

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ANDRE DA SILVA MARTIN

**ROBÔ COLABORATIVO EM MONTAGEM DE MOTORES: UMA ABORDAGEM
SOCIOECONÔMICA DO AVANÇO TECNOLÓGICO EM MANUFATURA**

São Paulo

2023

Martin, Andre da Silva.

Robô colaborativo em montagem de motores: uma abordagem socioeconômica do avanço tecnológico em manufatura. / Andre da Silva Martin. 2023.

62 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2023.

Orientador (a): Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto.

1. Robô colaborativo. 2. Cobot. 3. Manufatura enxuta. 4. Motor. 5. Análise econômica.

I. Pinto, Luiz Fernando Rodrigues. II. Título

CDU 658.5

ANDRE DA SILVA MARTIN

**ROBÔ COLABORATIVO EM MONTAGEM DE MOTORES: UMA ABORDAGEM
SOCIOECONÔMICA DO AVANÇO TECNOLÓGICO EM MANUFATURA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho -UNINOVE, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Professor orientador: Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto.

São Paulo

2023



PARECER – EXAME DE DEFESA

Parecer da Comissão Examinadora designada para o exame de defesa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção a qual se submeteu o aluno André da Silva Martin.

Tendo examinado o trabalho apresentado para obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Produção”, com Dissertação intitulada “ROBÔ COLABORATIVO EM MONTAGEM DE MOTORES: UMA ABORDAGEM SOCIOECONÔMICA DO AVANÇO TECNOLÓGICO EM MANUFATURA”, a Comissão Examinadora considerou o trabalho:

☒ (X) Aprovado

☐ () Aprovado condicionalmente

☐ () Reprovado com direito a novo exame

☐ () Reprovado

EXAMINADORES

Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto - PPGE/UNINOVE (Orientador)

Prof. Dr. Peterson Adriano Belan – PPGI/UNINOVE (Membro Externo)

Prof. Dr. Sidnei Alves de Araújo – PPGI/UNINOVE (Membro Externo)

São Paulo, 21 de março de 2023

RESUMO

As tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, tais como armazenamento de dados em nuvem, robô autônomo, manufatura aditiva, realidade aumentada e internet das coisas, cada vez mais estão sendo adotadas pelas indústrias brasileiras. Uma destas tecnologias, o robô colaborativo ou cobot, tem grande potencial de expansão, pelo fato da aplicação em ambiente de manufatura compartilhando o espaço com o ser humano, oferecendo redução de custos operacionais, ambiente de trabalho mais seguro, principalmente para a redução de riscos ergonômicos e ganhos de qualidade do produto. O objetivo geral desta dissertação foi avaliar os ganhos econômicos, sociais, com foco na redução de risco ergonômico e ganhos em qualidade, com a implementação do cobot em processo de montagem de motores. O trabalho apresenta um estudo de caso em uma empresa de montagem de motores. Foi realizada a observação do processo de montagem para realização da coleta de dados, além de análise de relatórios técnicos e entrevistas com gestores. O método utilizado permitiu analisar as vantagens da implementação do cobot. Os resultados indicaram que o cobot integrado no processo de manufatura é vantajoso para a indústria. O projeto apresentou uma redução de R\$208.012,80 de custo operacional por ano, e o retorno sobre o capital investido foi de 1 ano e 9 meses. A garantia de realizar o torque na sequência correta foi outro ganho importante para a qualidade do produto, na qual ocorreu uma redução na pontuação de risco do PFMEA de 196 para 56. Além disso, a redução da pontuação de risco ergonômico de 24 para 10 proporcionou um melhor ambiente de trabalho para o operador, evitando possíveis afastamentos. A contribuição teórica desta pesquisa teve como foco oferecer um trabalho ainda não encontrado na literatura sobre vantagens econômicas, sociais e de qualidade com a aplicação de cobot em processo de montagem de motores. Como contribuição para a prática corporativa, este estudo pretende estimular gestores industriais a buscar oportunidades para aplicação de cobot dentro do processo de manufatura.

Palavras-chave: Robô Colaborativo, cobot, manufatura enxuta, motor, análise econômica.

ABSTRACT

Industry 4.0 enabling technologies, such as cloud data storage, autonomous robot, additive manufacturing, augmented reality, and internet of things, are increasingly being adopted by Brazilian industries. One of these technologies, the collaborative robot or cobot, has great potential for expansion, due to its application in a manufacturing environment sharing space with humans, offering a reduction in operating costs, a safer work environment, mainly for reducing risks. ergonomics and product quality gains. The general objective of this dissertation was to evaluate the economic and social gains, with a focus on the reduction of ergonomic risk and gains in quality, with the implementation of the cobot in the engine assembly process. The work presents a case study in an engine assembly company. Observation of the assembly process was carried out to carry out data collection, in addition to analysis of technical reports and interviews with managers. The method used allowed analyzing the advantages of implementing the cobot. The results indicated that the cobot integrated in the manufacturing process is advantageous for the industry. The project showed a reduction of R\$208,012.80 in operating costs per year, and the return on invested capital was 1 year and 9 months. The guarantee of performing torque in the correct sequence was another important gain for product quality, in which there was a reduction in the PFMEA risk score from 196 to 56. In addition, the reduction in the ergonomic risk score from 24 to 10 provided a better work environment for the operator, avoiding possible absences. The theoretical contribution of this research was focused on offering a work not yet found in the literature on economic, social and quality advantages with the application of cobot in engine assembly process. As a contribution to corporate practice, this study aims to encourage industrial managers to seek opportunities for cobot application within the manufacturing process.

Keywords: Collaborative Robot, cobot, lean manufacturing, engine, economic analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação de cobot em processo de manufatura	19
Figura 2 - Modelos de colaboração entre o homem e o cobot	20
Figura 3 - Estrutura metodológica da pesquisa	29
Figura 4 - Base de dados pesquisada	33
Figura 5 - Fluxo de Seleção dos artigos	33
Figura 6 - Etapas para realização do estudo de caso	35
Figura 7 - Fluxo do óleo na galeria do resfriador	37
Figura 8 - Fluxo de água pela galeria do bloco	38
Figura 9 - Apresentação de montagem do conjunto	39
Figura 10 - Tela do computador industrial com o software utilizado pela produção	39
Figura 11 - Apresentação da sequência de montagem dos componentes	40
Figura 12 - Apresentação da sequência de aperto dos parafusos	41
Figura 13 - Visão geral do processo de montagem	41
Figura 14 - Visão geral do cobot modelo UR10.	43
Figura 15 - Visão geral da arquitetura da linha.	44
Figura 16 - Estrutura de comunicação entre os equipamentos.	45
Figura 17 - Processo antes do cobot.	46
Figura 18 - Processo após implementação do cobot.	46
Figura 19 - Consumo de energia elétrica do cobot	49
Figura 20 - Análise ergonômica do estágio antes e depois	52
Figura 21 - Vazamento de óleo pela furação dos parafusos	53
Figura 22 - Análise de modo e efeitos de falha	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Artigos identificados na revisão sistemática	24
Quadro 2 - Quadro de palavras chaves e suas cognatas	31
Quadro 3 - Agrupamento das palavras chaves e suas cognatas	31

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1 - Quantidade de artigos por setor de publicação	21
Gráfico 2 - Quantidade de artigos publicados por ano	22
Gráfico 3 - Quantidade de artigos publicados por país	22
Gráfico 4 - Quantidade de artigos publicados por Periódico	23
Gráfico 5 - Pontuação de prioridade de risco por estágio	52

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Balanceamento de linha para atender a demanda do cliente	47
Tabela 2 - Custo operacional (ano)	48
Tabela 3 - Custo total de energia elétrica consumida pelo cobot (ano)	49
Tabela 4 - Custo total de investimento e a redução operacional por ano	50
Tabela 5 - Fluxo de caixa	50
Tabela 6 - Cálculo do retorno sobre o investimento	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.3 OBJETIVOS	15
1.4 JUSTIFICATIVA DE PESQUISA	15
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 DEFINIÇÃO DE COBOT	18
2.2. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA	20
2.3. REVISÃO SISTEMÁTICA	23
2.3.1. Vantagens econômicas obtidas com uso de cobot	25
2.3.2. Vantagens sociais obtidas com uso de cobot	26
2.3.3. Vantagens para a qualidade do produto obtidas com uso de cobot	27
3. METODOLOGIA DE PESQUISA	29
3.1. MÉTODO PARA REVISÃO DA LITERATURA	30
3.2. MÉTODO DE ESTUDO DE CASO	34
3.3 FUNÇÃO DO RESFRIADOR DE ÓLEO	36
3.4. PROCESSO ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO COBOT	38
4. RESULTADOS	42
4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO COBOT	42
4.2 CAPACIDADE DO PROCESSO	45
4.3 ANÁLISE ECONÔMICA	48
4.4 ANÁLISE ERGONÔMICA DO PROCESSO	51
4.5 VULNERABILIDADE DE QUALIDADE DO PROCESSO	53
5. DISCUSSÕES	55
6. CONCLUSÃO	57
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	58

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por me proporcionar essa oportunidade de enriquecer meus conhecimentos, a realização dessa pesquisa não teria sido possível sem a colaboração, auxílio e empenho demonstrado por várias pessoas ao longo do meu percurso, principalmente amigos, Mestres e Doutores que contribuíram positivamente em diversos assuntos e principalmente sobre o tema pesquisado.

