultar em custos mais baixos de aquisição, manutenção e operação. Além disso, eles podem ser mais fáceis de integrar em linhas de produção existentes e requerem menos espaço de trabalho.

Existem diferentes tipos de robôs que podem exercer a mesma tarefa, além dos robôs convencionais, também indicados para aplicações de paletização, ainda existem os robôs paletizadores, específicos para essa função. A KUKA possui uma família de robôs paletizadores específica, em que todos esses robôs foram desenvolvidos para realizar paletizações com maior eficácia. Os robôs paletizadores são ideais para capacidades de carga maiores, além de possuírem raios de alcance maiores, design compacto e tempos de ciclo mais rápidos (KR 700 PA, 2024).

3.7.2 Robôs Paletizadores KUKA

Os robôs paletizadores da KUKA são projetados para atender às demandas de paletização com eficiência e precisão. Entre as principais linhas de robôs paletizadores da KUKA estão: KR 40 PA, KR QUANTEC PA, KR 300 PA, KR 470 PA, KR 700 PA e KR 1000 titan PA (Catálogo robôs paletizadores KUKA, 2024).

- KR 40 PA: é um robô paletizador leve, ideal para operações de paletização de cargas menores. Com uma capacidade de carga de até 40 kg e um alcance máximo de 2091 mm, este robô é adequado para aplicações que requerem alta velocidade e precisão em um espaço compacto.
- KR QUANTEC PA: a linha KR QUANTEC PA oferece uma combinação de flexibilidade e robustez, com capacidades de carga que variam de 120 kg a 240 kg e um alcance que pode chegar a até 3195 mm. Estes robôs são versáteis e podem ser usados em uma ampla gama de aplicações de paletização, desde cargas médias até pesadas.
- KR 300 PA: projetado para cargas mais pesadas, com uma capacidade de carga de até 300 kg e um alcance máximo de 3150 mm. Este robô é ideal para aplicações que exigem manipulação de grandes volumes e peso considerável, garantindo eficiência e robustez.
- KR 470 PA: é um robô paletizador robusto com uma capacidade de carga de até 470 kg e um alcance de 3150 mm. Este modelo é especialmente adequado para paletização de cargas muito pesadas, oferecendo alta resistência e durabilidade.

- KR 700 PA: projetado para aplicações de paletização de alta capacidade, o KR 700 PA pode manipular cargas de até 700 kg com um alcance de 3320 mm. Este robô é ideal para setores que exigem a movimentação de cargas extremamente pesadas, mantendo a precisão e a eficiência operacional.
- KR 1000 titan PA: é o robô paletizador mais potente da KUKA, com uma capacidade de carga impressionante de até 1000 kg e um alcance de 3200 mm. Este robô é destinado a aplicações industriais que demandam a máxima capacidade de carga e robustez, garantindo uma paletização eficiente de cargas extremamente pesadas.

4. DESENVOLVIMENTO

Nesta seção, foram apresentados os dados da célula de paletização, juntamente com os processos utilizados para obter os parâmetros de *payload*, alcance e tempo de ciclo. Além disso, discutiu-se a seleção de robôs KUKA que atenderam aos requisitos estabelecidos, bem como a montagem e validação da simulação, incluindo uma análise de viabilidade econômica.

4.1 INFORMAÇÕES DA CÉLULA PROPOSTA

Nesta seção, foi apresentada uma explicação detalhada da célula sugerida para a paletização industrial, abordando aspectos gerais e informações essenciais para o entendimento do contexto de seleção de robôs. Foi explorada a disposição física da célula, os fluxos de materiais envolvidos e outras características relevantes que tiveram impacto direto na escolha do robô mais adequado para o processo.

4.1.1 Descrição da célula

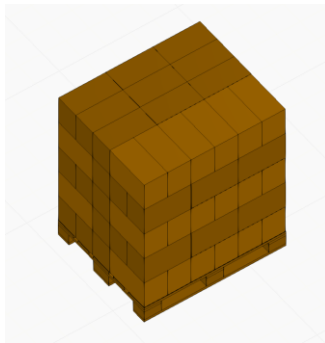
A célula de paletização é composta por duas linhas de produção, denominadas Linha 1 e Linha 2. Cada linha possui suas próprias especificidades em termos de taxa de chegada dos produtos, informações do mosaico das caixas e dimensões das caixas.

Linha 1:

- Taxa de chegada das caixas: 5 caixas por minuto
- Informação do Mosaico: o mosaico possui 5 camadas com 15 caixas por camada e realiza 5 *picks* por camada (*pick* triplo).

A Figura 9 mostra o mosaico completo da Linha 1.

Figura 9 - Mosaico Linha 1

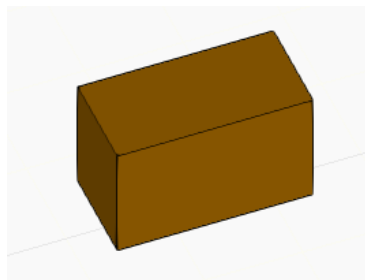


Fonte: elaborado pela autora.

- Dimensões da caixa:
 - Comprimento: 400mm;
 - Largura: 200mm;
 - Altura: 250mm;
 - Massa da caixa: 5,2Kg.

A Figura 10 mostra um exemplo de caixa da Linha 1.

Figura 10 - Caixa Linha 1



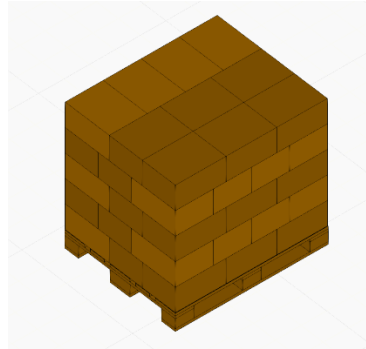
Fonte: elaborado pela autora.

Linha 2:

- Taxa de chegada das caixas: 4 caixas por minuto
- Informação do Mosaico: o mosaico possui 5 camadas, com 10 caixas por camada e realiza 5 *picks* por camada (*pick* duplo).

A Figura 11 mostra o mosaico completo da Linha 2.

Figura 11 - Mosaico Linha 2

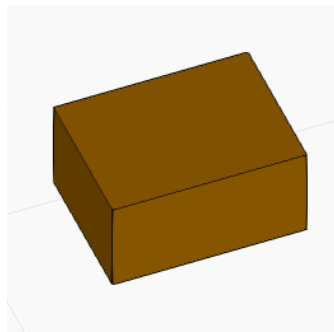


Fonte: elaborado pela autora.

- Dimensões da caixa:
 - Comprimento: 400mm;
 - Largura: 300mm;
 - Altura: 200mm;
 - Massa da caixa: 4,6Kg.

A Figura 12 mostra um exemplo de caixa da Linha 2.

Figura 12 - Caixa Linha 2

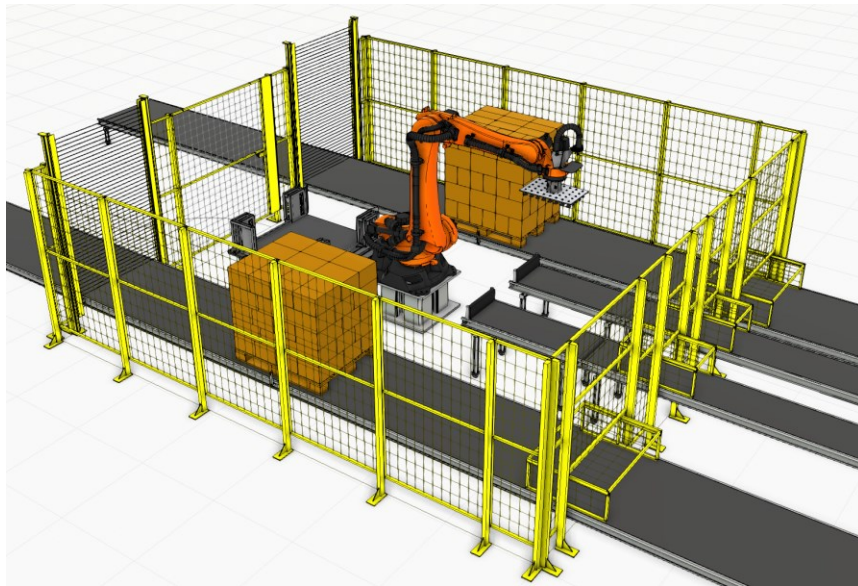


Fonte: elaborado pela autora.

4.1.2 Funcionamento do sistema

O robô realiza a paletização das caixas, com entrada e saída de paletes automáticas. Na Figura 13 é possível observar a imagem da célula proposta.

Figura 13 - Célula completa



Fonte: elaborado pela autora.

Além disso, o robô faz um *pick-and-place* de *slipsheet* (uma folha de papelão utilizada para fazer a separação entre caixa e palete) antes da primeira camada de cada palete para garantir a estabilidade das camadas de caixas sobre os paletes. O sistema de trocas de paletes não interfere no tempo de ciclo do robô, uma vez que é feito automaticamente.

4.2 ANÁLISE DA CÉLULA

Nesta seção determinou-se o tempo de ciclo necessário para o robô, com os dados apresentados em uma tabela para uma visualização clara. Avaliou-se também o alcance exigido pelo processo, assim como a capacidade de carga que o robô precisaria suportar, assegurando uma escolha precisa e eficiente.

4.2.1 Cálculo do tempo de ciclo da célula

Nessa tabela, há informações gerais como a taxa de chegada dos produtos das linhas, o número de caixas por camada, número de *picks* por camada e o número de camadas por palete. Com esses dados, foi possível calcular as demais informações para chegar ao tempo de ciclo, da seguinte forma:

- **Números de caixas por Palete:** Resultado da multiplicação entre o número de caixas por camada e o número de camadas por palete.
- **Número de *Picks* por Palete:** Resultado da multiplicação entre o número de camadas por palete e o número de *picks* por camada.
- **Tempo de *Slipsheet*:** Para esse tempo foi estipulado um valor de *pick-and-place* de *slipsheet* de 20 segundos para cada um, dessa forma, dividindo esses 40s considerados entre os 25 *picks* por palete, foi possível calcular quanto tempo seria necessário considerar a mais em cada *pick-and-place* de produto para que o tempo de *pick-and-place* do *slipsheet* em cada palete fosse absorvido pelo processo.
- **Soma Cadência Linhas, Soma Caixas por Palete e Soma *Pick* por Palete:** Para calcular o tempo de ciclo total do robô, foi necessário somar as taxas de chegada dos produtos das duas linhas, o número de caixas por palete de cada linha e o número de *picks* por palete de cada linha.
- **Segundos por caixa:** Possuindo a taxa de chegada dos produtos total, o tempo por caixa pôde ser calculado dividindo 60s pelo número total de caixas.
- **Tempo Soma Caixas:** Sabendo o valor de segundos por caixa, o tempo necessário para completar os dois paletes foi calculado multiplicando a célula de Segundos por Caixa pela célula de Soma Caixas por Palete.
- **Tempo Mínimo de *Pick**:** Dividiu-se então o tempo total necessário para fazer todas as caixas pelo número total de caixas, obtendo o tempo de ciclo mínimo sem considerar o *pick-and-place* de um *slipsheet* para cada palete.
- **Tempo Mínimo de *Pick*:** Para calcular o tempo de ciclo mínimo, considerando o tempo do *slipsheet*, foi necessário somar as células de Tempo de *Slipsheet* e dividir o valor da célula de Tempo Mínimo de *Pick** pela soma dos tempos de *slipsheet*.

