



MODELAGEM DE UM MANIPULADOR ELETROPNEUMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO DE CARGAS EM UMA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

MODELING OF AN ELECTROPNEUMATIC MANIPULATOR FOR LOAD HANDLING OPTIMIZATION IN AN AUTOMOTIVE INDUSTRY

RAMON OLIVEIRA BORGES DOS SANTOS | ramonobs98@gmail.com

RENANN PEREIRA GAMA | renann.gama@Hotmail.com

BEATRIZ LIMA VIEIRA

MILQUEZEDEC LIMA DE CAMPOS JUNIOR

RESUMO

O setor automobilístico representa um dos segmentos industriais de maior relevância para a economia brasileira, destacando-se também pelos investimentos contínuos em inovação e desenvolvimento tecnológico. A crescente demanda por produtos com maior qualidade e eficiência impulsiona toda a cadeia produtiva a buscar soluções capazes de aumentar a produtividade e otimizar os processos industriais. Entretanto, algumas indústrias ainda apresentam atividades realizadas manualmente por trabalhadores, envolvendo riscos ergonômicos, como a movimentação manual de cargas, e riscos relacionados à segurança ocupacional, como a proximidade com máquinas de prensagem. Diante desse cenário, este estudo apresenta o desenvolvimento de um manipulador eletropneumático destinado à movimentação de cargas, com o objetivo de reduzir esforços físicos, minimizar riscos aos operadores e contribuir para o aumento da produtividade industrial. O dispositivo possibilita a substituição de atividades manuais, a otimização do tempo de produção e a realocação dos colaboradores para funções de maior criticidade operacional. O manipulador possui acionamento pneumático e comando elétrico por meio de botões operados pelo trabalhador, configuração cinemática RRR e sistema pantográfico para auxiliar nas movimentações. O equipamento apresenta capacidade de carga de 500 kg, alcance vertical de 2500 mm e extensão máxima de 4000 mm, além de possuir mobilidade para transferência entre diferentes linhas de produção devido ao seu sistema construtivo.

Palavras-chave: manipulador eletropneumático; indústria automobilística; movimentação de cargas.

ABSTRACT

The automotive sector is currently one of the industries that most positively contributes to the Brazilian economy and is also one of the largest investors in new technological advancements, as the demand for higher-quality products has significantly increased in recent years. Additionally, the growing consumption of products derived from the automotive sector has intensified this trend, requiring the entire supply chain to seek innovations that enhance productivity. Considering this evolution and the observation that some industries still rely on manual labor performed by employees, which involves risks related to ergonomics, such as manual load handling, as well as safety risks, such as exposure to machinery involved in pressing operations, a device was developed to eliminate these previously mentioned factors. The proposed solution also aims to increase productivity by enabling the production of a greater number of parts in a shorter period, promoting technological advancement in industrial processes, and allowing employees to be reassigned to higher-criticality activities. The device features pneumatic actuation and electrical control through buttons operated by the employee. The manipulator, configured as an RRR robotic system and equipped with a pantographic mechanism to assist in movements, has a load capacity of 500 kilograms, reaching a maximum height of 2500 millimeters and an extension length of 4000 millimeters. Due to its structural design, it can be easily transported from one production line to another.

Keywords: electropneumatic manipulator; automotive industry; load handling

INTRODUÇÃO

O principal objetivo deste estudo é demonstrar que a robótica e suas tecnologias podem ser empregadas para contribuir com a ergonomia, preservando a integridade física da mão de obra humana, reduzindo custos operacionais e o tempo entre operações, além de proporcionar vantagem competitiva às indústrias. Um estudo realizado nos Estados Unidos em 2009, intitulado *Roadmap for US Robotics*, demonstra que, ao longo dos últimos 50 anos, os robôs têm proporcionado maior produtividade e precisão na execução de atividades repetitivas e monótonas, especialmente em operações que envolvem movimentação de cargas.

Segundo a Siemens AG (2017), as transformações tecnológicas impulsionaram os líderes industriais a repensarem os modelos tradicionais de produção. Nesse contexto, regiões anteriormente caracterizadas pela disponibilidade de mão de obra de baixo custo passaram a buscar a reestruturação de seus processos industriais. Schwab (2016) afirma que a sociedade vive um período de profundas transformações, caracterizado pelo surgimento de uma nova revolução industrial, capaz de modificar significativamente a forma como o trabalho é realizado e como as pessoas vivem.

As décadas de 1950 a 1970 marcaram o início da terceira Revolução Industrial, período caracterizado pelo avanço tecnológico e pela introdução da automação e da robotização nas linhas de produção (Coelho, 2016). Atualmente, vivencia-se a quarta Revolução Industrial, também denominada Indústria 4.0. Segundo Schwab (2016), esse novo paradigma caracteriza-se pelo uso intensivo de tecnologias avançadas para desenvolver produtos em menor tempo, ampliar a capacidade produtiva e aumentar a eficiência dos processos industriais. Nessa perspectiva, Sugayama e Negrelli (2016) ressaltam que, desde a Primeira Revolução Industrial, as organizações buscam continuamente aperfeiçoar seus processos produtivos, impulsionando o desenvolvimento tecnológico em diferentes áreas da produção.

Conforme destacam Aires, Moreira e Freire (2018), os avanços tecnológicos incentivam as indústrias a modernizarem seus processos para manterem sua competitividade. Embora essa transformação exija investimentos financeiros expressivos, os benefícios tendem a compensar os custos em médio e longo prazo. Além disso, empresas que não acompanharem a evolução tecnológica poderão perder competitividade, assim como países que deixarem de investir na modernização industrial poderão comprometer seu desenvolvimento econômico e produtivo (Souza; Cavallari; Delgado, 2017).