Agradeço toda minha família, pelo apoio durante todo o período de estudos acadêmicos, em especial à minha esposa Gabriela, que me apoiou, ajudou e me encorajou neste grande desafio e sonho. Sem ela, dificilmente teria chegado até aqui. Deus te abençoe por tudo.

Agradeço aos meus filhos Rafaela e Leonardo, pela paciência e compreensão, principalmente nos períodos que não pude estar ao seu lado nos momentos de lazer.

Agradeço ao meu orientador Professor Luiz Fernando pelo acompanhamento, envolvimento, transmissão de conhecimento, conselhos e a oportunidade de trabalharmos juntos.

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a contextualização, problema de pesquisa, objetivo, justificativa de pesquisa e a estrutura do trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O mundo vem se transformando a cada minuto, celulares, conectividade, televisões e casas inteligentes cada vez mais fazem parte do nosso dia a dia. E nas indústrias não é diferente a inovação é peça importante para aumentar a eficiência e a competitividade. Por esse motivo, cada vez mais o investimento em tecnologia fará parte das estratégias das empresas.

A indústria 4.0, a quarta revolução industrial, é caracterizada por tecnologias emergentes que fundem as dimensões física e digital dos ambientes de fabricação, impulsionadas por avanços em uma infinidade de áreas como Internet-das-coisas, automação e robótica, interação homem-máquina e inteligência artificial (CHEN; HEYDARI; MOGHADDAM, 2021).

A implementação de robô colaborativo também conhecido como Cobot permite sistemas de produção mais flexíveis devido ao seu baixo custo, fácil de configurar, programar e seguro de usar (SALUNKHE *et al.*, 2019). Segundo Malik e Bilberg (2019), os cobots prometem ser leves, mais fáceis de programar e mais seguros para os seres humanos.

A 4ª revolução industrial nos traz exatamente essa integração entre máquinas e tecnologias digitais, tais como: big data, internet das coisas, nuvem e realidade aumentada. Essa junção resulta em tomadas de decisão mais rápidas e mais assertivas, além da redução ou eliminação de processos que não agregam valor, otimizando as tarefas e melhorando a produtividade.

A indústria manufatureira atualmente enfrenta enormes desafios para melhorar continuamente seus processos e a satisfação do cliente. Neste contexto a automação industrial e as novas tecnologias entram como peças importantes para manter a alta eficiência, repetibilidade e a flexibilidade de operação para lidar com a personalização e a variabilidade de produtos (ZHANG *et al.*, 2021).

Valentina *et al.* (2021), comentam que a implementação de tecnologias facilitadoras no contexto industrial envolve novos tipos de interações entre operadores

e máquinas, interações que transformam a força de trabalho e têm implicações significativas para a natureza do trabalho.

Os cobots, vem para tornar as fábricas mais inteligentes. Para manter a flexibilidade, os sistemas precisam ser apoiados também por uma automação inteligente (DAHL; BENGTSSON; FALKMAN, 2021). O campo da robótica está evoluindo rapidamente para que os humanos não estejam apenas compartilhando o mesmo espaço de trabalho com robôs, mas que também possam usá-los como assistentes úteis (HENTOUT *et al.*, 2019).

O papel da automação na manufatura moderna experimentou crescente relevância ao longo das últimas décadas. No entanto, até o momento, os fabricantes não podem automatizar eficientemente muitas tarefas. Nos últimos anos, os cobots estão suportando a execução de tarefas manuais, esta nova tecnologia pode, portanto, representar uma oportunidade com baixo custo de automação (WECKENBORG; SPENGLER, 2019).

A interação física humano-robô visa desenvolver uma comunicação natural entre os parceiros para trazer velocidade, flexibilidade e ergonomia na execução de tarefas complexas de fabricação (AYDIN; SIRINTUNA; BASDOGAN, 2021). Para manter a flexibilidade fornecida pelos operadores humanos ao introduzir tais robôs, os cobots precisam ser coordenados de forma inteligente, ou seja, eles precisam ser apoiados por um sistema de automação inteligente (DAHL; BENGTSSON; FALKMAN, 2021).

Nos futuros sistemas de automação, provavelmente incluirão dispositivos com um grau variado de autonomia, utilizando algoritmos avançados para percepção e controle. Espera-se que os operadores humanos trabalhem lado a lado com cobot realizando tarefas de montagem e robôs moveis que lidam com o transporte de materiais (DAHL; BENGTSSON; FALKMAN, 2021).

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

A iniciativa da Indústria 4.0 colocou mais ênfase em tecnologias inteligentes e sistemas autônomos, criando oportunidades para adicionar flexibilidade e agilidade aos sistemas de manufatura. Esses sistemas são projetados para suportar as pessoas de tarefas monótonas e repetitivas, permitindo que elas se concentrem em trabalhos baseados em conhecimento (D'SOUZA, COSTA, & PIRES, 2020). A utilização de

novas tecnologias e fácil integração pode ajudar na estratégia para suprir as necessidades de aumento de demanda na produção (MALIK; MASOOD; KOUSAR, 2021).

No processo de montagem colaborativo humano e robô, os operadores humanos e os robôs compartilham o mesmo espaço de trabalho e colaboram com segurança em uma variedade de tarefas, como pegar e posicionar peças, montagem, manuseio de materiais e inspeção ZHANG *et al.*, 2022). Trabalhadores e cobots podem ser integrados em uma linha de montagem para obter um melhor balanceamento do processo (WECKENBORG; SPENGLER, 2019).

A indústria manufatureira registrou a maior taxa de ocorrência de riscos ocupacionais, o que muitas vezes resulta em pouca eficiência organizacional e maiores custos corporativos. O cobot melhora o desempenho da linha de montagem e liberta os funcionários de potenciais riscos ocupacionais (REALYVÁSQUEZ-VARGAS *et al.*, 2019). Para mitigar riscos ergonômicos e melhorar a produtividade, cobots são introduzidos em muitos processos de montagem (ZHANG *et al.*, 2021a).

Quenehen; Pocachard; Klement, (2019), apresentaram um estudo de caso no qual foi realizada a otimização da montagem de cilindros pneumáticos utilizando cobot e eles mencionam que a aplicação em processos de forma colaborativa entre robôs e humanos é vista como uma característica significativa da implementação da Indústria 4.0.

Román Ibáñez *et al.* (2021), apresentaram a aplicação de cobot na montagem de chicote elétrico, cujo objetivo era melhorar o tempo de ciclo do processo, reduzindo custos e aumentando os benefícios. A aplicação de cobots na linha de montagem é vantajosa se considerarmos que o absenteísmo acontece o ano inteiro (COHEN *et al.*, 2022).

No trabalho de Cherubini *et al.* (2016), foi proposta uma estratégia colaborativa para a montagem da articulação homocinética por ser um processo de alto risco de distúrbios musculoesqueléticos. A economia estimada em termos de limitações de atividade e incapacidade poderia cobrir o custo de hardware e configuração.

Dimitrokalli *et al.* (2020) avaliaram a colaboração humano-robô na montagem de produtos mecânicos integrados ao uso da Realidade Virtual, permitindo medições exatas e precisas através do rastreamento esquelético das mãos. Os cobots estão se

tornando mais comuns na indústria de manufatura, o uso e a aplicação de cobots estão em constante crescimento (SALUNKHE *et al.*, 2019).

Sendo assim, apesar de encontrado artigos sobre processo de montagem, não foi identificado na literatura artigos que abordassem a avaliação sobre a utilização de cobot em montagem de motores de combustão interna.

Portanto, a lacuna sugere a seguinte questão de pesquisa: **Quais as vantagens o uso de Cobot em montagem de motores de combustão possibilita para as empresas?**

1.3 OBJETIVOS

Geral:

Avaliar vantagens econômicas de ergonomia e qualidade proporcionadas pelo uso de Cobot em montagem de motores de combustão interna.