A Figura 14 mostra a tabela desenvolvida para a obtenção do valor de tempo de ciclo.

Figura 14 - Tabela de tempo de ciclo

Estudo Tempo de Ciclo - Paletização Caixas															
Linha	Produto	Tempo de Ciclo (cx/min)	N° Caixas por Camada	N° Picks por Camada	N° Camadas por Pallet	N° Caixas por Pallet	N° Picks por Pallet	Tempo de Slipsheet	Soma Cadência	Soma Caixas por Pallet	Soma Pick por Pallet	Segundos por Caixa	Tempo Soma	Tempo Mínimo Pick*	Tempo Mínimo Pick
Linha 1	Caixa menor	5	15	5	5	75	25	1,6	9	125	50	6.6666667	833.3333	16.6666667	13.4666667
Linha 2	Caixa Maior	4	10	5	5	50	25	1,6							
Observações:															
Tempo de Pick&Place de Slipsheet				40											

*Sem considerar pick&place de um slipsheet para cada pallet

Fonte: elaborado pela autora.

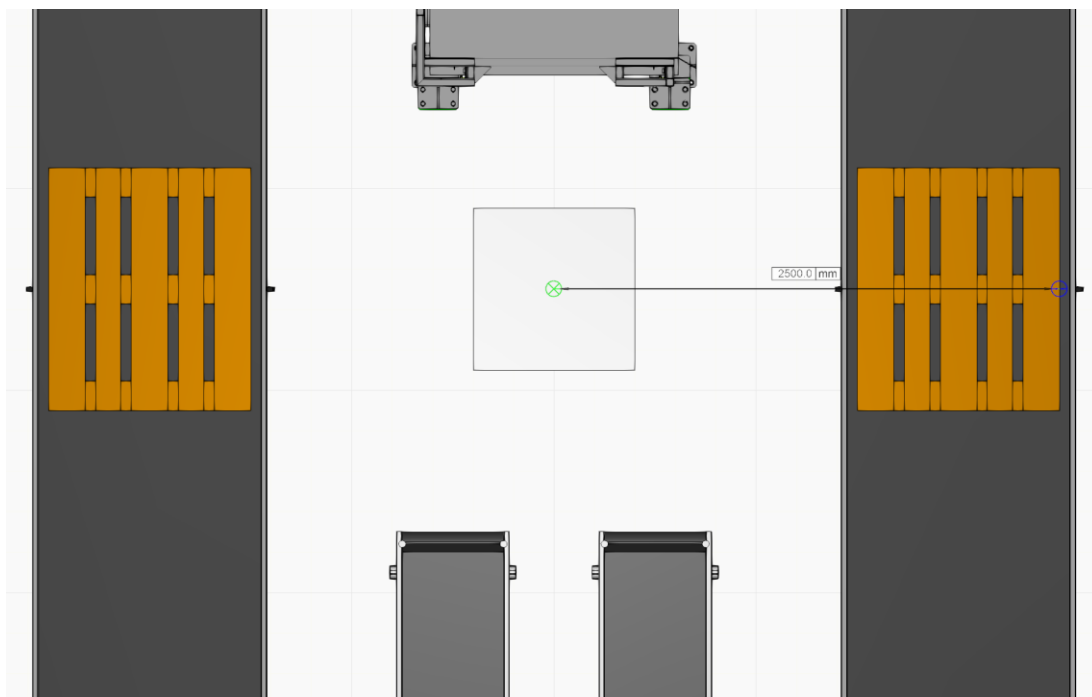
Pode-se observar que a tabela desenvolvida resultou em um tempo de ciclo de 13,47s. Esse é o tempo em que o robô teve para sair do seu ponto de espera (também denominado ponto *Home*), fazer um *pick* no transportador de entrada de caixas, realizar o *place* no palete e voltar ao seu ponto *Home*.

É importante ressaltar que, ao determinar o tempo de ciclo, deve-se levar em consideração as limitações do produto e da ferramenta manipulados pelo robô. No caso analisado, não foi necessário incluir restrições adicionais, mas, em situações em que a ferramenta ou o produto exigem uma movimentação mais lenta ou possuem outras especificações, é fundamental incorporar esses requisitos na análise do tempo de ciclo.

4.2.2 Alcance necessário

Para definir o alcance necessário que o robô deveria possuir foi necessário medir a distância entre o centro do robô e o ponto mais distante que ele precisaria alcançar. A Figura 15 ilustra a medição entre o centro do pedestal do robô e o ponto mais externo do palete.

Figura 15 - Alcance do robô



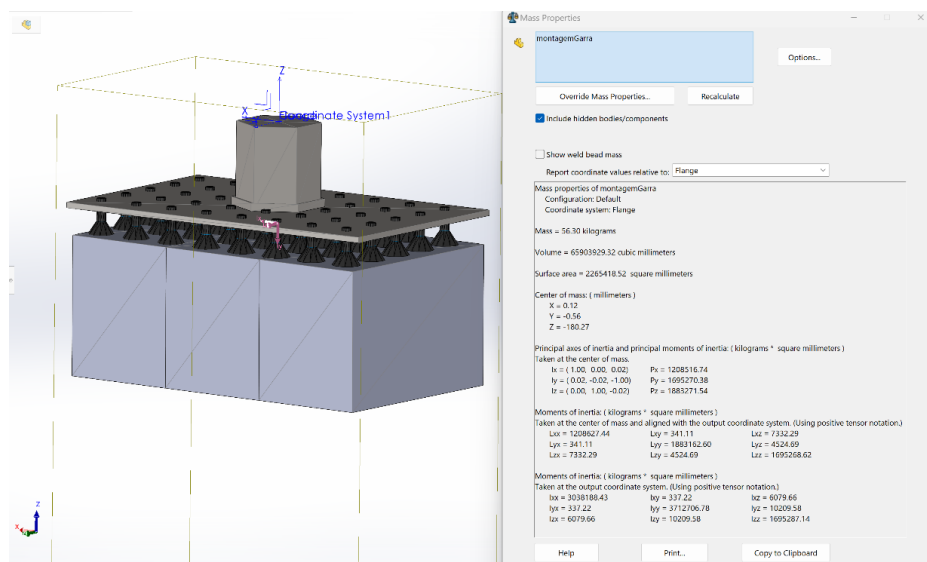
Fonte: elaborado pela autora.

Como é possível observar na Figura 14, a maior distância que o robô precisará atingir é de 2500mm, logo, seu alcance precisa ser de, no mínimo, 2500mm.

4.2.3 Payload necessário

A garra projetada para esta célula foi uma garra de aço inoxidável com ventosas em poliuretano. O projeto foi feito no software *SolidWorks* 2023, onde é possível calcular a massa, o centro de massa e o momento de inércia do conjunto todo. Além disso, a simulação deve sempre utilizar o caso mais crítico para testes, portanto os dados foram obtidos considerando as 3 caixas de 5,2Kg presentes na garra. A Figura 16 apresenta os dados obtidos para a garra projetada.

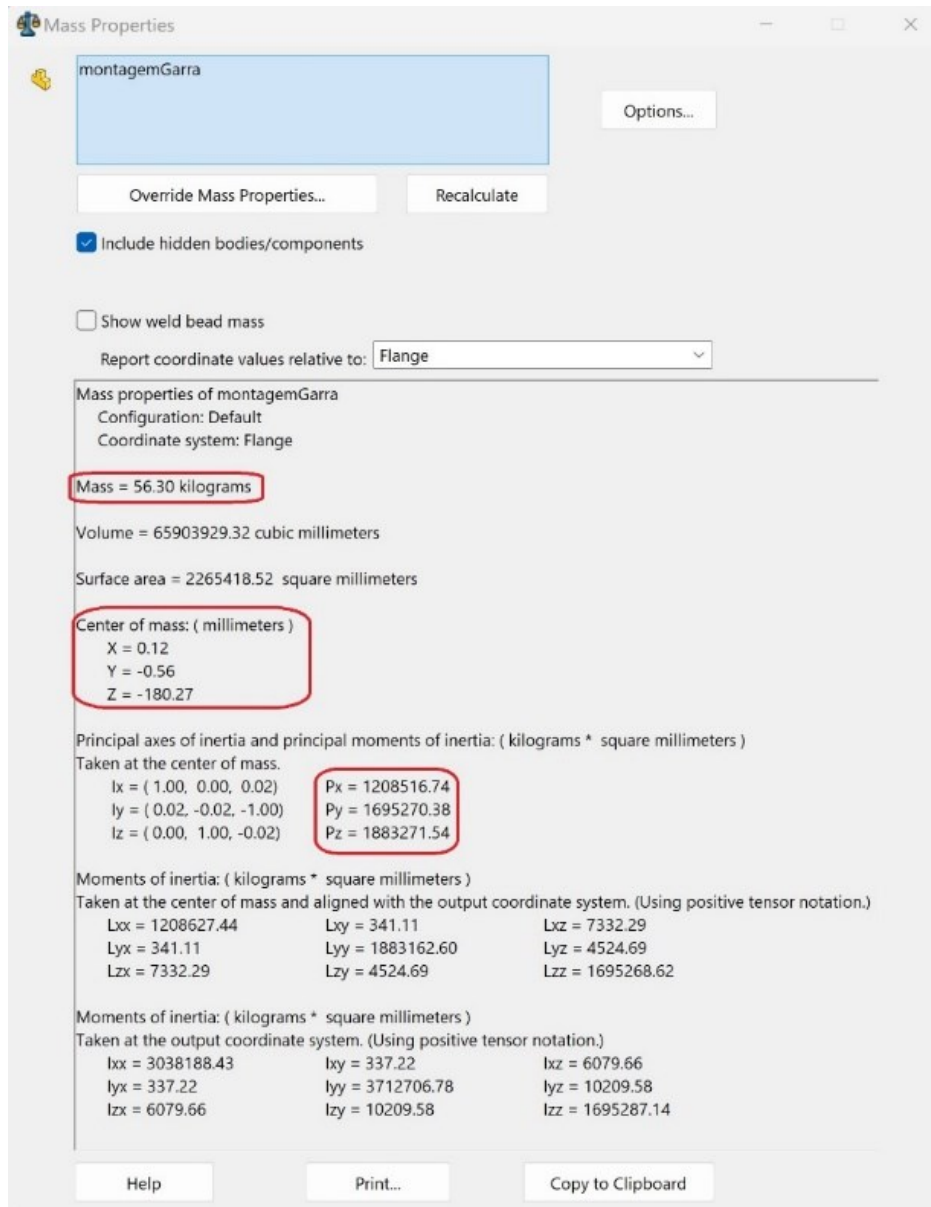
Figura 16 - Dados da garra obtidos através do projeto feito no *SolidWorks*



Fonte: elaborado pela autora.