Apesar desses avanços, muitas indústrias ainda dependem significativamente da mão de obra humana em parte de seus processos produtivos, estando sujeitas às limitações físicas dos trabalhadores, como esforço excessivo, fadiga, restrições ergonômicas e dificuldades decorrentes das condições ambientais. Essa realidade é particularmente evidente na indústria automobilística, cuja elevada demanda produtiva envolve operações que exigem movimentação de cargas, precisão, agilidade e segurança. Nesse cenário, manipuladores robóticos e dispositivos automatizados têm sido amplamente empregados para reduzir riscos ocupacionais, aumentar a produtividade e melhorar a qualidade dos processos. De acordo com Karabegovic (2017), os manipuladores robóticos tornaram-se indispensáveis em diversos setores da indústria automobilística devido à sua flexibilidade, elevada capacidade operacional, precisão e custo relativamente reduzido. Além disso, contribuem para a prevenção de acidentes e recebem apoio das áreas de manufatura, segurança do trabalho e ergonomia. O autor também destaca que a tendência é o desenvolvimento de manipuladores cada vez menores, mais eficientes e economicamente acessíveis, destinados principalmente à execução de atividades repetitivas e de alto risco, anteriormente realizadas por operadores humanos.

Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo estudar os manipuladores eletropneumáticos, propondo o desenvolvimento de um movimentador de cargas com capacidade para meia tonelada, móvel, versátil e de baixo custo, capaz de atender a elevadas demandas produtivas com maior rapidez. A proposta surgiu da necessidade de automatizar um setor tecnologicamente defasado de uma indústria automobilística, cuja produção ainda depende intensamente da força humana, tornando os processos suscetíveis a falhas, atrasos e riscos ergonômicos. Além disso, o modelo atual de produção favorece a ocorrência de lesões ocupacionais, afetando diretamente aspectos relacionados à ergonomia, à saúde e à segurança dos trabalhadores, bem como a qualidade dos produtos, a confiabilidade das operações e a satisfação de clientes e colaboradores (Ferreira, 2015).

Em resposta a essa necessidade, foi desenvolvido um manipulador de cargas eletropneumático dotado de sistema pantográfico, elevada flexibilidade de movimentos e funcionamento semelhante ao do braço humano. O equipamento possui estrutura móvel, permitindo sua utilização em diferentes setores da empresa sem comprometer a execução de outras atividades produtivas. Para sua instalação, é necessária apenas uma base fixa no piso, projetada para não interferir no nivelamento do ambiente nem representar riscos à circulação de pessoas quando o equipamento não estiver

em operação. Espera-se que a aplicação do protótipo reduza a necessidade de esforço físico dos operadores, aumente a produtividade, possibilite o atendimento de maior demanda em menor tempo e elimine as atividades de movimentação manual de cargas. Além disso, o equipamento contribuirá para a preservação da saúde dos trabalhadores, favorecerá a inclusão de mulheres em atividades anteriormente limitadas pelo esforço físico, promoverá a modernização de uma linha produtiva com baixo nível de automação e fortalecerá a competitividade da empresa no mercado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ROBÓTICA NO MEIO INDUSTRIAL

Segundo Valério e Garcia (2015), os primeiros robôs aplicados aos processos industriais de produção surgiram em 1961, na fábrica da General Motors (GM), por meio da empresa Unimation. Esses equipamentos operavam com programação sequencial e apresentavam elevado custo, além de limitações tecnológicas.

De acordo com Quintino e Giannini (2015), o uso de robôs está concentrado, principalmente, em grandes indústrias e multinacionais, especialmente na execução de atividades repetitivas e de alto risco, com o objetivo de aumentar a segurança, a ergonomia e a produtividade. Entre os diversos segmentos industriais, a indústria automobilística destaca-se como a que mais investe no desenvolvimento da robótica industrial, incorporando equipamentos cada vez mais ágeis, precisos e versáteis.

Nesse contexto, algumas instituições definem o robô industrial como um “manipulador multifuncional reprogramável, projetado para movimentar materiais, ferramentas ou peças especiais por meio de movimentos programados, permitindo a execução de diferentes tarefas”. Essa definição evidencia o desenvolvimento de sistemas robóticos capazes de reproduzir, de forma cada vez mais eficiente, movimentos semelhantes aos realizados pelos seres humanos, denominados robôs humanoides ou antropomórficos.

Segundo Amando et al. (2018), os manipuladores mecânicos constituem atualmente a categoria de robôs que melhor atende a esses objetivos. Esses equipamentos executam movimentos previamente programados para realizar atividades repetitivas com elevado nível de precisão, estabilidade e velocidade. Além disso, os avanços tecnológicos têm proporcionado maior autonomia aos manipuladores, bem como o aumento do número de graus de liberdade, de acordo com as exigências de movimentação impostas pelas diferentes aplicações industriais.

2.2 AUTOMAÇÃO

Segundo Pereira (2015), grande parte dos processos industriais atuais já não depende diretamente da intervenção humana, em razão dos avanços tecnológicos proporcionados pela automação. Essa tecnologia contribui significativamente para o aumento da eficiência operacional, otimiza processos produtivos e elimina atividades repetitivas e ergonomicamente inadequadas.

Nesse sentido, Heck (2017) destaca que a automação não surgiu com o objetivo de substituir integralmente a mão de obra humana, mas de ampliar a produtividade, reduzir custos operacionais e aumentar a eficiência dos processos industriais.

É importante ressaltar que automação e mecanização representam conceitos distintos. Enquanto a mecanização consiste na substituição do esforço físico humano por máquinas ou equipamentos mecânicos, a automação corresponde ao controle automático desses equipamentos por meio de sistemas de comando.

No presente estudo, ambas as tecnologias são empregadas. A estrutura mecânica do manipulador, composta por elos e juntas, caracteriza o processo de mecanização, cuja finalidade é reduzir os esforços físicos dos operadores. Por sua vez, a automação está presente no sistema de acionamento eletropneumático, composto por válvulas, circuitos elétricos e cilindros pneumáticos, nos quais os movimentos são produzidos pela pressão do ar comprimido e controlados eletricamente (Fortunato et al., 2016).

Roza e Moraes (2016) afirmam que, embora os sistemas eletropneumáticos exijam profissionais qualificados para sua implementação e manutenção, eles apresentam maior flexibilidade e menor custo operacional quando comparados aos sistemas exclusivamente pneumáticos, especialmente em processos sujeitos a variações de produção.

A automação pode ser aplicada em dois grandes grupos de processos industriais. O primeiro compreende os processos de manufatura, caracterizados pela predominância de movimentos mecânicos e amplamente empregados na indústria automobilística, em que fatores como velocidade, flexibilidade e força são fundamentais. O segundo corresponde aos processos contínuos, nos quais predominam variáveis como pressão, temperatura e vazão, exigindo menor movimentação mecânica durante a operação.