Específicos:

- Buscar na literatura artigos sobre cobot em montagem de motores;
- Identificar nos artigos selecionados fatores que demonstram vantagens do uso de cobot para as empresas.
- Realizar estudo de caso em uma operação de montagem de motores de combustão interna;
- Avaliar as vantagens obtidas com a implantação de cobot em montagem de motores de combustão interna.

1.4 JUSTIFICATIVA DE PESQUISA

O estudo de caso foi realizado em uma montadora de motores diesel. O motor diesel tem várias aplicações como geradores de energia, automotivos, tratores e marítimos (PINTO *et al.*, 2020). O motor diesel está sendo desenvolvido para competir com outras fontes de energia, pois o motor é vantajoso em termos de logística, armazenamento, eficiência e compacidade (KNECHT; LAKSHMINARAYANAN, 2020).

Os motores diesel geradores oferecem uma série de vantagens, tais como alto nível de confiabilidade, alta velocidade no desempenho, bem como fácil implementação (BABAEI; ABAZARI; MUYEEN, 2020).

Desde a 3ª revolução industrial os robôs são aplicados na indústria, porém devido ao alto investimento essa tecnologia estava acessível somente para as grandes empresas. Além do custo existem outros fatores que acabavam não viabilizando a utilização de robôs, tais como: complexidade de instalação, custo com sistemas de segurança e custo com layout devido ao tamanho do equipamento.

O cobot foi desenvolvido para quebrar estas barreiras, sendo um equipamento econômico, seguro, de fácil instalação e programação simples. Ao estabelecer estações que compreendem trabalhador humano e Cobot, as vantagens da manufatura manual e automatizada podem ser realizadas em um sistema de produção combinado a baixo custo (WECKENBORG; SPENGLER, 2019).

Segundo Gualtieri *et al.* (2020), cobots de baixo custo permitem a automação dos processos de produção mesmo com pequenas quantidades e, portanto, agora são de grande interesse também para pequenas e médias empresas. Relacionando todos os custos de implementação com os benefícios do projeto, podendo ser quantitativo ou qualitativo ajuda a justificar o investimento.

Conforme apresento nesta seção, apesar de existirem novas tecnologias de geração de energia mais limpa, os motores de combustão interna se apresentam como sendo uma excelente opção, desta forma essa pesquisa tem como foco demonstrar a importância para as indústrias acompanhar a evolução tecnológica e andar na direção da eficiência dos processos através da aplicação tecnologias habilitadoras da indústria 4.0.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. No capítulo 1, foi apresentado a introdução da pesquisa desenvolvida nesta dissertação. O capítulo 2 consiste na apresentação das revisões bibliométrica e sistemática da literatura sobre cobot em processo de manufatura. No capítulo 3, os procedimentos metodológicos são explicados e fundamentados. O estudo de caso é mostrado no capítulo 4. Uma análise comparativa antes e após a implantação do cobot foi conduzida em um processo de montagem de motores de combustão interna. No capítulo 5, são apresentadas as

discussões dos resultados do estudo de campo e das constatações teóricas. Esta dissertação é finalizada com as conclusões, apresentada no capítulo 6, com as considerações finais, contribuições do estudo, limitação da pesquisa e recomendações de trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta etapa do trabalho de pesquisa foi realizada a busca nas bases sobre artigos na qual abordam o tema análise econômica e social do uso de cobot em montagem de motores.

2.1 DEFINIÇÃO DE COBOT

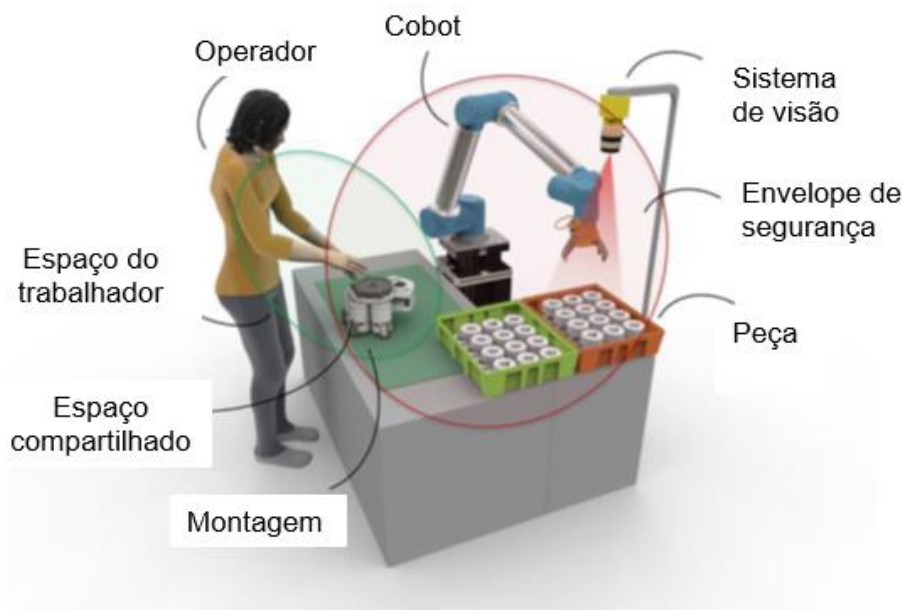
Os cobots vêm como uma importante tecnologia da Indústria 4.0 e da manufatura inteligente. Os cobots são conhecidos por sua capacidade de interagir com os operadores em um espaço de trabalho compartilhado de forma segura (COHEN *et al.*, 2022).

Cobot é uma evolução marcante dos robôs industriais autônomos. Os robôs devem ser isolados das pessoas por razões de segurança (PESHKIN; COLGATE, 1999). Neste mesmo artigo Peshkin e Colgate (1999), comentam que os cobots são distintos de teleoperadores, nos quais um operador humano controla remotamente um robô e uma carga útil. Os cobots têm como principal vantagem a interação muito próxima com os operadores, isso é possível pois o software de programação é capaz de criar superfícies virtuais conhecido também como envelope de segurança. Uma vez que o operador entra nesta área o cobot desabilita ou atua com baixa força.

Os sistemas de fabricação incluem máquinas e operadores humanos. Tanto a produtividade quanto o desempenho ergonômico são de importância significativa na fabricação. As operações manuais têm sido o principal recurso na fabricação por séculos. Embora a automação tenha sido cada vez mais adotada, muitos processos de fabricação ainda são realizados ou dominados por meio de operações manuais, como linhas de montagem geral na indústria automotiva (ZHANG *et al.*, 2021).

A aplicação de cobot em processo de manufatura, assim como o envelope de segurança gerado para delimitar a área de atuação do robô, está demonstrado na figura 1.

Figura 1 - Aplicação de cobot em processo de manufatura

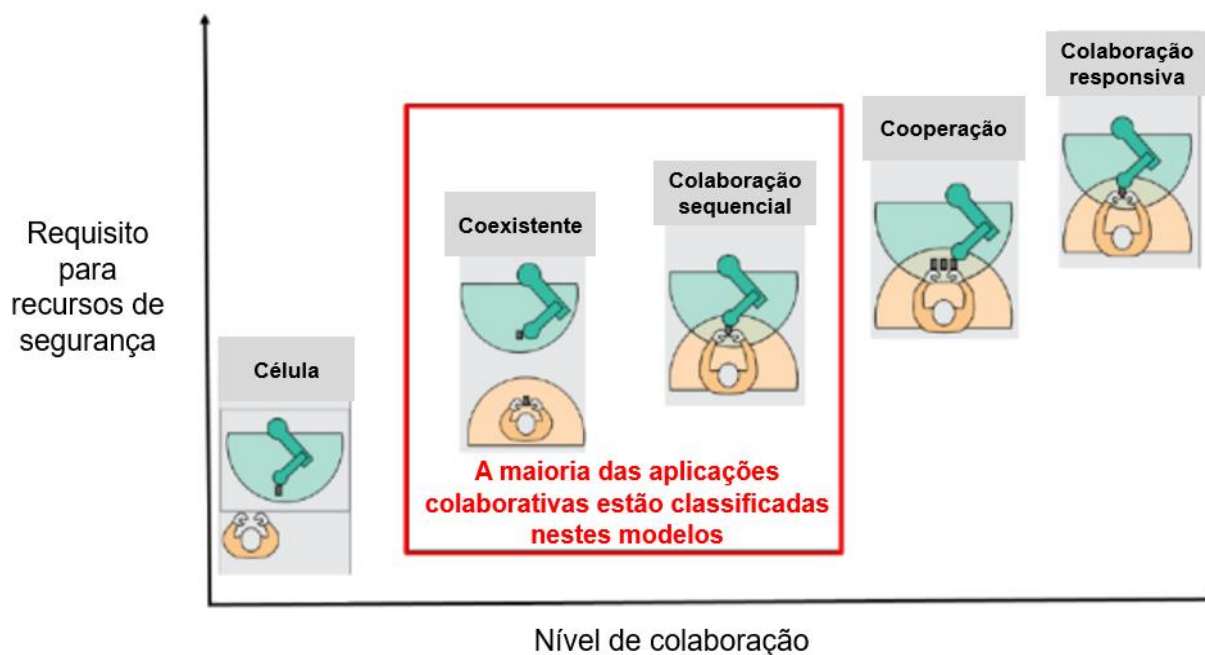


Fonte: (MALIK; BILBERG, 2019).