Na simulação foi necessário configurar o *payload* que o robô utilizaria corretamente, os dados requeridos foram: massa (Kg), centro de massa (mm) e momento de inércia (Kg.m²). Na Figura 17 é possível observar esses dados destacados.

Figura 17 - Dados utilizados para o *payload* do robô



Fonte: elaborado pela autora.

Os dados para o *payload* obtidos através do projeto da garra, já convertidos para as unidades de medida exigidas pelo simulador, foram os seguintes:

- Massa total (Kg): 56,3;
- Centro de massa (mm): X = 0,12, Y = -0,56 e Z = -180,27;
- Momento de Inércia (Kg.m²): X = 1,20851674, Y = 1,69527038 e Z = 1,88327154.

Esses dados foram utilizados na configuração da *Tool* (ou ferramenta) para executar a simulação feita.

4.2.4 Avaliação do tipo de robô necessário para a aplicação

Analisando a célula proposta, em que a movimentação necessária do robô não exigirá movimentos angulados e complexos, julga-se que um robô paletizador pode ser ideal para a aplicação, porém, é necessário avaliar outros aspectos como tempo de ciclo, alcance e custo comparados aos robôs industriais convencionais.

Considerando os requisitos necessários, foram selecionados 3 robôs que tivessem alcance mínimo de 2500mm e *payload* de no mínimo 60Kg para teste em simulação. Os robôs que melhor se encaixaram nesses requisitos foram:

- KR 120 R2700-2 da linha KR QUANTEC: possui *payload* de 120Kg e alcance de 2701mm;
- KR 120 R3200 PA da linha KR QUANTEC PA: possui *payload* de 120Kg e alcance de 3201mm.
- KR 180 R3200-2 PA da linha KR QUANTEC PA: possui *payload* de 180Kg e alcance de 3195mm.

4.3 SIMULAÇÃO NO KUKA.SIM

Para a simulação, foi necessário posicionar todos os componentes da célula, incluindo grades, transportadores, o robô com seu pedestal e a garra projetada. Com a célula montada, foi realizada a programação do robô, a configuração da *Tool* do robô e a configuração dos sinais necessários para a lógica implementada.

4.3.1 Programação

A programação foi desenvolvida de forma que fosse possível informar, através de variáveis, a quantidade de caixas que já estavam posicionadas em cada palete, assim, não seria necessário iniciar a programação sempre com os paletes vazios. Os passos executados pela programação são os seguintes:

- Libera a entrada de paletes vazios e caixas na célula;
- Espera o sinal de que os paletes vazios estão posicionados no lugar correto para iniciar o *pick-and-place* dos *slipsheets* nos paletes vazios;

- Com os *slipsheets* posicionados em cada *palete palete*, o robô entra em um loop, onde permanece em espera na posição *Home* até que o sinal dos sensores dos transportadores indique que as caixas estão agrupadas corretamente para o *pick*;
- Quando o robô recebe o sinal de algum dos dois transportadores, ele checa em qual palete e em qual posição deve realizar o *place* das caixas, baseado nas variáveis que indicam quantas caixas já estão posicionadas no palete, e então realiza o *pick* e o *place* das caixas;
- O processo se repete até que os paletes estejam prontos e, conforme são finalizados, o transportador do palete movimenta-o cheio para fora da célula e um novo palete vazio entra para que o robô reinicie o processo da paletização.

A Figura 18 contém a estrutura da programação feita para essa solução.

Figura 18 - Programação feita para a simulação

```

MAIN My_Job
  OUT 110 " State= TRUE
  OUT 210 " State= TRUE
  WAIT FOR $IN[120]
  WAIT FOR $IN[220]
  CALL SUB SlipsheetCaixaMenor
  CALL SUB SlipsheetCaixaMaior
  WHILE True
    IF (SlipsheetMaior == True && IN[120] == True)
      THEN
        CALL SUB SlipsheetCaixaMaior
        SlipsheetMaior = False
      ELSE
        IF (SlipsheetMenor == True && IN[220] == True)
          THEN
            CALL SUB SlipsheetCaixaMenor
            SlipsheetMenor = False
          ELSE
            IF (IN[100] == True && IN[120] == True)
              THEN
            ELSE
              IF (IN[200] == True && IN[220] == True)
                THEN
              ELSE
                CALL SUB Home
    SUB PickCaixaMaior
    SUB LigaVacuo
    SUB PickCaixaMenor
    SUB DesligaVacuo
    SUB PickSlipsheetMenor
    SUB PlaceSlipCaixaMenor
    SUB PlaceSlipCaixaMaior
    SUB Home
    SUB SlipsheetCaixaMaior
    SUB SlipsheetCaixaMenor
    SUB PickSlipsheetMaior
    SUB AppCaixaMaior
    SUB AppCaixaMenor
  
```




Fonte: elaborado pela autora.

É possível observar as condições (funções *IF*) e o *loop* (função *WHILE*) que o robô utiliza para realizar a paletização de forma otimizada, além dos subprogramas e dos sinais utilizados para controle de sensores, transportadores e do próprio robô.

4.3.2 Tool do robô

O *payload* foi configurado na *Tool* do robô, onde foram inseridos os valores de massa, centro de massa e momento de inércia obtidos através do projeto da garra no software *SolidWorks*. A Figura 19 mostra a configuração realizada de acordo com os dados obtidos.

Figura 19 - Configuração da *Tool* do robô

Name	TOOL_DATA[1]		
Transform			
Node	mountplate  		
InterpolationMode	#NONE 		
Mass	56.300000 kg		
Center of Gravity	X	0.120000	Y -0.560000
	Z	180.270000	
Inertia	A	0.000000	B 0.000000
	C	0.000000	
Inertia	X	1.208517	Y 1.883272
	Z	1.695270	
Calculate Mass Center and Inertia			
Description			

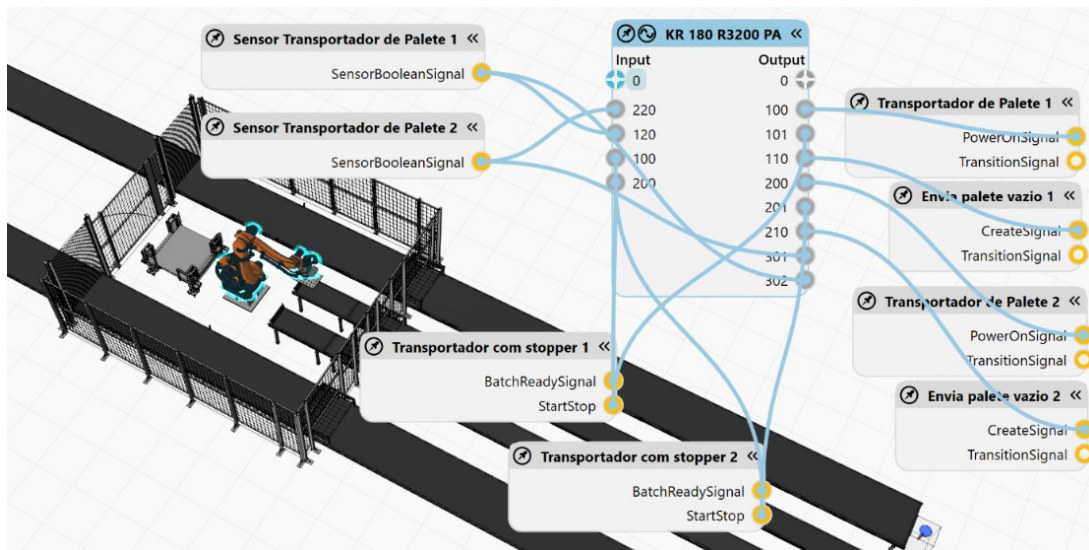
Fonte: elaborado pela autora.

O sistema de coordenadas do momento de inércia do *SolidWorks* é diferente do sistema de coordenadas do KUKA.Sim, por isso, os valores dos momentos de inércia em Y no KUKA.Sim correspondem aos momentos de inércia em Z no *SolidWorks* e momentos de inércia em Z no KUKA.Sim correspondem aos momentos de inércia em Y no *SolidWorks*.

4.3.3 Sinais da simulação

Os sinais de saída (*OUT*) e de entrada (*IN*) precisam ser ligados no robô para que a programação receba e envie os sinais aos componentes, permitindo o controle do robô, transportadores e sensores. Na Figura 20 há uma imagem com a ligação e identificação dos sinais utilizados.

Figura 20 - Sinais utilizados na programação



Fonte: elaborado pela autora.

Os sinais podem ser usados para iniciar ações, controlar movimentos e coordenar operações entre múltiplos dispositivos. No caso da simulação feita, eles estão sendo usados para controlar o movimento dos transportadores de palete, para enviar sinais ao robô indicando que os produtos estão prontos para serem paletizados e para liberação de uma paleta cheio e criação de um novo paleta vazio.

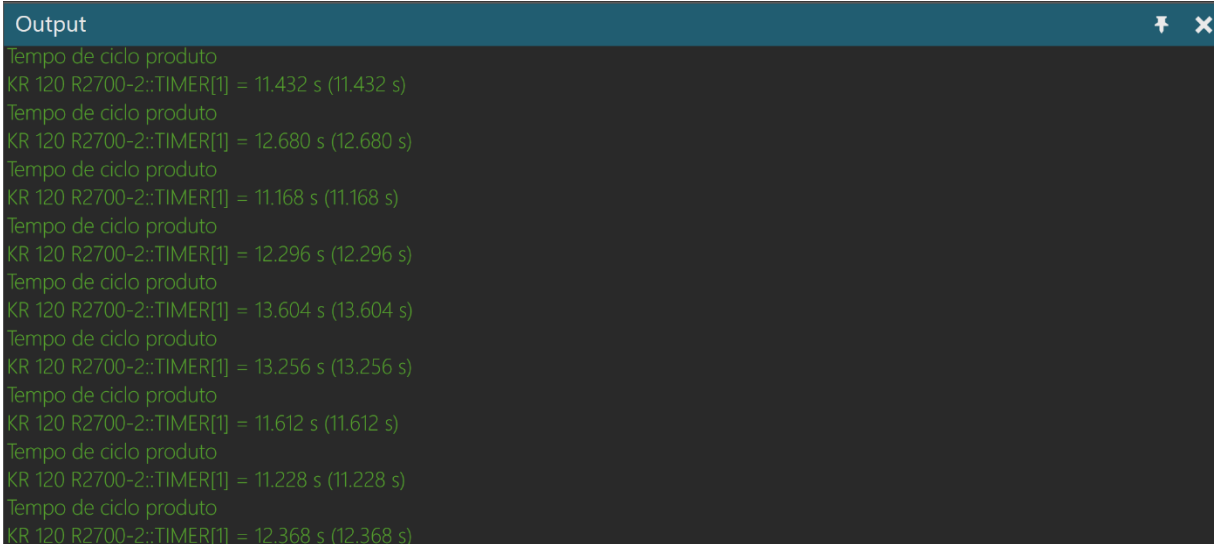
4.3.4 Timer para medir os tempos de ciclo

Para medir o tempo de ciclo corretamente, é essencial iniciar e finalizar a contagem de tempo no mesmo ponto de referência. O ponto selecionado para essa medição foi o ponto *Home*. Assim, a contagem começa quando o robô está nesse ponto. Em seguida, o robô executa todas as rotinas necessárias e retorna ao ponto

Home, onde a contagem do tempo é finalizada. Esse método permite que o tempo de ciclo seja fornecido sempre com o mesmo padrão na saída do simulador.