2.3 ELETROPNEUMÁTICA

Segundo Busch et al. (2017), a pneumática constitui uma das formas mais antigas de transmissão de energia utilizadas pelo ser humano, sendo amplamente empregada para ampliar a capacidade de realização de trabalho mecânico. Sua utilização em larga escala na indústria iniciou-se na década de 1950.

Conforme Portapilla e Volante (2019), a pneumática é amplamente aplicada nos processos industriais com o objetivo de reduzir esforços físicos, aumentar a precisão das operações, elevar a produtividade e minimizar os riscos ocupacionais. Além da indústria, essa tecnologia também é utilizada em sistemas automotivos e aplicações na área da saúde. Os sistemas eletropneumáticos apresentam operação relativamente simples, não exigindo elevada complexidade durante sua utilização. A Figura 1 ilustra uma aplicação da eletropneumática no ambiente industrial.

Os circuitos eletropneumáticos apresentam vantagens em relação aos sistemas exclusivamente pneumáticos. Entre seus principais benefícios destacam-se a maior velocidade na transmissão de sinais, a redução das perdas decorrentes da compressibilidade do ar nas linhas de alimentação e o aumento da segurança operacional, uma vez que permitem ao operador atuar sem contato direto com determinadas etapas do processo produtivo (Assis et al., 2018).

Os diferentes modelos de atuadores pneumáticos são amplamente empregados na indústria por apresentarem baixo custo de instalação e manutenção, além de elevada precisão no posicionamento durante operações de movimentação de cargas (Lopes, 2017). Os cilindros pneumáticos são responsáveis por transformar a energia do ar comprimido em movimento linear de elevada velocidade, sendo utilizados em operações como prensagem leve e acionamento de dispositivos mecânicos destinados à movimentação de materiais. Nos cilindros de dupla ação, o avanço e o retorno do êmbolo ocorrem mediante a admissão de ar comprimido em ambas as câmaras do atuador.

O controle dos movimentos de avanço e retorno dos cilindros pneumáticos é realizado por meio de válvulas solenoides, dispositivos eletromecânicos responsáveis pelo controle da vazão do fluido. Quando energizada, a bobina gera um campo magnético que desloca o elemento móvel da válvula, alterando o fluxo de ar e promovendo o acionamento do cilindro. Conforme Araújo Junior (2018), essas válvulas são classificadas de acordo com o número de vias e o número de posições. As vias correspondem aos canais de circulação do fluido, enquanto as posições representam as diferentes configurações possíveis de direcionamento do fluxo.

Figura 1 | Aplicação da eletropneumática indústria



Fonte: Versa, 2015

2.4 ERGONOMIA

A ergonomia fundamenta-se em estratégias voltadas à adaptação do ambiente de trabalho às necessidades humanas, buscando promover condições laborais mais seguras, confortáveis e eficientes. Segundo Piekarski e Cavina (2010), a ergonomia tem como princípio adequar o trabalho ao ser humano, priorizando o bem-estar, a saúde ocupacional, o conforto e a eficiência dos processos, ao mesmo tempo em que favorece o desenvolvimento tecnológico.

Paula, Haiduke e Marques (2016) destacam que a ergonomia envolve o estudo contínuo da interação entre trabalhadores e sistemas produtivos, visando à integração segura de máquinas, dispositivos, robôs, manipuladores e demais equipamentos ao ambiente industrial. Os autores também ressaltam a importância da adequação ou substituição de equipamentos obsoletos que apresentem riscos aos trabalhadores, promovendo a integração entre ergonomia e melhoria contínua.

Segundo Figueiredo e Oliveira (2019), o setor de ergonomia desempenha papel estratégico, especialmente na indústria automobilística, segmento em que os riscos ocupacionais são elevados em razão da complexidade das operações. Além de contribuir para a redução de acidentes de trabalho, a ergonomia favorece a eliminação de desperdícios, o aprimoramento dos processos produtivos e o fortalecimento da competitividade das organizações.

Entre as ferramentas amplamente utilizadas para apoiar a melhoria contínua destaca-se o Kaizen, cuja filosofia está diretamente relacionada à busca permanente por aperfeiçoamentos nos processos organizacionais. De acordo com Campos et al. (2016), o Kaizen consiste em um método de gestão voltado

à identificação de oportunidades de melhoria, estimulando a participação coletiva na proposição de soluções que promovam ganhos de eficiência e qualidade. Seu principal objetivo é eliminar atividades que não agregam valor ao processo produtivo.

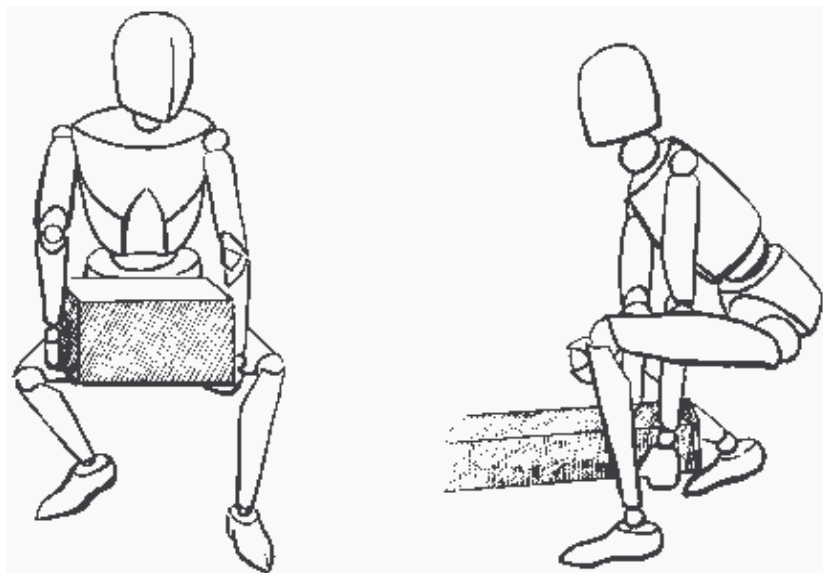
Corroborando essa perspectiva, Prata e Giroletti (2017) afirmam que o Kaizen constitui uma das metodologias mais eficazes para a resolução contínua de problemas organizacionais, proporcionando melhorias graduais e sustentáveis nos processos produtivos.