Dahl; Bengtsson; Falkman, (2021), explicam que existem modelos de colaboração entre o homem e o cobot. Dependendo do tipo de interação na aplicação pode afetar diretamente o nível de segurança do processo.

- Coexistência, quando o operador humano e o cobot estão no mesmo ambiente, mas geralmente não interagem entre si.
- Colaboração sequencial, quando o operador humano e o cobot trabalham no mesmo espaço de trabalho, mas em momentos diferentes.
- Cooperação, quando o operador humano e o cobot trabalham no mesmo espaço de trabalho ao mesmo tempo, embora cada um se concentre em tarefas separadas.
- Colaboração responsiva, quando o operador humano e o cobot devem executar uma tarefa juntos; a ação de um tem consequências imediatas no outro, esta atividade é monitorada por sensores especiais e sistemas de visão. A figura 2 demonstra modelos de colaboração entre o homem e o cobot.

Figura 2 – Modelos de colaboração entre o homem e o cobot



Fonte:(DAHL; BENGTSSON; FALKMAN, 2021).

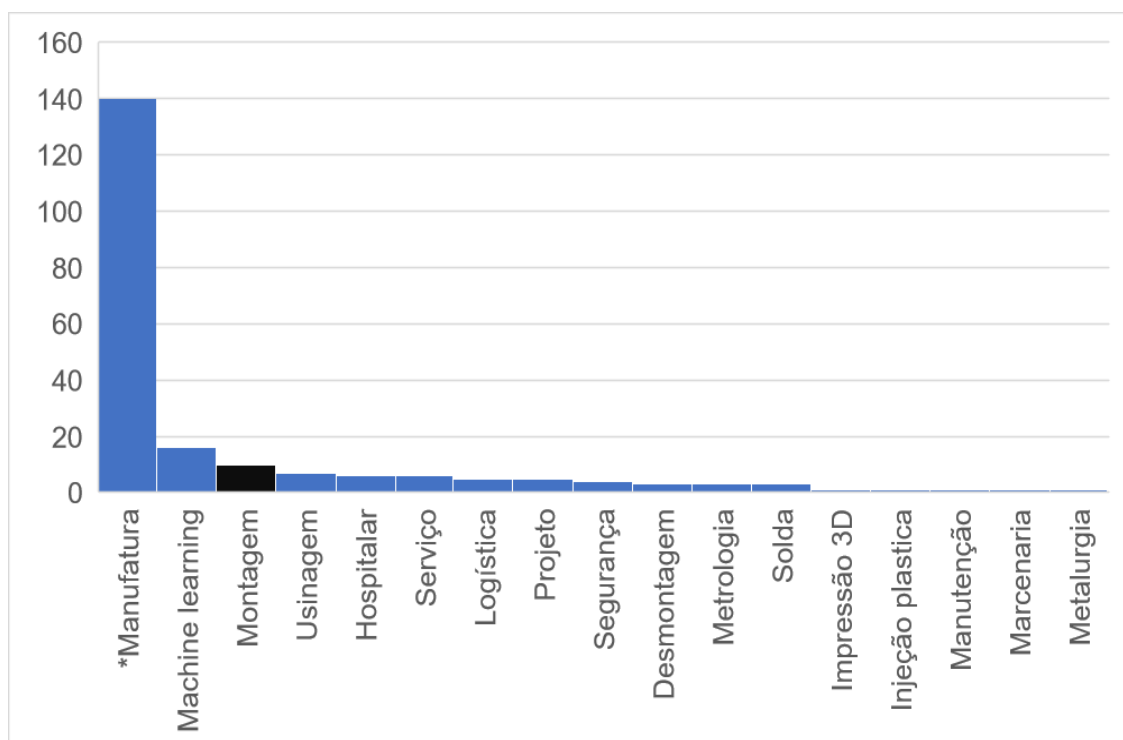
2.2. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

A busca na literatura por estudos sobre cobot em manufatura retornou 287 artigos. Uma análise inicial identificou 74 artigos duplicados, que foram removidos. A análise de conteúdo dos demais 213 destacou 10 artigos que abordaram a aplicação de cobots em linha de montagem. O detalhamento da busca e seleção de artigos está descrito no capítulo 3, metodologia de pesquisa.

Os demais estão distribuídos em outras áreas conforme apresentado no gráfico

1.

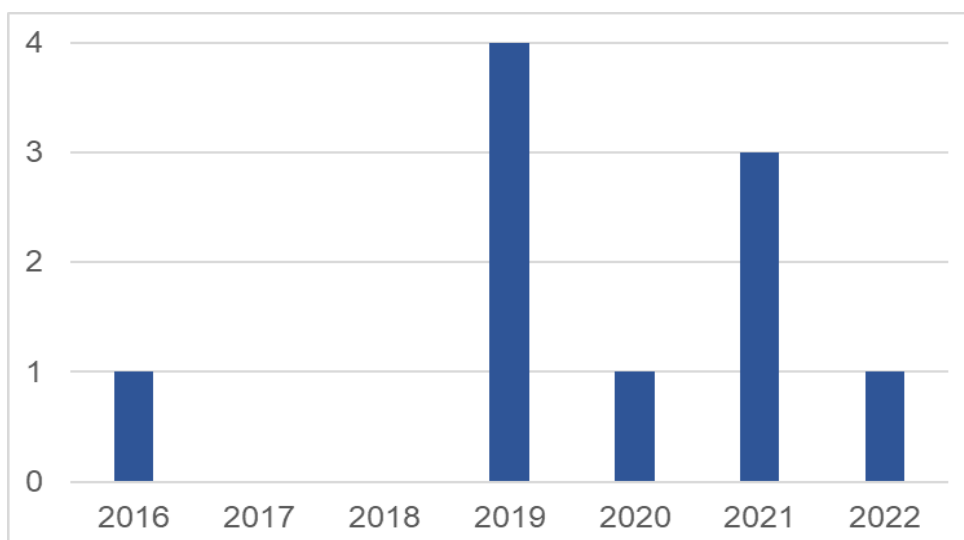
Gráfico 1 - Quantidade de artigos por setor de publicação



Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico 1, a coluna 'manufatura' foi deixada com um asterisco (*), pois explora manufatura de forma genérica, não mencionando uma área específica. Dessa forma, a revisão bibliométrica foi realizada nos 10 artigos que abordam o uso de cobots em processo de montagem. Na análise dos artigos, não foi identificada repetição de autores, o que muito provavelmente significa que não há um grande número de pesquisas relacionadas ao assunto, pelo fato de ser um tema recente. A análise temporal da publicação dos artigos indicou que o maior número de artigos que abordaram o uso de cobots em processo de montagem ocorreu nos anos de 2019 e 2021. É possível observar também que, por se tratar de uma tecnologia mais atual e relacionada aos conceitos de indústria 4.0, as publicações estão concentradas nos últimos 4 anos, conforme demonstrado no gráfico 2.

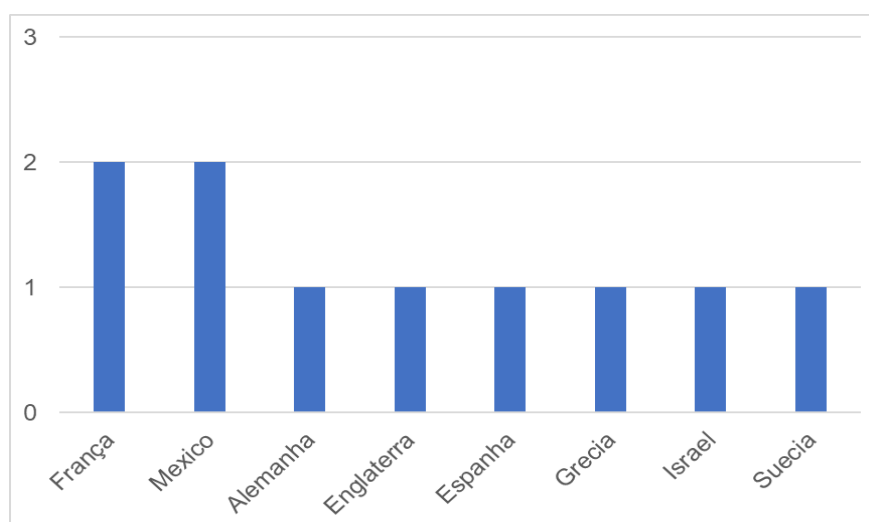
Gráfico 2 - Quantidade de artigos publicados por ano



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição de artigos publicados por país está bem pulverizada. Essa distribuição apresenta o interesse pela tecnologia ao redor do globo como um todo. O gráfico 3 demonstra a distribuição das publicações por país.