Para o robô KR 120 R2700-2, as Figuras 21 e 22 mostram parte dos resultados dos tempos de ciclo para produto e *slipsheet*.

Figura 21 - Tempo de ciclo para produto KR 120 R2700-2



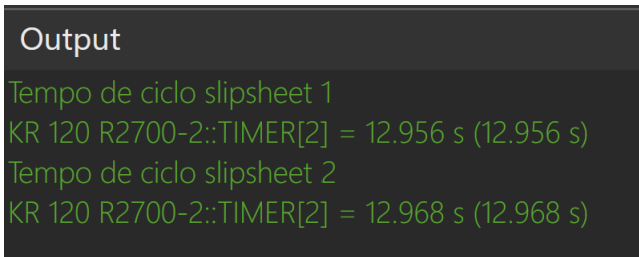
```

Output
Tempo de ciclo produto
KR 120 R2700-2::TIMER[1] = 11.432 s (11.432 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R2700-2::TIMER[1] = 12.680 s (12.680 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R2700-2::TIMER[1] = 11.168 s (11.168 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R2700-2::TIMER[1] = 12.296 s (12.296 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R2700-2::TIMER[1] = 13.604 s (13.604 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R2700-2::TIMER[1] = 13.256 s (13.256 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R2700-2::TIMER[1] = 11.612 s (11.612 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R2700-2::TIMER[1] = 11.228 s (11.228 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R2700-2::TIMER[1] = 12.368 s (12.368 s)

```

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 22 - Tempo de ciclo para *slipsheet* KR 120 R2700-2



```

Output
Tempo de ciclo slipsheet 1
KR 120 R2700-2::TIMER[2] = 12.956 s (12.956 s)
Tempo de ciclo slipsheet 2
KR 120 R2700-2::TIMER[2] = 12.968 s (12.968 s)

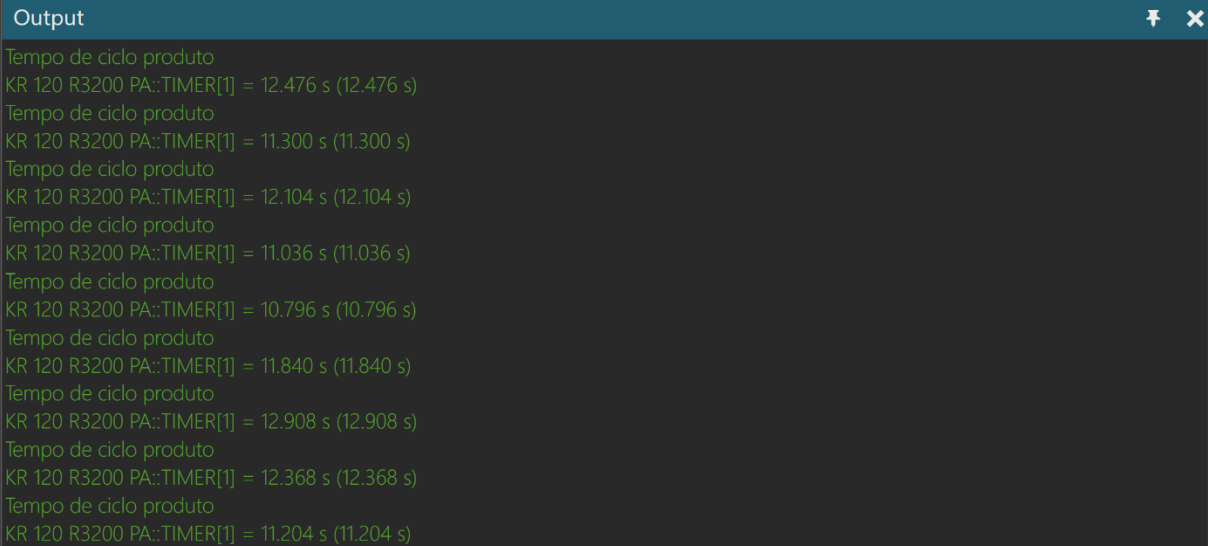
```

Fonte: elaborado pela autora.

A média de tempo de ciclo para esse robô foi de aproximadamente 12,2s. Os tempos de ciclo para *pick-and-place* dos *slipsheets* foram de 13,0s aproximadamente.

O robô KR 120 R3200 PA teve os tempos de ciclo conforme mostrados nas Figuras 23 e 24.

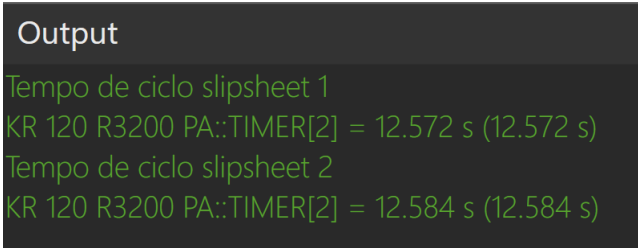
Figura 23 - Tempo de ciclo para produto KR 120 R3200 PA



```
Output
Tempo de ciclo produto
KR 120 R3200 PA::TIMER[1] = 12.476 s (12.476 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R3200 PA::TIMER[1] = 11.300 s (11.300 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R3200 PA::TIMER[1] = 12.104 s (12.104 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R3200 PA::TIMER[1] = 11.036 s (11.036 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R3200 PA::TIMER[1] = 10.796 s (10.796 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R3200 PA::TIMER[1] = 11.840 s (11.840 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R3200 PA::TIMER[1] = 12.908 s (12.908 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R3200 PA::TIMER[1] = 12.368 s (12.368 s)
Tempo de ciclo produto
KR 120 R3200 PA::TIMER[1] = 11.204 s (11.204 s)
```

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 24 - Tempo de ciclo para slipsheet KR 120 R3200 PA



```
Output
Tempo de ciclo slipsheet 1
KR 120 R3200 PA::TIMER[2] = 12.572 s (12.572 s)
Tempo de ciclo slipsheet 2
KR 120 R3200 PA::TIMER[2] = 12.584 s (12.584 s)
```

Fonte: elaborado pela autora.

A média de tempo de ciclo para esse robô foi de 11,8s aproximadamente. Os tempos de ciclo para *pick-and-place* dos *slipsheets* foram de 12,6s aproximadamente.

Por fim, para o robô KR 180 R3200-2 PA, alguns dos tempos de ciclo obtidos foram apresentados nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 - Tempo de ciclo para produto KR 180 R3200 PA

```

Output
Tempo de ciclo produto
KR 180 R3200 PA::TIMER[1] = 12.224 s (12.224 s)
Tempo de ciclo produto
KR 180 R3200 PA::TIMER[1] = 11.372 s (11.372 s)
Tempo de ciclo produto
KR 180 R3200 PA::TIMER[1] = 12.452 s (12.452 s)
Tempo de ciclo produto
KR 180 R3200 PA::TIMER[1] = 11.096 s (11.096 s)
Tempo de ciclo produto
KR 180 R3200 PA::TIMER[1] = 12.020 s (12.020 s)
Tempo de ciclo produto
KR 180 R3200 PA::TIMER[1] = 13.388 s (13.388 s)
Tempo de ciclo produto
KR 180 R3200 PA::TIMER[1] = 12.920 s (12.920 s)

```

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 26 - Tempo de ciclo para *slipsheet* KR 180 R3200 PA

```

Output
Tempo de ciclo Slipsheet 1
KR 180 R3200 PA::TIMER[2] = 13.052 s (13.052 s)
Tempo de ciclo Slipsheet 2
KR 180 R3200 PA::TIMER[2] = 13.076 s (13.076 s)

```

Fonte: elaborado pela autora.

A média de tempo de ciclo para esse robô foi de 12,1s aproximadamente. Os tempos de ciclo para *pick-and-place* dos *slipsheets* foram de 13,1s aproximadamente.

4.4 SIMULAÇÃO KUKA LOAD

Para análise na ferramenta KUKA Load, foi necessário informar os robôs que estavam sendo analisados e inserir os dados de *payload* (massa, centro de massa e momento de inércia) conforme a orientação dos eixos especificada na

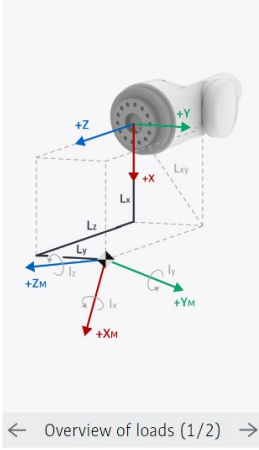
ferramenta. É possível observar o ambiente do KUKA *Load*, já com os dados do *payload* inseridos, na Figura 21.

Figura 27 - Configuração do KUKA *Load*

Load data ^

Enter all the known load data. This increases the accuracy of the analysis result.

FLANGE **SUPPLEMENTARY LOADS**



← Overview of loads (1/2) →

Payload 📄 🗑️

Mass	Center of mass			Inertia		
56,3 kg	Lx	0,12 mm	Ix	1,20852 kgm ²	ly	1,88327 kgm ²
	Ly	-0,56 mm	Iz	1,69527 kgm ²		
	Lz	180,27 mm				

+ Payload

Overview of loads

Mass	Center of mass [mm]			Inertia [kgm ²]		
Flange	Lx:	Ly:	Lz:	Ix:	Iy:	Iz:
56,3 kg	0,12	-0,56	180,27	1,21	1,88	1,7

Analyze

Fonte: elaborado pela autora.

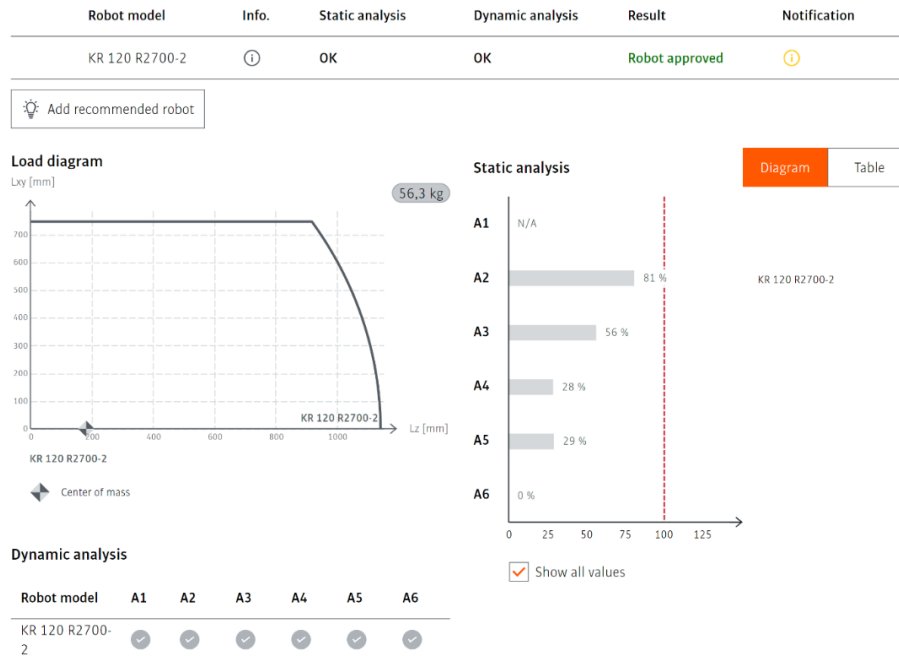
Como é possível observar, os dados inseridos nessa ferramenta são os mesmos dados inseridos na configuração da *Tool* do robô, o KUKA *Load* servirá como uma validação extra para o *payload*, além da simulação.