2.5 MOVIMENTAÇÃO DE CARGA

Segundo Wendel (2017), a movimentação manual de cargas consiste no transporte de materiais realizado exclusivamente pela força física do trabalhador, abrangendo atividades como levantamento, deslocamento e acomodação de cargas. Esse tipo de operação concentra esforços significativos sobre a região lombar, submetendo a coluna vertebral a elevadas forças de compressão em diferentes direções, o que aumenta o risco de lesões ocupacionais.

A Figura 2 apresenta a postura considerada adequada para a realização da movimentação manual de cargas, evidenciando técnicas que contribuem para a redução dos riscos ergonômicos durante a execução dessa atividade.

Figura 2 | Movimentação manual de carga correta



Fonte: UFRRJ, 2016

Segundo a FUNDACENTRO (2018), a movimentação manual de cargas pesadas constitui uma das principais causas de acidentes de trabalho e lesões na região lombar. Como medida preventiva, recomenda-se a utilização de dispositivos mecânicos que eliminem ou reduzam a necessidade de movimentação manual de materiais. Além de minimizar os riscos ocupacionais, esses equipamentos proporcionam maior precisão e eficiência na execução das operações.

Nas operações de movimentação mecanizada por atuadores pneumáticos, os esforços mecânicos são integralmente absorvidos pelos cilindros pneumáticos responsáveis pelo acionamento dos elos do manipulador. Dessa forma, o operador deixa de realizar esforço físico significativo, reduzindo a exposição a acidentes de trabalho e lesões decorrentes de condições ou atos inseguros.

2.6 INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Conforme Rodrigues (2019) e Carrara (2015), a indústria automobilística brasileira constitui um dos principais segmentos do setor industrial, desempenhando papel relevante na economia nacional. Segundo a ANFAVEA (2020), em 2019 foram produzidos aproximadamente 3 milhões de veículos no Brasil, representando crescimento de cerca de 3% em relação ao ano anterior. No cenário mundial, a produção alcançou aproximadamente 95,4 milhões de veículos em 2018. Esses números evidenciam a relevância do setor para o desenvolvimento econômico e industrial.

Segundo Rosa et al. (2019), os avanços tecnológicos disponíveis atualmente impulsionam o desenvolvimento da indústria automobilística, exigindo que as empresas modernizem continuamente seus processos produtivos para manterem competitividade em termos de qualidade, produtividade e custos.

Para Silva (2017), os veículos exercem papel fundamental na sociedade contemporânea, influenciando diretamente aspectos econômicos, sociais e culturais. Apesar das oscilações econômicas enfrentadas ao longo de sua história, a indústria automobilística tem demonstrado elevada capacidade de adaptação e recuperação, mantendo investimentos constantes em inovação tecnológica e no desenvolvimento de novos processos produtivos.

2.7 CARACTERÍSTICAS DO MANIPULADOR

Segundo Cardona (2015), um manipulador robótico consiste em um dispositivo mecânico automatizado capaz de desempenhar diversas funções em ambientes industriais e não industriais. Sua estrutura é composta por elos e juntas, responsáveis pela formação da cadeia cinemática do manipulador, além dos graus de liberdade, que determinam sua capacidade de movimentação.

Simplício et al. (2016) afirmam que, em razão das limitações físicas dos trabalhadores e das vantagens proporcionadas pelos manipuladores robóticos, a incorporação desses equipamentos aos processos produtivos tornou-se cada vez mais relevante. Esses dispositivos apresentam elevada capacidade operacional e podem ser utilizados para reduzir esforços físicos, aumentar a segurança e minimizar a execução de atividades de alto risco. A indústria automobilística destaca-se entre os principais setores beneficiados por essa tecnologia, em razão dos ganhos de produtividade, precisão e qualidade proporcionados pelos manipuladores robóticos.

O manipulador proposto neste trabalho consiste em um sistema eletropneumático acionado por cilindros pneumáticos e comandado eletricamente por meio de botões de controle. Sua estrutura é composta por quatro elos e quatro juntas, totalizando quatro graus de liberdade, com configuração cinemática do tipo RRR (articulada). As juntas localizadas a partir da base de fixação são rotativas e o equipamento incorpora um sistema pantográfico destinado a ampliar sua flexibilidade operacional.

2.8 CLASSIFICAÇÃO DO MANIPULADOR

Os manipuladores robóticos são classificados de acordo com sua configuração cinemática, isto é, conforme sua capacidade de executar movimentos dentro de determinado espaço de trabalho, característica que define suas aplicações e limitações.

Essa classificação considera, principalmente, os movimentos das três primeiras juntas, iniciando-se pela base fixa, denominada elo zero. Utiliza-se a letra **P** para representar juntas prismáticas, responsáveis por movimentos lineares, e a letra **R** para representar juntas revolutas, responsáveis por movimentos rotacionais. Conforme Wizenberg (2017), cada junta corresponde a um grau de liberdade do manipulador, sendo o deslocamento final do efetuador resultante da combinação dos movimentos realizados por cada elo em relação ao elo anterior.

Segundo Cavalli (2018) e Behnen et al. (2016), manipuladores que apresentam configuração composta por, no mínimo, três juntas revolutas (RRR) são classificados como manipuladores articulados ou antropomórficos. Essa configuração proporciona elevada mobilidade, ampla flexibilidade e maior espaço de trabalho quando comparada a outras arquiteturas cinemáticas, devido à sua geometria mais complexa.