Gráfico 3 - Quantidade de artigos publicados por país

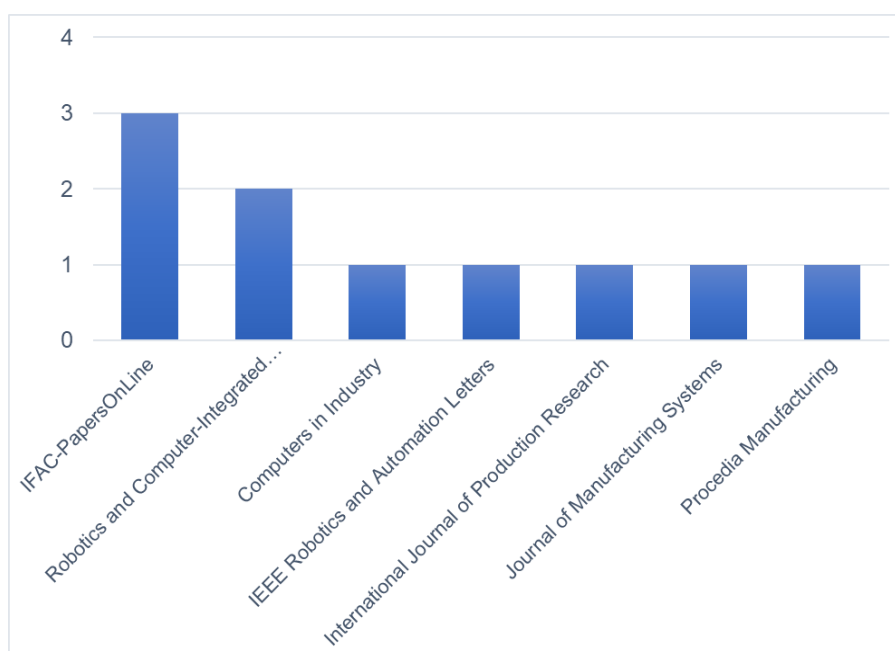


Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisado a distribuição dos artigos por Periódicos o IFAC-PapersOnLine publicou uma maior quantidade com 3 publicações, seguida do periódico Robotics and

Computer-Integrated Manufacturing com 2 publicações sobre o tema abordando os assuntos relacionados a aplicação de cobots em montagem. A justificativa se deve em função do escopo de publicações do periódico. O gráfico 4 apresenta a distribuição por periódicos.

Gráfico 4 - Quantidade de artigos publicados por Periódico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação a metodologia utilizada entre os 10 artigos analisados a distribuição está dividida entre estudo de caso e experimento, 5 artigo para cada. Este cenário se justifica devido ao projeto estar relacionado diretamente com as aplicações práticas do cobot em processos de montagem de motores.

2.3. REVISÃO SISTEMÁTICA

A revisão sistemática da literatura foi conduzida com o intuito de investigar vantagens relatadas em artigos científicos sobre o uso de cobot em montagem de motores. A análise de conteúdo identificou os fatores econômico, social e qualidade como critérios de avaliação desta tecnologia. Os 10 artigos selecionados na literatura estão demonstrados no quadro 1.

Quadro 1 - Artigos identificados na revisão sistemática

#	Ano	Título do Artigo,	Journal	País	Metodologia adotada	Abordagem
1	2022	Deploying cobots in collaborative systems: major considerations and productivity analysis	International Journal of Production Research	Israel	Estudo de caso	Econômica e Social
2	2021	Collaborative robotics in wire harnesses spot taping process	Computers in Industry	Espanha	Estudo de caso	Econômica e Social
3	2021	From Manual Operation to Collaborative Robot Assembly: An Integrated Model of Productivity and Ergonomic Performance	IEEE Robotics and Automation Letters	Mexico	Estudo de caso	Social
4	2021	Reconfiguring and ramping-up ventilator production in the face of COVID-19: Can robots help?	Journal of Manufacturing Systems	Inglaterra	Experimentos	Econômica e Social
5	2020	On the assessment of human-robot collaboration in mechanical product assembly by use of Virtual Reality	Procedia Manufacturing	Grécia	Experimentos	Econômica e Social
6	2019	Assembly 4.0: Wheel Hub Nut Assembly Using a Cobot	IFAC-PapersOnLine	Suécia	Experimentos	Econômica e Qualidade
7	2019	Assembly Line Balancing with Collaborative Robots under consideration of Ergonomics: a cost-oriented approach	IFAC-PapersOnLine	Alemanha	Experimentos	Econômica
8	2019	Introduction and configuration of a collaborative robot in an assembly task as a means to decrease occupational risks and increase efficiency in a manufacturing company	Robotics and Computer-Integrated Manufacturing	Mexico	Estudo de caso	Econômica
9	2019	Process optimization using collaborative robots - comparative case study	IFAC-PapersOnLine	França	Estudo de caso	Econômica
10	2016	Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction	Robotics and Computer-Integrated Manufacturing	França	Experimentos	Econômica

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.1. Vantagens econômicas obtidas com uso de cobot

O aspecto econômico foi tratado em praticamente todos os artigos selecionados. Apesar de não tratar diretamente a parte financeira, em muitos artigos foram apresentados ganhos indiretos, como de produtividade.

Cohen *et al.* (2022), realizaram um estudo de caso em Israel que analisou o retorno do investimento da implantação do cobot por meio de uma análise comparativa do processo realizado por humano e por Cobot. Os resultados deste estudo indicaram que o retorno seria de \$612.500 e que seria os custos de implementação do cobot para ser viável deveria ser no máximo \$250.000, neste caso como $\$612.500 > \250.000 a implementação é justificada.

Dimitrokalli *et al.* (2020), apresentou que o tempo médio de conclusão do processo do estojo assistido pelo cobot é de 303,3 segundos, enquanto sem o cobot é de 313,6 segundos, ou seja, a montagem com cobot é mais rápido, gerando uma vantagem de produtividade.

Durante a pandemia aumentou a demanda por ventiladores mecânicos para uso em pacientes com covid-19, o uso de cobots na produção foi uma alternativa utilizada pelas indústrias. Esse recurso, possibilitou reduzir o tempo total do processo e garantir o volume de produção necessário (MALIK; MASOOD; KOUSAR, 2021).

Román Ibáñez *et al.* (2021), propõem a aplicação de cobot em um processo de bobinamento de arames. No estudo de caso o tempo de ciclo estudado reduziu de 38 para 28 segundos. Para comparação, a atividade manual é capaz de criar no máximo 757 bobinas de arame em um único turno, enquanto o método proposto é capaz de produzir 1028.

Cherubini *et al.* (2016), abordaram que se o cobot for implementado com sucesso em um processo de fabricação o retorno sobre o investimento pode ser alcançado rapidamente. No experimento realizado em uma empresa automotiva a economia poderia cobrir o custo de hardware e de configuração em aproximadamente um ano.

Quanto à produtividade da empresa, os resultados de validação do processo utilizando cobot revelaram que o tempo de ciclo diminuiu 15,46%, passando de 9,7 s para 8,2 s por peça. Isso representou um aumento de produtividade em 18,3% (REALYVÁSQUEZ-VARGAS *et al.*, 2019).

Segundo Mura e Dini (2019) o processo colaborativo entre o homem e o robô representa uma revolução significativa no meio industrial, ponto importante para implementação deste recurso é combinar a produtividade com o robô e a flexibilidade do humano.

Durante a análise sistemática observou-se que os artigos relacionados à aplicação de cobot em sua grande maioria apresentam ganhos de produtividade. Um exemplo é o artigo publicado pelos autores Salunkhe *et al.* (2019), na qual demonstrou através de um experimento no processo de torque de porcas de rodas uma redução no tempo de ciclo de 145 segundos na operação manual para 107 segundos utilizando cobot.

Em um outro artigo publicado pelos autores (QUENEHEN; POCACHARD; KLEMENT, 2019) foi apresentado a otimização do processo utilizando cobot. Neste estudo de caso foi abordado também conceitos e ferramentas de manufatura enxuta. Os autores apresentaram a introdução do cobot em atividades que não agregam valor, neste caso aplicado à movimentação de peças. Com isso o tempo transferido do operador para o COBOT apresentou ganho no tempo de ciclo final partindo de 44,5 segundos para 42,1 segundos. A metodologia adotada foi o estudo de caso realizado na França no ano de 2019.