A ferramenta foi utilizada para os três robôs e as análises obtidas para o KR 120 R2700-2, KR 120 R3200 PA e KR 180 R3200 PA foram apresentadas nas Figuras 28, 29 e 30, respectivamente.

Figura 28 - Análise KUKA Load para o robô KR 120 R2700-2

Load data analysis

The specified load data result in the following analysis of the selected robots.

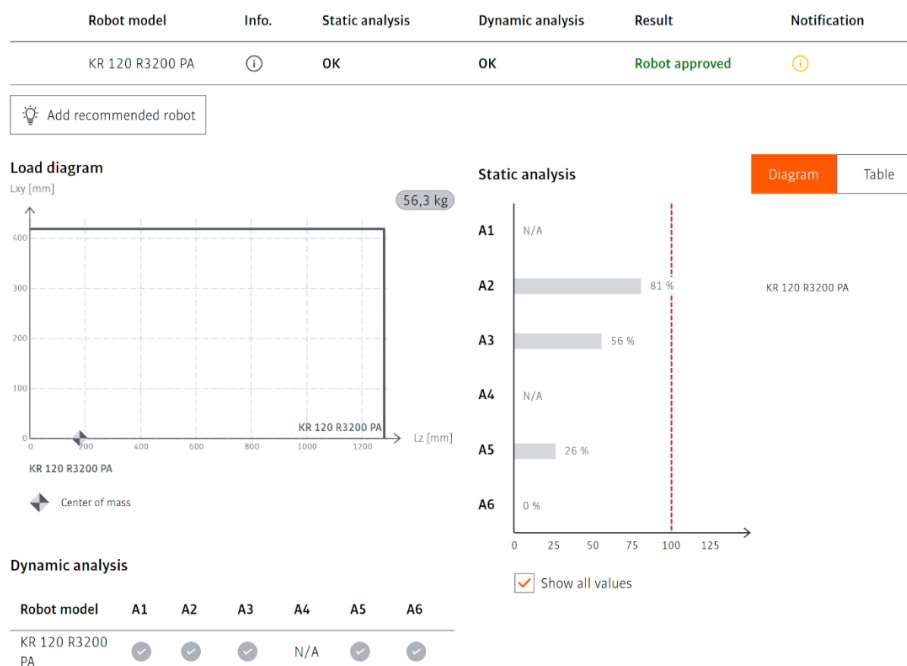


Fonte: elaborado pela autora.

Figura 29 - Análise KUKA Load para o robô KR 120 R3200 PA

Load data analysis

The specified load data result in the following analysis of the selected robots.

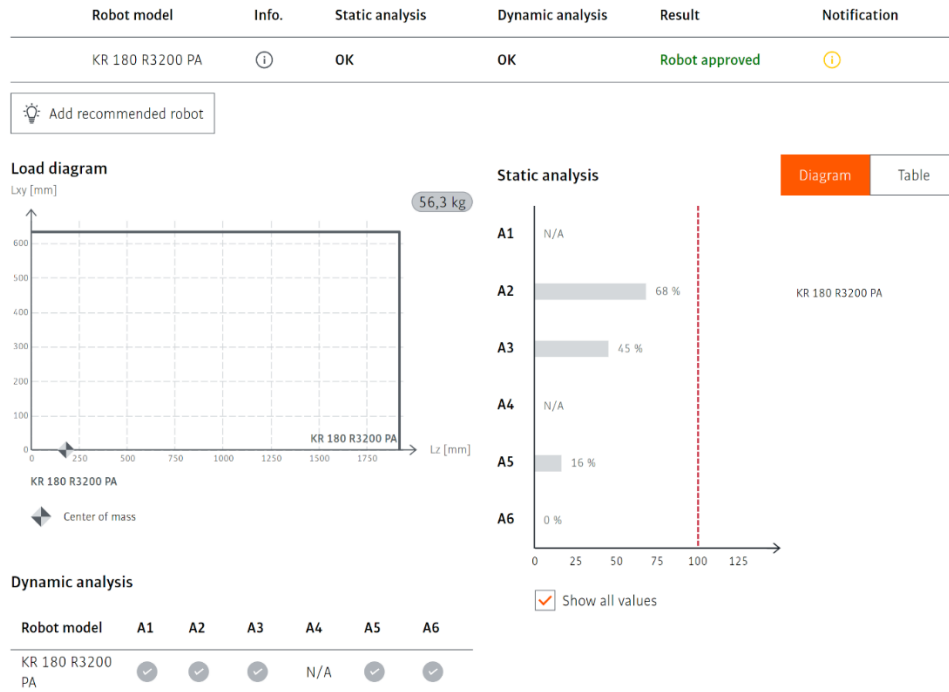


Fonte: elaborado pela autora.

Figura 30 - Análise KUKA Load para o robô KR 180 R3200-2 PA

Load data analysis

The specified load data result in the following analysis of the selected robots.



Fonte: elaborado pela autora.

Como é possível observar, o KUKA Load fornece uma análise individual para cada junta dos robôs, além de um diagrama de carga considerando a inércia e um resultado informando se o robô está aprovado ou não para a carga informada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir das simulações realizadas, seguidos de uma discussão detalhada sobre suas implicações.

5.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

As simulações realizadas com os robôs selecionados forneceram *insights* valiosos sobre o desempenho de cada modelo em uma célula de paletização industrial. Os resultados demonstraram variações significativas nos tempos de ciclo, capacidades de carga, e alcances operacionais entre os diferentes modelos.

5.1.1 Resultados do tempo de ciclo

Os resultados foram organizados em uma tabela que destaca a média dos tempos de ciclo obtidos para cada atividade. Os resultados dos tempos de ciclo para cada robô foram apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado dos tempos de ciclo

Modelo do robô	Média do tempo de ciclo para produto (s)	Variância (s ²)	Média do tempo de ciclo para slipsheet (s)	Variância (s ²)
KR 120 R2700-2	12,2	0,4	13,0	0,1
KR 120 R3200 PA	11,8	0,5	12,6	0,2
KR 180 R3200 PA	12,1	0,4	13,1	0,1

Fonte: elaborado pela autora.

Os dados indicam que o robô KR 120 R3200 PA apresentou o menor tempo de ciclo médio tanto para a manipulação de produtos quanto de slipsheets, com tempos de 11,8s e 12,6s, respectivamente. Esse desempenho superior pode ser atribuído à combinação de sua capacidade de carga e alcance, que permite uma operação mais ágil e eficiente.

O KR 120 R2700-2, por outro lado, apresentou um tempo de ciclo médio ligeiramente maior, de 12,2 segundos para produtos e 13,0s para slipsheets. Já o KR 180 R3200 PA teve tempos de ciclo de 12,1s e 13,1s, respectivamente, mostrando-se eficiente, mas não tão rápido quanto o KR 120 R3200 PA.

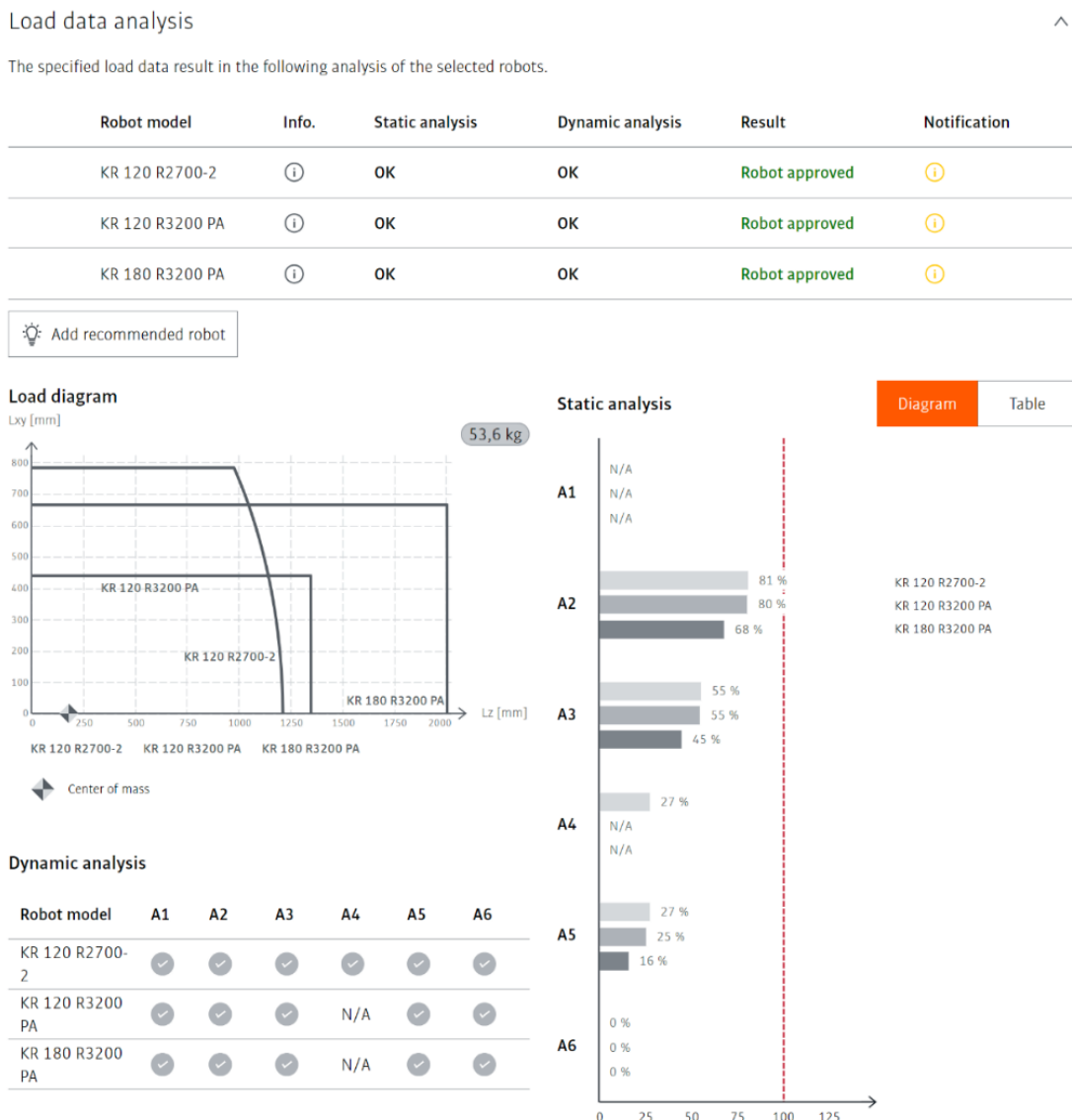
Robôs paletizadores são desenvolvidos com o intuito de entregarem resultados de tempo de ciclo para paletizações menores do que robôs convencionais. Isso pode ser facilmente observado nos resultados das simulações para cada robô, onde o modelo KR 120 R2700-2, que é um robô convencional e possui seis eixos, foi o modelo com o maior tempo de ciclo registrado, comparado ao robô mais rápido da lista, o KR 120 R3200 PA, que é um robô paletizador e possui apenas 4 eixos, tornando-o mais ágil para essa aplicação.