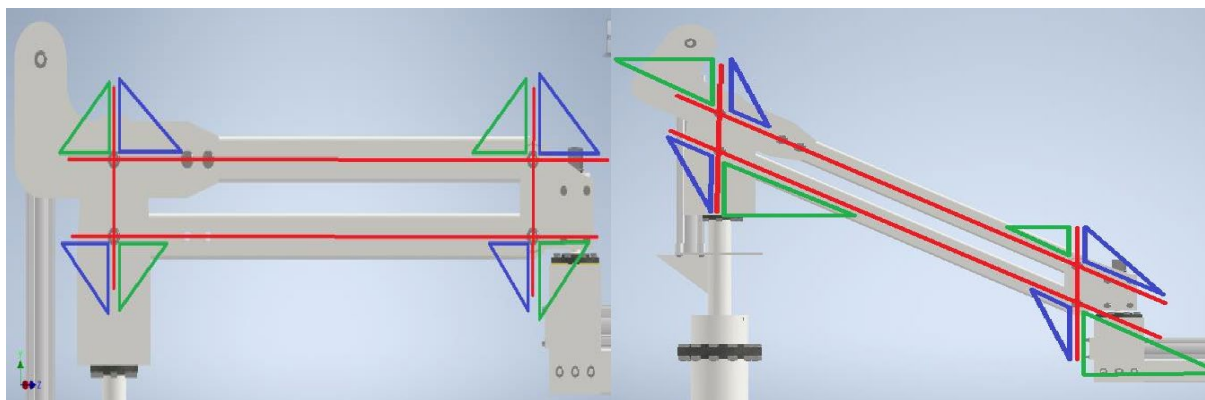
2.9 PANTOGRAFIA

Segundo Oliveira (2016), a pantografia foi registrada em 1603 pelo matemático e astrônomo alemão Christoph Scheiner, que desenvolveu um mecanismo baseado na semelhança de triângulos, cujo funcionamento pode ser explicado por meio dos princípios da geometria elementar.

O sistema pantográfico é amplamente empregado em mecanismos de movimentação de cargas devido à sua capacidade de proporcionar redução do esforço mecânico, maior precisão nos movimentos e aumento da segurança operacional. Além disso, destaca-se por apresentar elevada resistência estrutural e grande versatilidade de aplicação.

Sua estrutura é composta por dois perfis estruturais dispostos paralelamente e interligados por um sistema articulado, permitindo movimentos verticais e horizontais de forma estável e controlada. A Figura 3 apresenta a aplicação do sistema pantográfico no manipulador desenvolvido neste estudo.

Figura 3 | Aplicação da pantografia



Fonte: autoria própria, 2020

3. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foram analisadas as limitações operacionais de uma linha de produção de componentes estruturais para automóveis em uma indústria automobilística. A investigação teve como objetivo identificar oportunidades de aumento da produtividade e de melhoria das condições ergonômicas, considerando que a movimentação manual dos componentes exige elevado esforço físico dos operadores. Observou-se que alguns desses componentes excedem a capacidade de movimentação de um único trabalhador, tornando necessária a atuação simultânea de mais de um colaborador durante determinadas operações.

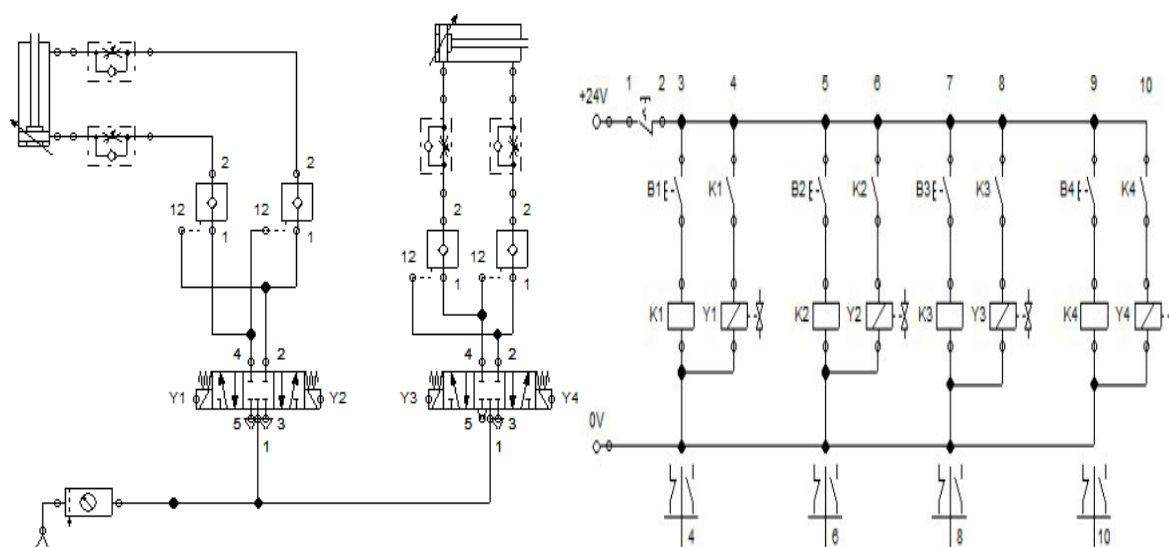
A partir desse diagnóstico, identificou-se a necessidade de desenvolver um dispositivo mecânico capaz de eliminar ou reduzir os esforços físicos e os movimentos repetitivos executados pelos operadores, minimizando os riscos de lesões ocupacionais. Para isso, foi projetado um manipulador construído com perfis estruturais metálicos comerciais, tais como tubos quadrados, tubos circulares e chapas de aço.

O manipulador é acionado pneumaticamente por dois cilindros lineares de dupla ação, responsáveis pela realização dos movimentos verticais de elevação e descida da estrutura. Esses movimentos ocorrem por meio de um conjunto articulado que utiliza o princípio da pantografia, descrito anteriormente na Figura 3.

Além dos movimentos verticais, o equipamento realiza deslocamentos longitudinais de avanço e retorno, permitindo o posicionamento adequado dos componentes durante as operações de movimentação de cargas. O sistema é comandado eletricamente por meio de botões acionados pelo operador, que enviam sinais elétricos de 24 V às válvulas solenoides responsáveis pelo acionamento dos cilindros pneumáticos.

O manipulador também incorpora conjuntos de rolamentos que possibilitam movimentos rotacionais horizontais em torno de um eixo, instalados na base e na terceira articulação do equipamento. Por fim, sua estrutura possui um sistema de fixação na sapata, garantindo estabilidade durante a operação e permitindo seu deslocamento para diferentes pontos previamente definidos ao longo da linha de produção.

Figura 4 | Circuito aplicado ao manipulador



Fonte: autoria própria, 2020

Para viabilizar a construção do equipamento, foi desenvolvido um protótipo virtual em escala real por meio de um software de desenho assistido por computador (*Computer-Aided Design – CAD*), utilizando modelagem tridimensional nos eixos X, Y e Z. Todas as peças do manipulador eletropneumático foram modeladas com o emprego de recursos como extrusão, revolução, cortes e demais ferramentas de modelagem. Posteriormente, os componentes foram montados por meio de restrições de posicionamento, paralelismo, distância e ângulo, sendo simuladas as uniões por solda e por parafusos.