Uma vez que cobots possui mecanismos de segurança próprio, a instalação de dispositivos externos de segurança não é necessária. Desse modo ao estabelecer estações compostas por trabalhadores humanos e cobot, as vantagens da fabricação manual e automatizada podem ser realizadas em um sistema de produção combinado a baixos custos (WECKENBORG; SPENGLER, 2019).

Os artigos selecionados para análise sistemática apresentado no quadro 1, apresentaram ganhos econômicos, sociais, qualidade de produto e produtividade, com a aplicação de cobot em processo de montagem.

2.3.2. Vantagens sociais obtidas com uso de cobot

O aspecto social foi abordado em alguns artigos principalmente relatando os ganhos ergonômicos. Román ibáñez *et al.* (2021), abordaram a aplicação de cobot no processo de organização e amarração de chicotes elétricos. Os ganhos ergonômicos foram avaliados através da ferramenta RULA. No processo manual, a pontuação foi avaliada como 7 na escala RULA, o que indica risco alto, após a alteração, foi

realizado nova avaliação a pontuação reduziu para 3. A ferramenta RULA trabalha em uma escala de 1 risco baixo até 7 risco alto.

Zhang *et al.* (2021a), comparou dois fluxos de trabalho manual e o colaborativo. No processo manual o operador realizava multitarefas aumentando o tempo de exposição ao risco da operação. Já no fluxo colaborativo foi introduzido cobot com o intuito de mitigar os riscos ergonômicos.

O uso de cobots não só melhorou significativamente a segurança dos funcionários, mas aproximou a fábrica de zero acidentes (COHEN *et al.*, 2022).

Em um cenário de produção Dimitrokalli *et al.* (2020), demonstraram que o risco médio total calculado para toda a montagem sem o envolvimento do cobot é igual a 111,1 enquanto com o envolvimento do cobot reduziu para 84,2. Isso significa que a introdução do braço robótico no processo de montagem reduz a tensão do pulso em 24,21%.

Durante a pandemia causada pela Covid-19, manter estratégias de distanciamento social nas áreas industriais foi um desafio. Em um cenário de produção de ventiladores hospitalares a utilização de cobots apoiou nas estratégias de distanciamento social dentro dos processos (MALIK; MASOOD; KOUSAR, 2021).

A operação manual comparada à colaborativa aumenta a exposição ao risco ergonômico (ZHANG *et al.*, 2021a).

2.3.3. Vantagens para a qualidade do produto obtidas com uso de cobot

Os cobots podem ser utilizados em tarefas de inspeção de qualidade integrados com outras tecnologias como o sistema de visão. Uma vez que os padrões estão bem definidos, o trabalho entre cobot e o sistema de visão podem reduzir drasticamente o erro durante a inspeção.

Salunkhe *et al.* (2019) apresentaram em uma operação de torque de porca de rodas os ganhos em qualidade ao comparar o processo manual com a aplicação do cobot. Nesse experimento, o índice de qualidade aumentou de 85% para 99,17%. Neste mesmo artigo abordam que ao combinar cobots com outras tecnologias possibilita também se comunicar com os funcionários para alcançar um sistema de montagem eficaz, melhorando a qualidade do produto.

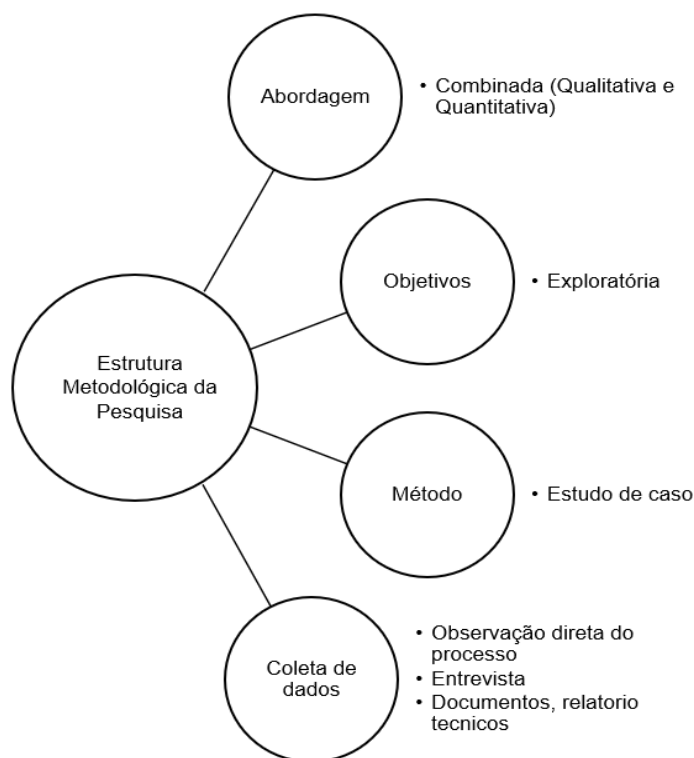
3. METODOLOGIA DE PESQUISA

O estudo, tem como foco principal a apresentação da aplicação de cobot em processos de montagem em uma empresa de motor diesel. Dessa forma, o método de pesquisa utilizado foi o estudo de caso. O estudo de caso é uma investigação empírica que investiga um fenômeno contemporâneo em profundidade e em seu contexto de mundo real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto puderem não ser claramente evidentes (YIN, 2015).

Em relação à sua natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada, a pesquisa aplicada, de campo ou empírica é aquela utilizada com o objetivo de conseguir informações e ou conhecimentos acerca de uma hipótese que se queira comprovar (MARCONI; LAKATOS, 2010).

Essa pesquisa se caracteriza como uma pesquisa exploratória com uma abordagem combinada (quantitativa e qualitativa). Segundo Yin (2015), como um estudo exploratório, qualquer um dos métodos de pesquisa pode ser usado, por exemplo: Um levantamento exploratório, um experimento exploratório ou um estudo de caso exploratório. A figura 3 representa a estrutura metodológica da pesquisa.

Figura 3 - Estrutura metodológica da pesquisa



Fonte: Adaptado de Yin (2015)

3.1. MÉTODO PARA REVISÃO DA LITERATURA

Neste projeto de pesquisa a metodologia da pesquisa foi realizada em 2 etapas. Na primeira etapa foi realizada a pesquisa bibliográfica, na qual foram buscados artigos a fim de obter referências sobre o tema “Aplicação de cobot em processo de montagem de motores” e na segunda etapa foi realizada a revisão sistemática da literatura.

Como critério de seleção dos artigos, a primeira etapa para realização das buscas foi a definição das palavras chaves assim como suas cognatas.

Nesta pesquisa a metodologia adotada seguiu as seguintes etapas:

- Conjunto de palavras chaves.
- Bases de dados pesquisadas.
- Motivos de exclusão.
- Critério de seleção.
- Artigos selecionados e.
- Perguntas de pesquisa.

Assim como em todas as pesquisas, o valor de uma revisão sistemática depende do que foi feito, do que foi encontrado e da clareza do relatório, o que pode variar em termos de qualidade e limitar a capacidade dos leitores de avaliar seus pontos fortes e fracos (MOHER *et al.*, 2010).

Após a elaboração do título, foram definidas as palavras chaves e suas cognatas, assim como a realização das combinações. Perguntas básicas para revisão bibliográfica e perguntas específicas para revisão sistemática entraram como parte final para elaboração do trabalho de pesquisa.

Para a realização da pesquisa com o tema análise econômica e social do uso de cobot em montagem de motores de combustão interna foram definidas as seguintes palavras chaves conforme o quadro 2:

Quadro 2 - Quadro de palavras chaves e suas cognatas

Palavras chaves
<u>Idioma Português</u> Robô colaborativo e montagem de motores <u>Idioma inglês:</u> “Collaborative robot” e “engine assembly”
Cognatas:
<u>Idioma Português:</u> Cobot, Manufatura, Produção de Motor e Torque de parafuso <u>Idioma Inglês:</u> Cobot, Manufacturing, Engine Production e Screw Torque

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o agrupamento das palavras chaves e suas cognatas deram origem a 8 grupos de combinações. Esse agrupamento auxiliou a melhor explorar o tema de pesquisa. O quadro 3 apresenta os agrupamentos das palavras chaves e suas cognatas.