5.1.2 Resultados do *payload*

Durante a simulação no KUKA.Sim, não foram identificados problemas relacionados ao *payload*. A análise realizada no KUKA *Load* confirmou que todos os robôs estavam aptos para essa aplicação. Isso é coerente, uma vez que o *payload* necessário é cerca de metade do *payload* máximo suportado por cada robô. O alcance superior a 2500 mm resultou na seleção de robôs com capacidade mínima de 120 kg, pois esses eram os únicos modelos disponíveis com o alcance requerido para a aplicação.

O KUKA *Load* fornece a análise comparando os três modelos. A Figura 31 mostra a comparação entre os modelos selecionados.

Figura 31 - Comparação do *payload* entre os três modelos de robôs selecionados



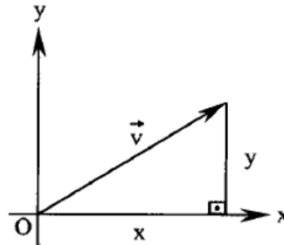
Fonte: elaborado pela autora.

Um cuidado que deve ser tomado é em relação aos valores do centro de massa de X e Y, pois a hipotenusa destes não podem exceder o valor de 129mm, por exemplo, caso o valor do centro de massa em X seja de 100mm e o de Y 50mm, a hipotenusa deles, não poderá exceder 129mm. Essa observação é válida para esses dados de garra, em caso de mudança, uma nova análise deverá ser feita.

O diagrama de carga é feito conforme o centro de massa, o eixo Lz é referente ao valor do centro de massa em Z e o eixo Lxy fornece o módulo entre os vetores do centro de massa nos eixos X e Y. A norma ou módulo de um vetor é um número real que representa o comprimento desse vetor, dessa forma, calcular a norma de um vetor é o mesmo que calcular a distância entre o ponto (a,b) e a origem (0,0). A Figura 32

contém um vetor de exemplo para que a equação do cálculo do módulo seja exemplificada.

Figura 32 - Exemplo para cálculo de módulo



Fonte: Souza (2016).

Segundo Souza (2016), o módulo de $|\vec{v}|$ é dado pela Equação 2, portanto, o valor de L_{xy} é calculado utilizando a Equação 2.

$$|\vec{v}| = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

Como pode ser observado na Figura 31, todos os robôs foram aprovados para os dados de *payload* inseridos. O modelo KR 180 R3200 PA destaca-se por sua capacidade de *payload* superior em comparação com os outros dois modelos analisados, resultando em um desempenho melhor no manuseio de cargas. Este robô também suporta uma faixa de centro de massa maior, o que reflete em uma menor porcentagem de utilização de cada junta na análise estática, indicando uma maior eficiência e durabilidade nas operações.

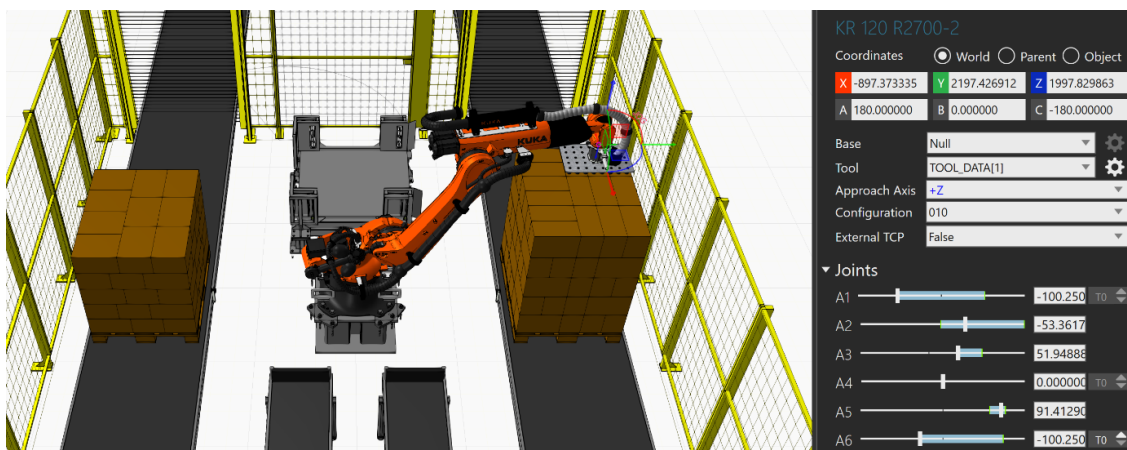
Os modelos KR 120 R2700-2 e KR 120 R3200 PA possuem a mesma capacidade de *payload* e seus diagramas de carga são bastante semelhantes. No entanto, o KR 120 R3200 PA apresenta uma ligeira vantagem no suporte de valores de centro de massa no eixo Z, enquanto o KR 120 R2700-2 suporta valores maiores nos eixos XY. A porcentagem de utilização de cada junta na análise estática é praticamente igual para ambos os modelos, com exceção do eixo A4, que está ausente no modelo paletizador KR 120 R3200 PA.

5.1.3 Resultados do alcance

Para validar o alcance na simulação, é essencial acessar os pontos mais críticos em relação à distância entre o ponto e o robô, e analisar a posição em que o robô se encontra, garantindo que nenhuma das juntas esteja no seu limite. As posições mais críticas analisadas foram os primeiros pontos de colocação das camadas mais altas dos paletes da Linha 1, que representam os locais mais distantes que o robô precisa alcançar.

No caso do robô KR 120 R2700-2, que possui o menor alcance entre os três modelos selecionados, a Figura 33 mostra que nenhuma junta estava próxima dos seus limites. No entanto, o robô ficou próximo de uma posição quase completamente estendida, indicando que ele está perto do seu limite de alcance.

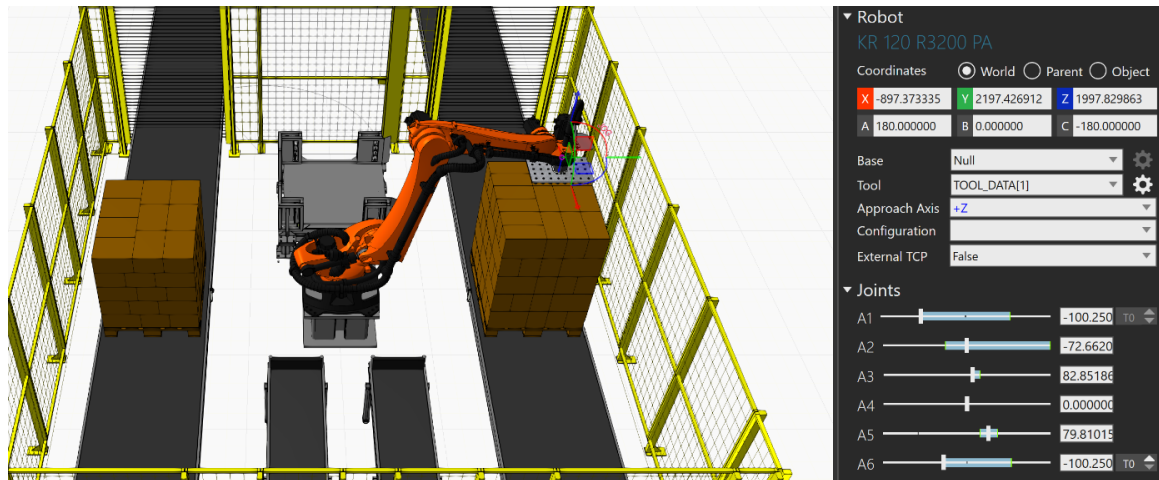
Figura 33 - Resultado do alcance do KR 120 R2700-2 para o palete da Linha 1



Fonte: elaborado pela autora.

Já para os casos dos modelos KR 120 R3200 PA e KR 180 R3200 PA, que possuem o mesmo alcance, os resultados obtidos foram semelhantes. Na Figura 34, a posição mais crítica e os valores de juntas do KR 120 R3200 PA foram apresentados.

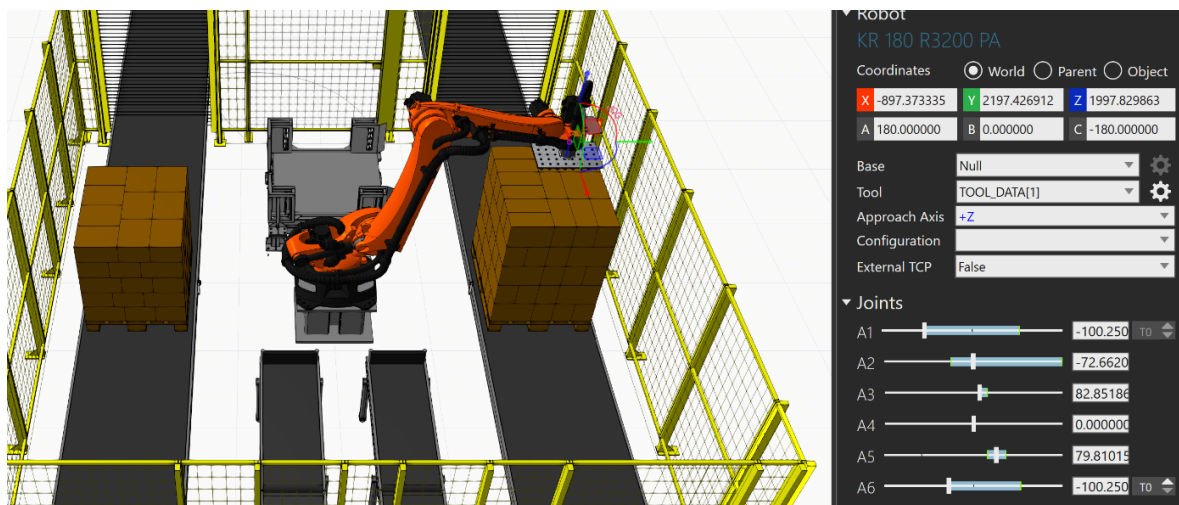
Figura 34 - Resultado do alcance do KR 120 R3200 PA para o palete da Linha 1



Fonte: elaborado pela autora.