Essa modelagem permitiu verificar a viabilidade construtiva do equipamento e analisar suas possibilidades de movimentação antes da fabricação do protótipo físico. Para essa etapa foi utilizado o software Inventor 2021, desenvolvido pela Autodesk, amplamente empregado em projetos mecânicos devido aos seus recursos de modelagem tridimensional, montagem e simulação.

Ao final do desenvolvimento, obteve-se um manipulador eletropneumático acionado por ar comprimido industrial, operando à pressão de 10 bar, e comandado eletricamente por botões alimentados com tensão de 24 V, em conjunto com válvulas pneumáticas solenoides. O sistema utiliza válvulas de retenção pilotadas, responsáveis pelo controle dos atuadores pneumáticos, permitindo que os cilindros avancem ou retornem enquanto o botão permanece acionado e interrompam o movimento quando o comando é liberado.

O manipulador apresenta configuração cinemática do tipo RRR, caracterizada pelas três primeiras juntas rotativas, proporcionando amplo espaço de trabalho. O equipamento foi projetado para movimentar cargas de até 500 kg, com altura máxima de elevação de 2.500 mm e alcance horizontal de 4.000 mm. A Figura 5 apresenta o manipulador eletropneumático desenvolvido neste estudo.

Figura 5 | Modelagem do manipulador eletropneumático



Fonte: autoria própria, 2020

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do manipulador eletropneumático em processos industriais tem potencial para reduzir os riscos de acidentes associados a atividades sujeitas a falhas humanas. Entre as ocorrências mais frequentes no ambiente industrial destacam-se movimentos inadequados, prensagem de membros e esforços superiores à capacidade física dos trabalhadores, fatores que podem ocasionar lesões com ou sem afastamento. Nesse contexto, o manipulador proposto substitui a movimentação manual de cargas por um sistema de acionamento elétrico, permitindo que as operações sejam realizadas por meio de comandos enviados às válvulas eletropneumáticas.

A utilização do manipulador também possibilita a redução da quantidade de trabalhadores envolvidos em determinadas operações. Enquanto os processos manuais exigem a participação simultânea de vários operadores, o equipamento proposto pode ser operado por um único

colaborador, desde que devidamente capacitado para sua utilização. Assim, não é necessária formação técnica específica, sendo suficiente a realização de treinamento voltado ao correto funcionamento e à operação segura do equipamento.

Além dos benefícios ergonômicos, a adoção do manipulador pode contribuir para o aumento da produtividade. A substituição de atividades manuais por operações mecanizadas reduz a influência de fatores humanos relacionados à fadiga, ao esforço físico e às variações na execução das tarefas, favorecendo maior padronização dos processos produtivos.

Como exemplo de aplicação, considera-se uma linha de produção de peças dobradas, na qual são fabricados componentes com aproximadamente 150 kg de massa, 3.000 mm de comprimento e duas dobras laterais. No processo convencional, são necessários sete trabalhadores para executar atividades de posicionamento da peça na máquina-ferramenta, aplicação de lubrificante, operação do equipamento de dobra e giro da peça para a realização da segunda dobra. O tempo médio de processamento é de aproximadamente cinco minutos por peça.

Com a utilização do manipulador eletropneumático, as operações de posicionamento e rotação da peça passam a ser realizadas mecanicamente, reduzindo significativamente o esforço físico dos operadores e permitindo que apenas um colaborador realize o comando do equipamento. De acordo com a proposta desenvolvida, estima-se uma redução aproximada de 35% no tempo de processamento, proporcionando aumento da capacidade produtiva em razão da diminuição do tempo de ciclo.

Outro aspecto relevante é a versatilidade do manipulador, que permite sua adaptação para diferentes setores da empresa mediante a substituição ou adequação do dispositivo de fixação da carga, ampliando as possibilidades de aplicação do equipamento em distintas operações industriais.

O desenvolvimento do manipulador eletropneumático tem como finalidade aumentar a produtividade e contribuir para a melhoria da qualidade do produto final, mantendo elevados padrões de segurança operacional. Espera-se ainda que sua utilização possibilite a redução dos custos associados ao processo produtivo, principalmente pela otimização da distribuição da mão de obra. Ressalta-se, contudo, que a proposta não tem como objetivo substituir trabalhadores, mas permitir sua realocação para atividades que demandem maior número de operadores ou apresentem maior nível de complexidade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os manipuladores eletropneumáticos representam uma alternativa tecnológica para a modernização dos processos produtivos da indústria automobilística. Sua aplicação pode contribuir para o aumento da produtividade, da precisão e da qualidade das operações, além de favorecer a redução dos esforços físicos dos trabalhadores e dos riscos ergonômicos associados à movimentação manual de cargas. Entre suas principais vantagens destacam-se a versatilidade de aplicação, o baixo custo relativo de implantação e manutenção, bem como a possibilidade de automatizar atividades repetitivas e de elevado risco.

No cenário industrial contemporâneo, as empresas buscam continuamente soluções tecnológicas capazes de aumentar a eficiência operacional, melhorar a qualidade dos produtos e fortalecer sua competitividade. Nesse contexto, a indústria automobilística destaca-se pelos investimentos em automação e inovação tecnológica, incorporando equipamentos que proporcionem maior produtividade, segurança e confiabilidade aos processos produtivos.

Os manipuladores robóticos podem apresentar diferentes configurações cinemáticas, cuja escolha depende das características da aplicação. Entre elas, destaca-se a configuração articulada do tipo RRR, composta pelas três primeiras juntas rotativas, amplamente empregada em aplicações industriais devido à sua elevada flexibilidade, precisão operacional e amplo espaço de trabalho. Além disso, esses manipuladores podem possuir diferentes graus de liberdade, conforme os requisitos específicos de movimentação.

O manipulador eletropneumático proposto neste estudo foi desenvolvido com o propósito de contribuir para a modernização de um processo produtivo caracterizado pela elevada dependência da movimentação manual de cargas. Com base nas análises realizadas, espera-se que sua aplicação possibilite ganhos de produtividade, melhoria das condições ergonômicas e otimização da distribuição da mão de obra, permitindo a realocação de trabalhadores para atividades de maior valor agregado ou maior nível de complexidade.