Quadro 3 - Agrupamento das palavras chaves e suas cognatas

Idioma Português:
"Robô Colaborativo" + "Montagem de motor"
"Robô Colaborativo" + "Manufatura"
"Robô Colaborativo" + "Produção de Motor"
"Robô Colaborativo" + "Torque de parafuso"
"Cobot" + "Montagem de motor"
"Cobot" + "Manufatura"
"Cobot" + "Produção de Motor"
"Cobot" + "Torque de parafuso"

Idioma Inglês:
"Collaborative robot" + "Engine assembly"
"Collaborative robot" + "Manufacturing"
"Collaborative robot" + "Engine production"
"Collaborative robot" + "Screw torque"
"Cobot" + "Engine assembly"
"Cobot" + "Manufacturing"
"Cobot" + "Engine production"
"Cobot" + "Screw torque"

Fonte: Elaborado pelo autor.

A busca nas bases de dados foi realizada em setembro de 2021 e o total de artigos retornados foi de 287. Abaixo seguem descritas as bases de dados pesquisadas.

- Bases para pesquisar
- Science direct
- Emerald
- Proquest
- Wiley Library
- Compendex
- Scopus
- Scielo
- Capes
- Revista Exacta
- Google Scholar

Figura 4 - Base de dados pesquisada

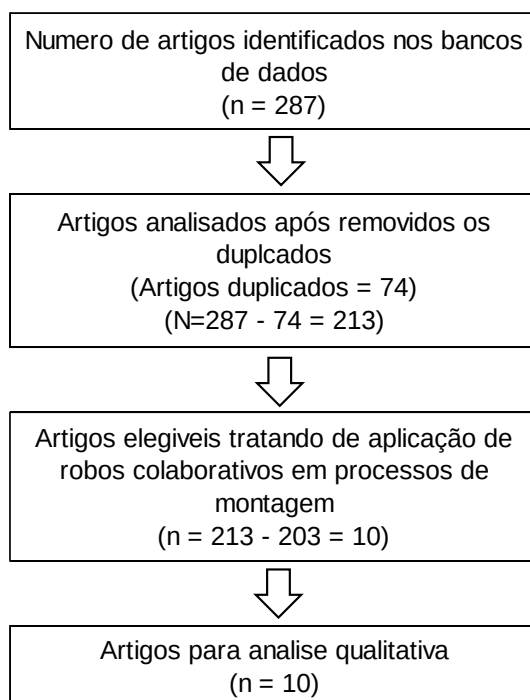


Fonte: Elaborado pelo autor.

As pesquisas nas bases de dados retornaram 287 artigos, 74 foram excluídos pois estavam duplicados. Como metodologia para seleção dos artigos foi utilizado o fluxo de revisão sistemática PRISMA (MOHER *et al.*, 2010).

A figura 5 apresenta os artigos selecionados para revisão sistemática de acordo com o método PRISMA.

Figura 5 - Fluxo de Seleção dos artigos



Fonte: Adaptado do modelo PRISMA (MOHER *et al.*, 2010).

A revisão bibliométrica e sistemática foi baseada no método utilizado por (OLIVEIRA NETO *et al.*, 2018). Primeiramente, foi realizada a pesquisa nas bases de dados, na qual foram baixados 287 artigos, 74 artigos foram removidos, pois estavam duplicados, desta forma 213 artigos foram avaliados.

Os 213 artigos analisados, 10 abordavam aplicação de cobot em processos de montagem, os 203 artigos restantes abordam a aplicação de cobot em área de usinagem, solda, pintura, serviços, machine learning e manufatura de modo geral sem especificar a área. Pini e Leali (2019), abordaram a aplicação de cobot em processo de polimento no setor de usinagem (7 artigos). Javaid *et al.*, (2021), abordam o potencial significativo da aplicação de cobot na manufatura, assim como em outros 135 artigos que mencionam manufatura de forma geral e não explorando diretamente a aplicação de cobot em processo de montagem.

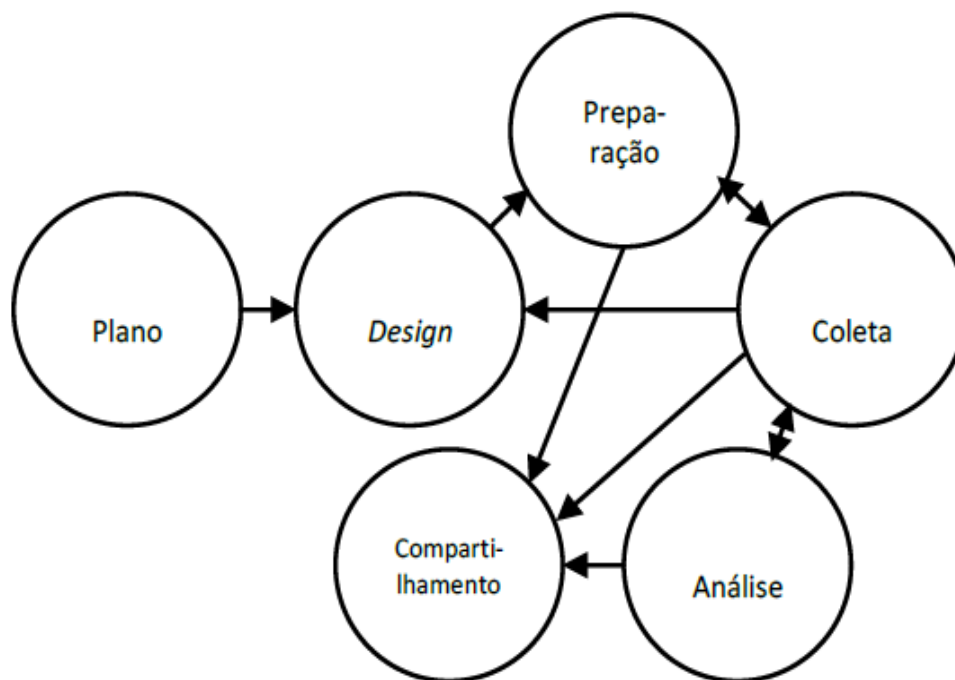
Outros 16 artigos abordavam *machine learning* na aplicação de cobot. No artigo de Eyam *et al.*, (2021) explora a interação entre o homem e o robô orientada pela emoção humana. Neste experimento foi utilizado sensores na área da cabeça, na qual o cobot conseguia identificar momentos de estresse ou fadiga do operador.

3.2. MÉTODO DE ESTUDO DE CASO

Neste projeto foi adotado como método de pesquisa o estudo de caso, uma pesquisa exploratória determinada com o intuito de adquirir mais conhecimento sobre um determinado fenômeno. Para Yin (2015) o estudo de caso é um estudo empírico que investiga um fenômeno atual no contexto da vida real, considerando que as fronteiras entre o fenômeno e o contexto em que se insere não são claras.

Segundo Cauchick Miguel e Sousa (2012), este estudo de caso é do tipo longitudinal, pois investiga o presente. Para Yin (2015) a realização da pesquisa de estudo de caso é um processo linear, porém iterativo. A figura 6 representa o fluxo e a interação entre as etapas.

Figura 6 - Etapas para realização do estudo de caso



Fonte: Adaptado de Yin (2015)

A primeira etapa para o processo de estudo de caso é o desenvolvimento do plano, no qual consiste na elaboração das questões de pesquisa. Para Yin (2015), se tratando de pesquisas qualitativas, as questões devem ser "como" ou "por que". Yin (2015) também comenta que o foco do estudo deve ser um fenômeno (um "caso") contemporâneo, social, complexo e em seu contexto no mundo real, para o qual o pesquisador tem pouco ou nenhum controle sobre os eventos e a fronteira entre o contexto e o fenômeno não são claramente evidentes.

A segunda etapa para o projeto de pesquisa é o *design*, Yin (2015) define que o projeto de pesquisa é a lógica que vincula os dados a serem coletados e as conclusões a serem tiradas das questões iniciais do estudo. Ele também aborda que todo estudo empírico tem um projeto de pesquisa implícito, se não explícito, e que a articulação de uma "teoria" sobre o que está sendo estudado e o que deve ser aprendido ajuda a reforçar um projeto de pesquisa, quando se faz uma pesquisa de estudo de caso. Além disso, boas proposições teóricas também estabelecem as bases para os resultados do estudo de caso para outras situações, fazendo generalizações analíticas em vez de estatísticas.

Considerando o escopo do projeto de pesquisa, o método escolhido para a coleta de dados foi a observação da montagem e análise de documentos de processo.

Dentre os documentos analisados estão: Relatórios com estudos de tempo da operação, indicadores de performance de produtividade e qualidade.

Segundo Yin (2015) com relação às habilidades, muitas pessoas acreditam, incorretamente, que estão suficientemente habilitadas para realizar pesquisas de estudo de caso porque consideram o método fácil de usar. Na realidade, a pesquisa de estudo de caso está entre os tipos mais difíceis de pesquisa, devido à ausência de procedimentos bem documentados.