O robô KR 180 R3200 PA teve os resultados de alcance conforme apresentado na Figuras 35. O padrão de avaliação do alcance para esse robô foi o mesmo utilizado nos dois modelos anteriores.

Figura 35 - Resultado do alcance do KR 180 R3200 PA para o palete da Linha 1



Fonte: elaborado pela autora.

Devido às características semelhantes dos robôs analisados, a principal diferença entre eles está na capacidade de carga. A avaliação do alcance para esses dois modelos foi conduzida de forma idêntica, sendo possível observar que os valores das juntas são os mesmos em ambos os robôs. Em situações críticas, apenas o modelo KR 120 R2700-2 apresentou sinais de estar completamente estendido, porém os valores das juntas não se aproximaram dos limites operacionais.

5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, foram discutidos os resultados obtidos a partir das simulações e análises realizadas com os robôs selecionados, KR 120 R2700-2, KR 120 R3200 PA e KR 180 R3200 PA. A partir dessas análises, buscou-se não apenas identificar o melhor robô para uma aplicação específica, mas também estabelecer um processo sistemático e replicável para a seleção de robôs em diversas situações industriais.

5.2.1 Interpretação dos Resultados

A análise dos resultados das simulações e avaliações dos três modelos de robôs paletizadores — KR 120 R2700-2, KR 120 R3200 PA, e KR 180 R3200 PA — demonstra que o KR 120 R3200 PA é a escolha mais adequada para a aplicação em questão.

Os resultados da simulação de tempo de ciclo mostram que o KR 120 R3200 PA apresenta uma média de tempo de ciclo para *pick-and-place* de produto de 11,8s e para *slipsheet* de 12,6s. Esses valores são ligeiramente melhores que os dos outros modelos, indicando que este robô pode realizar operações de paletização de forma mais rápida e eficiente.

Embora o KR 180 R3200 PA tenha uma maior capacidade de *payload*, a necessidade específica desta aplicação não exige a capacidade máxima oferecida por este modelo. O KR 120 R3200 PA, com uma capacidade de 120Kg, é mais do que suficiente para a tarefa, garantindo uma margem de segurança confortável.

A análise do alcance mostrou que o KR 120 R3200 PA não apresenta problemas operacionais nas posições críticas. Ambos os modelos KR 120 R2700-2 e KR 120 R3200 PA possuem capacidades de *payload* semelhantes, mas o KR 120 R3200 PA oferece vantagens adicionais em termos de suporte a valores de inércia no eixo Z, tornando-o mais robusto para certas operações.

5.2.2 Limitações do Estudo

Apesar dos esforços para realizar uma análise econômica detalhada dos robôs paletizadores da KUKA, não foi possível obter os valores de aquisição de cada modelo estudado. Essa limitação impediu a inclusão de uma comparação de custos,

que é um componente essencial para uma análise completa e precisa da viabilidade econômica dos robôs. A ausência desses dados restringiu a avaliação exclusivamente aos aspectos técnicos.

Portanto, embora os resultados técnicos indiquem que o KR 120 R3200 PA é o robô mais adequado para a aplicação em questão, a falta de dados econômicos significa que não se pôde considerar a relação custo-benefício na escolha final do robô.

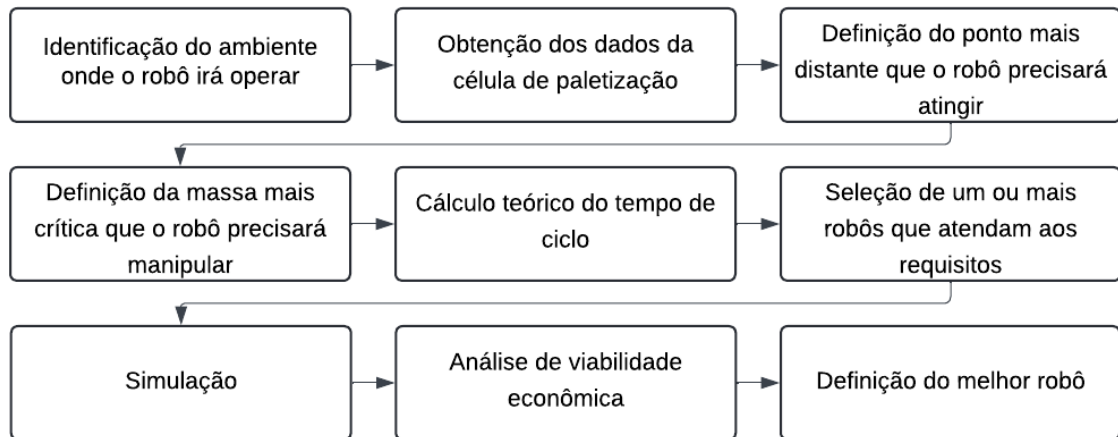
5.2.3 Procedimento de escolha de robôs

Considerando os resultados obtidos, estabeleceu-se um procedimento padrão para a escolha de robôs para realização de paletizações:

1. Identificação do ambiente onde o robô irá operar com o intuito de selecionar o tipo de robô correto;
2. Obtenção dos dados da célula de paletização: taxa de chegada dos produtos da linha, dados dos produtos (dimensões e massa), dados dos paletes, posicionamento e limitações dos componentes na célula;
3. Definição do ponto mais distante que o robô precisará atingir para definir o alcance;
4. Definição da massa mais crítica que o robô precisará manipular (incluindo produto e garra);
5. Cálculo teórico do tempo de ciclo baseado nos dados da célula;
6. Seleção de um ou mais robôs que atendam aos requisitos estabelecidos de acordo com a célula;
7. Simulação utilizando os robôs selecionados para validação dos parâmetros;
8. Análise de viabilidade econômica;
9. Definição do melhor robô entre os selecionados para a aplicação.

A Figura 36 mostra um resumo do procedimento proposto com a ordem de cada etapa.

Figura 36 - Procedimento padronizado para seleção de robôs



Fonte: elaborado pela autora.

6. CONCLUSÕES

Diante da crescente adoção da automação industrial e da importância estratégica da escolha adequada de robôs para otimizar os processos de paletização, este trabalho buscou desenvolver um procedimento robusto e eficaz para a seleção de robôs KUKA.

O procedimento proposto foi delineado com base em uma revisão abrangente da literatura e na análise de critérios de desempenho essenciais, como tempo de ciclo, alcance e *payload*. A simulação virtual desempenhou um papel fundamental na validação teórica e na comparação prática de diferentes modelos de robôs, permitindo uma análise detalhada e precisa dos resultados.

Os objetivos estabelecidos foram atingidos, fornecendo diretrizes claras e fundamentadas para a seleção de robôs em ambientes industriais de paletização. O procedimento desenvolvido pode ser adaptado e aplicado em diversas situações de produção, contribuindo para melhorar a eficiência e a competitividade das operações.

No entanto, é importante destacar que este trabalho teve algumas limitações, como a ausência de análise econômica detalhada dos custos de aquisição e operação dos robôs. Portanto, recomenda-se que futuras pesquisas abordem essa lacuna para fornecer uma análise mais abrangente da viabilidade financeira da automação robótica em diferentes contextos industriais.

Em suma, este estudo oferece base e orientações práticas para profissionais da indústria que buscam selecionar os robôs mais adequados para suas necessidades de paletização, contribuindo assim para a eficiência e a competitividade do setor.

6.1 POSSÍVEIS MELHORIAS

Embora este trabalho tenha atingido seus objetivos de desenvolver um procedimento robusto para a seleção de robôs KUKA em processos de paletização industrial, existem áreas que poderiam ser aprimoradas em futuras pesquisas para oferecer uma análise ainda mais abrangente e prática.

Uma das principais limitações deste estudo foi a ausência de uma análise econômica detalhada. O custo de aquisição, manutenção e operação dos robôs é um fator crucial para a viabilidade financeira da automação. Futuras pesquisas poderiam

incluir uma análise de custo-benefício detalhada, comparando não apenas o investimento inicial, mas também os custos operacionais ao longo do ciclo de vida dos robôs. Isso permitiria uma visão mais completa da relação custo-eficiência, ajudando as empresas a tomarem decisões mais informadas.

Outra melhoria significativa seria a inclusão do consumo de energia como um critério de avaliação. O consumo energético de um robô impacta diretamente nos custos operacionais e na sustentabilidade ambiental das operações industriais. Realizar uma pesquisa detalhada sobre o consumo de energia de diferentes modelos de robôs e incorporar esse parâmetro no procedimento de seleção contribuiria para uma análise mais abrangente e sustentável.

Implementar essas melhorias contribuirá para tornar o procedimento de seleção de robôs mais abrangente, eficiente e sustentável, atendendo às necessidades operacionais e econômicas das indústrias modernas.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, André Gargioni. **Simulação digital**: aplicações e vantagens para a indústria 4.0. aplicações e vantagens para a indústria 4.0. 2022. Disponível em: <https://certi.org.br/blog/simulacao-digital-aplicacoes-e-vantagens-para-a-industria/>. Acesso em: 31 mar. 2024.
- ANDREWS, Gerard. **O que é simulação de robótica?** 2023. Elaborada por Nvidia. Disponível em: <https://blog.nvidia.com.br/2023/07/20/o-que-e-simulacao-de-robotica/>. Acesso em: 21 mar. 2024.
- BASTOS FILHO, Teodiano Freire. **Aplicação dos robôs nas indústrias**. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Teodiano-Freire/publication/266069182_Aplicacao_de_Robos_nas_Industrias/links/55f7439f08aeba1d9ef613ad/Aplicacao-de-Robos-nas-Industrias.pdf. Acesso em: 23 mar. 2024.
- BIANCHI, Reinaldo. **Robótica**. São Bernardo do Campo: Centro Universitário Fei, 2016a. 122 slides, color. Disponível em: https://fei.edu.br/~rbianchi/Robotica/ROBOTICA-01-B-Aplicacoes_e_Definicoes.pdf. Acesso em: 21 mar. 2024.
- BIANCHI, Reinaldo. **Robótica**. São Bernardo do Campo: Centro Universitário Fei, 2016b. 90 slides, color. Disponível em: https://fei.edu.br/~rbianchi/Robotica/ROBOTICA-06-A-Estatica_e_Dinamica.pdf. Acesso em: 03 jun. 2024.
- BIBLIOTECA PROF. PAULO DE CARVALHO MATTOS (Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas – Unesp (org.). **Tipos de revisão de literatura**. 2015. Disponível em: <https://www.fca.unesp.br/Home/Biblioteca/tipos-de-evisao-de-literatura.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2024.
- BORVULTEX. **Efeito da vibração em equipamentos industriais**: impactos e mitigação. Impactos e Mitigação. 2024. Disponível em: <https://borvultex.com.br/vibracao-equipamentos-industriais/>. Acesso em: 03 jun. 2024.
- BRANSKI, Regina Meyer et al. Metodologia de estudo de casos aplicada à logística. In: XXIV ANPET CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE, 14., 2010, [Salvador]. Metodologia de estudo de casos aplicada à logística **Anais....** [Salvador]: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2010. P. 2023-10. Disponível em: <https://lalt.fec.unicamp.br/scriba/files/escrita%20portugues/ANPET%20-%20METODOLOGIA%20DE%20ESTUDO%20DE%20CASO%20-%20COM%20AUTORIA%20-%20VF%2023-10.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2024.
- BRUYNE, Paul de *et al.* **Dinâmica da pesquisa em ciências sociais: os polos da prática metodológica**. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1977.
- CARRARA, Valdemir. **Introdução à robótica industrial**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Inpe, 2015. 101 p. Disponível em:

<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/08.25.14.16/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2024.