Conclui-se, portanto, que a proposta apresentada demonstra potencial para atender às necessidades de automação do processo estudado, constituindo uma alternativa tecnicamente viável para a movimentação de cargas em ambientes industriais. Além dos benefícios relacionados à produtividade e à ergonomia, o manipulador apresenta características que favorecem sua integração aos processos industriais existentes, podendo contribuir para o aumento da competitividade das organizações que adotarem soluções dessa natureza.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES, Regina Wundrack do Amaral; MOREIRA, Fernanda Kempner; FREIRE, Patricia de Sá. Indústria 4.0: desafios e tendências para a gestão do conhecimento. **Tecnologias para Competitividade Industrial**, Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 67-87, set. 2018. Disponível em: <http://etech.sc.senai.br/index.php/edicao01/issue/download/33/Regina%20Wundrack%20do%20Amaral%20Aires%C2%B9%20Fernanda%20Kempner%20Moreira2%20Patricia%20de%20S%C3%A1%20Freire3>. Acesso em: 15 maio 2020.
- AMANDO, José A. Diaz; SOARES, João E.; GENIVAL, A.; GEOVANI, B.; BRUNO, A.; JAIME, S. **O braço robótico como ferramenta interdisciplinar**. 2018. 5 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Vitória da Conquista, 2018. Disponível em: <http://sistemaolimpico.org/midias/uploads/7cd05ca2e7bf2981ca931606c94c33d9.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2020.
- ARAÚJO JÚNIOR, Márcio Emanuel Ugulino de. **Controle preditivo NMPC de válvulas posicionadoras eletropneumáticas com agarramento**. 2018. 90 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.
- ASSIS, Cleverson Faber de; TENÓRIO, Leandro; BUENO, Robson Elias; FERNANDES, Samuel. Aplicação dos conceitos de metodologia de projetos na indústria de manufatura de brinquedos. **South American Development Society Journal**, [s. l.], v. 4, n. 12, p. 80-97, dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.24325/issn.2446-5763.v4i12p80-97>. Disponível em: <http://www.sadsj.org/index.php/revista/article/view/204>. Acesso em: 25 maio 2020.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Anuário da indústria automobilística brasileira 2020**. São Paulo: ANFAVEA, 2020. Disponível em: <http://anfavea.com.br/anuarios>. Acesso em: 20 jun. 2020.
- BEHNEN, Vânia Luisa; GOERGEN, Roberta; RITTER, Djonatan; ALVES, Mônica Raquel; VALDIERO, Antonio Carlos; RASIA, Luiz Antonio. Estudo dos tipos de estruturas mecânicas de robôs e suas aplicações. In: **CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**, 9., 2016, Fortaleza. *Anais [...]*. Fortaleza: CONEM, 2016. p. 1-10. Disponível em: <https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/PDF/CON-2016-1636.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2020.
- BRASIL. Organização Internacional do Trabalho (OIT). **Pontos de verificação ergonômica**. 2. ed. São Paulo: Fundacentro, 2018. 304 p. Disponível em: <http://www.fundacentro.gov.br/biblioteca/biblioteca-digital/publicacao/detalhe/2018/6/pontos-de-verificacao-ergonomica>. Acesso em: 30 mar. 2020.
- BUSCH, Arilson et al. Manipulador eletropneumático de três eixos. **Revista Maiêutica**, Indaial, v. 3, n. 1, p. 55-62, mar. 2017. Disponível em: https://189-016-006-142.assselvi.edu.br/index.php/ENG_EaD/article/view/1740/849. Acesso em: 15 jun. 2020.
- CAMPOS, Vinicius Mitsuo Kojima; COTRIM, Syntia Lemos; GALDAMEZ, Edwin Vladimir Cardoza; LEAL, Gislaine Camila Lapasini. Introduction of lean manufacturing philosophy by Kaizen event: case study on a metalmechanical industry. **Independent Journal of Management & Production**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 151-167, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.14807/ijmp.v7i1.388>. Disponível em: <http://www.paulorodrigues.pro.br/ojs/ijmp/index.php/ijmp/article/view/388/282>. Acesso em: 15 maio 2020.
- CARDONA, Manuel. A new approach for the forward kinematics of general Stewart-Gough platforms. In: **CENTRAL AMERICAN AND PANAMA CONVENTION**, 35., 2015, Tegucigalpa. *2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV)*. Tegucigalpa: Curran Associates, Inc., 2016. p. 1-6. Disponível em: <http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/11715/959/1/4.2015.%20Analisis%20Cinematico%20Stewart%20Gough.pdf>. Acesso em: 10 maio 2020.
- CARRARA, Valdemir. **Introdução à robótica industrial**. 2015. 101 f. Monografia (Especialização em Engenharia Mecânica) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/08.25.14.16/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2020.
- CAVALLI, Guilherme Steimbach. **Projeto de um equipamento de teste e diagnóstico de falhas em suspensão automotiva**. 2018. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/12735>. Acesso em: 10 maio 2020.

em: 25 maio 2020.

COELHO, Pedro Miguel Nogueira. **Rumo à indústria 4.0**. 2016. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) — Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/36992>. Acesso em: 29 maio 2020.

FERREIRA, Mário César. Ergonomia da atividade aplicada à qualidade de vida no trabalho: lugar, importância e contribuição da análise ergonômica do trabalho (AET). **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, São Paulo, v. 40, n. 131, p. 18-29, jun. 2015. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=100541506004>. Acesso em: 5 maio 2020.

FIGUEIREDO, Maura Aparecida da Costa; OLIVEIRA, Thiago Rocha Faria Guimarães de. Os efeitos da aplicação da metodologia Kaizen em uma indústria automobilística. **Libertas: Revista de Ciências Sociais Aplicadas**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 229-242, jul. 2019. Disponível em: <http://famigvirtual.com.br/famig-libertas/index.php/libertas/article/view/164>. Acesso em: 10 maio 2020.

FORTUNATO, Fernando Aparecido Pacheco da Silva; PRADO JÚNIOR, Carlos Rene do; LOPES, Claudio Roberto; SANTOS, Ezequiel da Silva. Projeto e construção de um separador de materiais eletropneumático para reciclagem. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION**, 14., 2016, Salvador. *Anais [...]*. Salvador: COPEC, 2016. p. 183-187. Disponível em: <https://copec.eu/intertech2016/proc/works/40.pdf>. Acesso em: 6 maio 2020.

HECK, Guilherme de Souza. **Desenvolvimento de um módulo didático para ensino de automação industrial**. 2017. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) — Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2017. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/handle/riu/2688>. Acesso em: 5 maio 2020.

KARABEGOVIĆ, Isak. Comparative analysis of automation of production process with industrial robots in Asia/Australia and Europe. **International Journal of Human Capital in Urban Management**, Bosnia and Herzegovina, v. 2, n. 1, p. 29-38, jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.22034/ijhcum.2017.02.01.003>. Disponível em: http://www.ijhcum.net/article_24992.html. Acesso em: 15 jun. 2020.

OLIVEIRA, Maurício Guimarães de. **Estruturas dinâmicas articuladas pantográficas: aplicações em arquitetura mediadas por simulações paramétricas**. 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/330391/1/Oliveira_MauricioGuimaraesDe_M.pdf. Acesso em: 10 jun. 2020.

PAULA, Alessandra de; HAIDUKE, Ivonete Ferreira; MARQUES, Inês Astreia Almeida. Ergonomia e gestão: complementaridade para a redução dos afastamentos e do estresse, visando melhoria da qualidade de vida do trabalhador. **Revista Conbrad**, Maringá, v. 1, n. 1, p. 121-136, jan. 2016. Disponível em: <http://revistaconbrad.com.br/editorial/index.php/conbrad/article/view/16>. Acesso em: 29 maio 2020.

PEREIRA, Danilo Arruda R. **Projeto de um sistema de automação industrial para uma indústria de produtos saneantes**. 2015. 86 f. Monografia (Especialização em Engenharia Automotiva) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/15124>. Acesso em: 19 jun. 2020.

PORTAPILLA, Thiago Freire; VOLANTE, Carlos Rodrigo. Os conceitos físicos aplicados em uma prensa pneumática. **Revista Interface Tecnológica**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 641-652, jun. 2019. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/595>. Acesso em: 15 jun. 2020.

PRATA, Hericson Estanislau; GIROLETTI, Domingos Antônio. Kaizen: uma metodologia inovadora na siderurgia. **Revista Ibero-Americana de Estratégia**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 99-118, mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5585/riae.v16i1.2442>. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/riae/article/view/2442>. Acesso em: 10 maio 2020.

QUINTINO, Luís Fernando; GIANNINI, Hélio. Automação robótica em indústrias: evolução tecnológica e competitividade. In: **CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA**, 22., 2015, Campos dos Goytacazes. *Anais [...]*. Campos dos Goytacazes: ABCM, 2015. p. 1-10. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Cesar_Augusto_Della_Piazza/publication/305680422_AUTOMACAO_ROBOTICA_EM_INDUSTRIAS_-_EVOLUCAO_TECNOLOGICA_E_COMPETITIVIDADE/links/5798d50508aeb0ffcd08bc2e/AUTOMACAO-ROBOTICA-EM-INDUSTRIAS-EVOLUCAO-TECNOLOGICA-E-COMPETITIVIDADE.pdf. Acesso em: 16 jun. 2020.

ROSA, Mayara Patrícia Souza; RODRIGUES, Denise Alves; SILVESTRE, Paulo Henrique; OLIVEIRA, Pedro Henrique Silva de; GERIBELLO, Renato Sabino; AMARANTE, Mayara dos Santos. Desenvolvimento de novos produtos na indústria automobilística. **Pesquisa e Ação**, São Paulo, v. 5, n. 3, p. 95-110, maio 2019. Disponível em: <https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/view/744>. Acesso em: 25 maio 2020.

ROZA, Kayo Ronan Macedo; MORAES, Elson César. Análise experimental de sistemas de automação pneumática comparando diferentes níveis de tecnologia. In: **CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**, 9., 2016, Fortaleza. *Anais [...]*. Fortaleza: ABCM, 2016. p. 1-10. Disponível em: <https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/PDF/CON-2016-1252.pdf>. Acesso em: 1 maio 2020.

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**. Tradução de Daniel Moreira Miranda. Genebra: World Economic Forum, 2016. Disponível em: <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab/>. Acesso em: 29 maio 2020.

SIEMENS AG. **Annual report 2017**. Berlin; Munich: Siemens AG, 2017. Disponível em: https://www.siemens.com/investor/pool/en/investor_relations/Siemens_AR2017.pdf. Acesso em: 10 maio 2020.

SILVA, Luiz Fávero e. **Projeto de automação CLP-SCADA de uma linha de produção simulada de portas automotivas**. 2017. 117 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) — Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: http://bdm.unb.br/bitstream/10483/19760/1/2017_LuizFaveroSilva.pdf. Acesso em: 25 maio 2020.

SIMPLÍCIO, Paulo Victor Galvão; LIMA, Beatriz Rêgo; JUNKES, Janaína Accordi. Manipuladores robóticos industriais. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, Aracaju, v. 3, n. 3, p. 85-94, ago. 2016. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/index.php/cadernoexatas/article/viewFile/3572/1950>. Acesso em: 20 jun. 2020.

SOUZA, Paulo Henrique Moura de; CAVALLARI JÚNIOR, Silvio José; DELGADO, Geraldo Gonçalves. Indústria 4.0: contribuições para setor produtivo moderno. In: **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 37., 2017, Joinville. *Anais [...]*. Joinville: ENEGE, 2017. p. 1-15. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_WIC_238_384_34537.pdf. Acesso em: 15 maio 2020.

SUGAYAMA, Ricardo; NEGRELLI, Evaldir. **Connected vehicle on the way of Industry 4.0**. 2016. 16 f. Monografia (Especialização em Engenharia Automotiva) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2016. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/engineeringproceedings/simea2016/PAP16.pdf>. Acesso em: 29 maio 2020.

VALÉRIO, Roberto; GARCIA, Marcus Valério Rocha. O futuro da robótica. **Caleidoscópio**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 148-156, jul. 2015. Disponível em: <http://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais/article/view/195>. Acesso em: 5 maio 2020.

WIZENBERG, Marcelo. **Controle cinemático de robôs cooperativos**. 2017. Relatório de iniciação científica — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2017/relatorios_pdf/ctc/ELE/ELE-Marcelo%20Wizenberg.pdf. Acesso em: 20 jun. 2020.