CRAVO, Edilson. **Robôs industriais: como funcionam e quais os principais tipos?**. Como funcionam e quais os principais tipos? Elaborada por Kalatec. Disponível em: <https://blog.kalatec.com.br/robos-industriais/#:~:text=Aplica%C3%A7%C3%B5es%20dos%20rob%C3%B4s%20industriais,inspe%C3%A7%C3%A3o%20de%20produtos%20e%20deslocamento>. Acesso em: 23 mar. 2024.

DASSAULT SYSTÈMES. **Ajuda do SolidWorks: propriedades de massa e de seção**. Propriedades de massa e de seção. 2024. Disponível em: https://help.solidworks.com/2023/portuguese-brazilian/SolidWorks/sldworks/c_Mass_and_Section_Properties_Overview.htm?verRdirect=1. Acesso em: 31 maio 2024.

FACHIN, Odília. **Fundamentos de metodologia**. 6. Ed. São Paulo: Saraiva, 2001.

FANUC. **M-3iA/6^a**. Disponível em: <https://www.fanuc.eu/pt/rob%C3%B4s/p%C3%A1gina-filtro-rob%C3%B4s/delta-robots/s%C3%A9rie-m3/m-3ia-6a>. Acesso em: 23 mar. 2024.

GUIALAT. **Paletizador com Robô Cartesiano**. Disponível em: https://www.guialat.com.br/?p=detalhar_produto&idproduto=12719. Acesso em: 23 mar. 2024.

HADAD, Murielle. **Simulação robotizada e detecção de colisões**. Publicado por SNEF Brasil. Disponível em: <https://www.snef.com.br/robotica/simulacao-robotizada-e-deteccao-de-colisoas/>. Acesso em: 26 mar. 2024.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTS (Frankfurt). **2021 World Robotics Report: “robot sales rise again” - #worldrobotics**. “Robot Sales Rise Again” - #WorldRobotics. 2021. Disponível em: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-sales-rise-again>. Acesso em: 20 mar. 2024.

KAWASAKI ROBOTS. **Robot automation FAQs: how do i choose the right robot arm for my application?**. How do I choose the right robot arm for my application?. 2024. Disponível em: <https://kawasakirobotics.com/eu-africa/robot-automation-faqs/#:~:text=Reach%20is%20how%20far%20your,movement%20to%20the%20robot%20arm..> Acesso em: 21 maio 2024.

KOLLMORGEN. **Como os servomotores funcionam**. 2020. Disponível em: <https://www.kollmorgen.com/pt-br/blogs/como-os-servomotores-funcionam>. Acesso em: 03 jun. 2024.

KUKA Robotics Corporatio'n. **KUKA.Sim [KUKA.Sim].[2024]** Disponível em: <https://www.kuka.com/pt-br/produtos-servi%C3%A7os/sistemas-de-rob%C3%B4/software/planejamento-proje%C3%A7%C3%A3o-service-seguran%C3%A7a/kuka,-d-,sim>. Acesso em: 31 mar. 2024.

KUKA Robotics Corporation. **A história da KUKA** [História da KUKA]. [2024] Disponível em: <https://www.kuka.com/pt-br/empresa/sobre-a-kuka/hist%c3%b3ria>. Acesso em: 27 mar. 2024.

KUKA Robotics Corporation. **KR 700 PA** [KR 700 PA]. [2024] Disponível em: <https://www.kuka.com/pt-br/produtos-servi%C3%A7os/sistemas-de-rob%C3%B4s-industriais/kr-700-pa>. Acesso em: 18 mai. 2024.

KUKA Robotics Corporation. **Robôs industriais da KUKA** [Robôs Industriais da KUKA]. Disponível em: <https://www.kuka.com/pt-br/produtos-servi%C3%A7os/sistemas-de-rob%C3%B4s-industriais>. Acesso em: 31 mar. 2024.

KUKA Robotics Corporation. **Sobre a KUKA** [Sobre a KUKA]. [2024] Disponível em: <https://www.kuka.com/pt-br/empresa/sobre-a-kuka>. Acesso em: 27 mar. 2024.

KUKA Robotics Corporation. **KUKA Load** [KUKA Load]. [2024] Disponível em: <https://www.kuka.com/pt-br/produtos-servi%C3%A7os/sistemas-de-rob%C3%B4s/software/cloud-software/kuka-load>. Acesso em: 21 maio 2024.

KUKA ROBOTS. **KUKA paleteizer**: our smallest and lightest paletizing robot. Our smallest and lightest paletizing robot [Catálogo robôs paletizadores KUKA]. [2024] Disponível em: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/87f2706ce77c4318877932fb36f6002d/kuka_pb_palettierer_en.pdf?rev=a2647c5acac84e329418b4cf634bbcf1&hash=B5B3A59CBD45814D82D2F105CB56CCC5. Acesso em: 23 maio 2024.

KUKA ROBOTS. **Robotics range**: visão geral dos robôs industriais. Visão geral dos robôs industriais [Catálogo robôs industriais KUKA]. [2024] Disponível em: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/87f2706ce77c4318877932fb36f6002d/kuka_robotrange_en.pdf?rev=501b1671f3254844be3b6c400e130d60. Acesso em: 7 jun. 2024.

KUKA. **KR 240 R3330**. Disponível em: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/8350ff3ca11642998dbdc81dcc2ed44c/0000233234_pt.pdf?rev=7600e901a47840aeb01a6babba06e201&hash=2D73B8BF8A0057715EE572E460452B15. Acesso em: 23 mar. 2024.

LEAL, Brauliro Gonçalves. **Modelagem e simulação discreta sistemas de fila M/M/1**. 5. Ed. Juazeiro: Brauliro Gonçalves Leal, 2023. 237 p. Disponível em: <http://www.univasf.edu.br/~brauliro.leal/livro/MSD.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2024.

LOPES, António Mendes. **Robótica industrial**: modelação cinemática e dinâmica de manipuladores de estrutura em série. 2002. Dissertação (Mestrado em Automação, Instrumentação e Controlo) – Feup Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2002.

MASULO, Adilson Donizeti; CARDOSO, Vivian Monique Silva. **Protótipo robô para linhas de processo**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica/Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade do Vale do Paraíba, Jacareí, 2012.

MOTION CONTROLS ROBOTICS. **Robot inertia vs payload**. 2024. Disponível em: <https://motioncontrolsrobotics.com/robot-inertia-vs-payload/>. Acesso em: 03 jun. 2024.

OLIVEIRA, Filipe. **O que é o solidworks ?** 2022. Disponível em: <https://www.projetistasacademy.com/post/o-que-%C3%A9-o-solidworks>. Acesso em: 31 maio 2024.

OTTONI, André Luiz Carvalho. Introdução à robótica: material de estudo. In: I ORCV OLIMPÍADA DE ROBÓTICA DO CAMPO DAS VERTENTES, 1., 2010, São João Del-Rei. **Anais...** São João Del-Rei: Universidade Federal de São João del Rey, 2010. P. 1-7. Disponível em: https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/orcv/materialdeestudo_introducaoarobotica.pdf. Acesso em: 26 mar. 2024.

PASTORIO, Diego Augusto. **Desenvolvimento de uma célula robótica de paletização**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Farroupilha, 2022.

PEREIRA, Mónica Gonçalves. **Desenvolvimento de uma metodologia de recolha e análise de tempos de ciclo de processos produtivos para a indústria automóvel**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão de Operações) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2023.

RIBEIRO, M. A. **Automação industrial**. 4. ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 2001.

ROBOTICS, Evs. **Envelope de trabalho do robô: o que é?** Disponível em: <https://www.avsint.com/pt/types-of-robot-work-envelope/>. Acesso em: 26 mar. 2024.

ROBOTS, Universal. **UR10e**. Disponível em: <https://www.universal-robots.com/products/ur10-robot/>. Acesso em: 23 mar. 2024.

SILVA, Jonny Carlos da. **Desenvolvimento de um sistema para análise e modelamento dinâmico de robôs industriais**. 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.

SOLUTIONS, Hero. **O que são robôs industriais? O guia completo!** 2023. Disponível em: <https://www.herosolutions.com.br/blog/o-que-sao-robos-industriais-o-guia-completo#:~:text=A%20defini%C3%A7%C3%A3o%20de%20rob%C3%B4s%20industriais,%2C%20rapidez%2C%20for%C3%A7a%20e%20resist%C3%Aancia..> Acesso em: 23 mar. 2024.

SOUZA, Marcelo Maraschin de. **Geometria analítica**. Lages: Instituto Federal de Santa Catarina, 2016. 48 slides. Disponível em: <https://docente.ifsc.edu.br/marcelo.maraschin/Material/Engenharia%20Mec%C3%A2nica/Geometria%20Anal%C3%ADtica%2020161/Vetores%20-%20202.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2024.

UNIVERSAL ROBOTS BRASIL. **Custos e benefícios da implantação de um braço robótico industrial**. 2020. Disponível em: <https://www.universal-robots.com/br/blog/custos-e-benef%C3%ADcios-da-implantac%C3%A3o-de-um-braco-rob%C3%B3tico-industrial/>. Acesso em: 21 mar. 2024.

UNIVERSAL ROBOTS BRASIL. **Tipos de robôs industriais e suas aplicações**. 2022. Disponível em: <https://www.universal-robots.com/br/blog/tipos-de-rob%C3%B4s-industriais-e-suas-aplicac%C3%B5es/>. Acesso em: 23 mar. 2024.

WOLF, Denis Fernando *et al.* **Robótica móvel inteligente**: Da simulação às aplicações no mundo real. *In*: WOLF, Denis Fernando *et al.* Minicurso: jornada de atualização em informática (JAI), Congresso da SBC. S/l, 2009. p. 12. Disponível em: https://osorio.wait4.org/publications/2009/CL_JAI2009_Completo.pdf. Acesso em: 31 mar. 2024.

ZHU, Theodore; ZU, Jean; GOLDENBERG, Andrew. Vibration controllability of flexible robot-payload systems. **Proceedings 2000 Icara. Millennium Conference. Ieee International Conference on Robotics And Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00Ch37065)**, [S.L.], v. 2, p. 1484-1489, abr. 2000. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/robot.2000.844807>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/844807#citations>. Acesso em: 03 jun. 2024.

ZIV, Amitai; WOLPE, Paul Root; SMALL, Stephen D.; GLICK, Shimon. Simulation-Based Medical Education. **Academic Medicine**, v. 78, n. 8, p. 783-788, ago. 2003.