A análise econômica foi possível obter através das análises de ganho de eficiência comparando o processo atual com a aplicação do cobot na operação de torque na linha de montagem de motores. Na avaliação social, foi demonstrado o ganho com a utilização de um sistema de cálculos ergonômicos (sistema Humantech), na qual foi possível mensurar a condição de trabalho do montador antes e depois da implementação do cobot.

A análise dos dados consiste no exame, na categorização, na tabulação, no teste ou nas evidências recombinações de outra forma, para produzir descobertas baseadas em empirismo (YIN, 2015). Nesta mesma abordagem Yin comenta que a análise da evidência de estudo de caso é especialmente difícil, porque as técnicas ainda não foram bem definidas. Você pode começar sua própria análise “brincando” com os dados e procurando padrões, *insights* e conceitos promissores, sendo o objetivo definir suas prioridades sobre o que analisar e o porquê da análise.

Durante esta pesquisa, a análise de dados avaliou os ganhos obtidos com a implementação do cobot em processo de montagem de motores.

3.3 FUNÇÃO DO RESFRIADOR DE ÓLEO

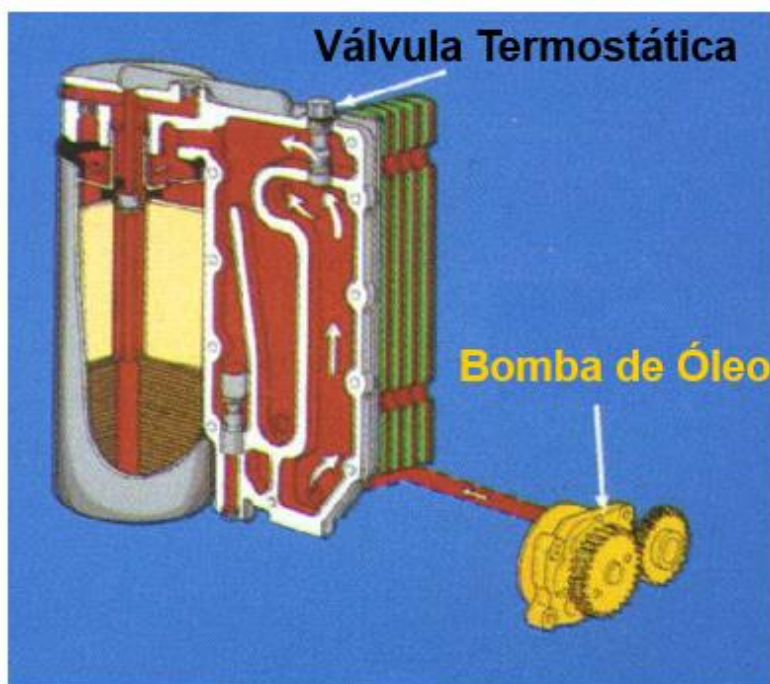
O motor diesel, para trabalhar de forma adequada tem que funcionar em uma temperatura ideal ou em uma temperatura média. Por isso, existe o sistema de arrefecimento no motor, o líquido circula pelas galerias do bloco do motor e cabeçote, tirando o calor dessas partes levando até o radiador para realizar a troca de calor com a ventilação externa, após a troca de calor esse líquido volta a circular pelas galerias realizando novamente a troca.

O óleo lubrificante também deve trabalhar em uma faixa de temperatura ideal, dessa forma o resfriador tem um papel muito importante no funcionamento do motor,

sua função é realizar o resfriamento de óleo lubrificante através de troca térmica com o líquido de arrefecimento que passa pelas galerias do bloco do motor.

A bomba envia o óleo para o resfriador, esse óleo circula pela galeria interna do componente, após o resfriamento passa por um processo de filtragem para retirada de possíveis impurezas. Depois é distribuído pelas galerias de óleo do bloco conforme demonstrado na figura 7.

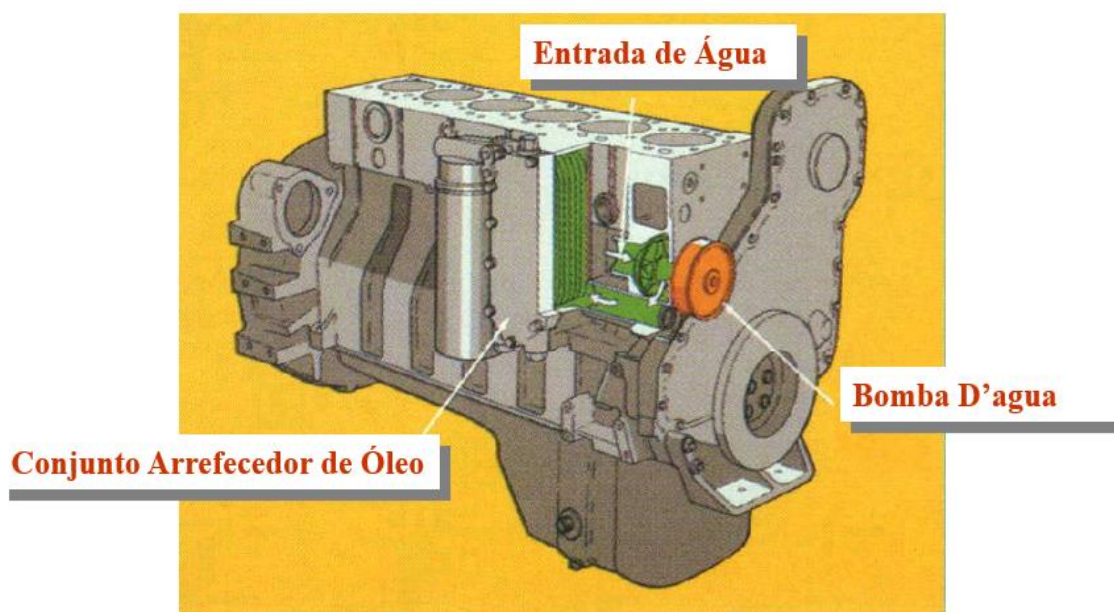
Figura 7 - Fluxo do óleo na galeria do resfriador



Fonte: Empresa pesquisada

Na parte externa do resfriador circula o líquido de arrefecimento, conforme mencionado anteriormente o líquido ao retornar no sistema pelo radiador entra com uma temperatura mais baixa realizando assim a troca de calor. Na figura 8 é possível observar o fluxo do líquido de arrefecimento na galeria do bloco.

Figura 8 - Fluxo de água pela galeria do bloco



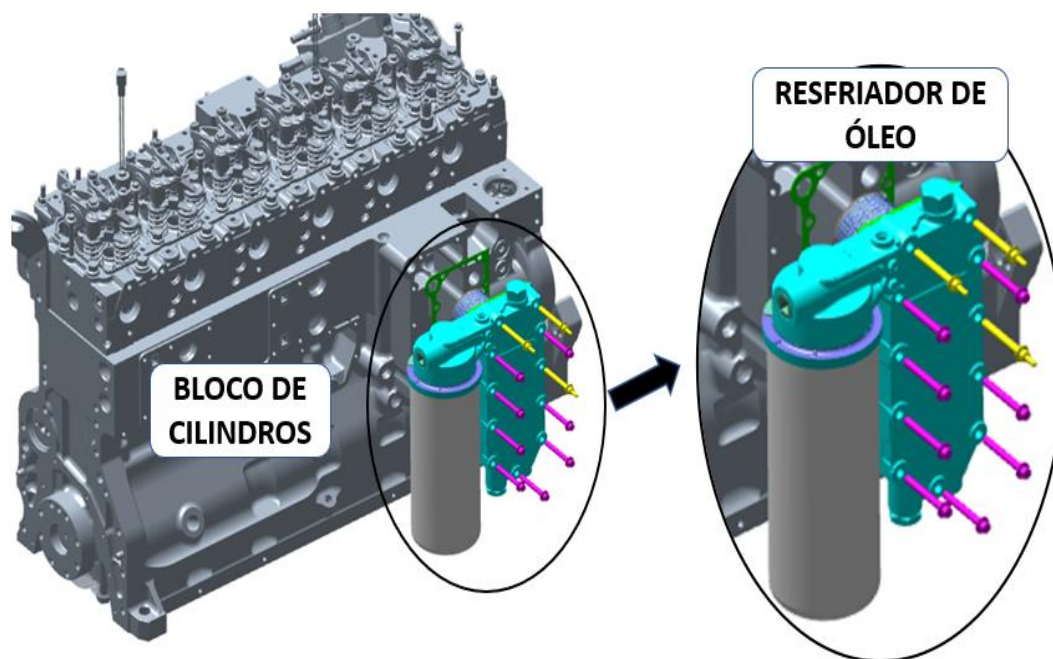
Fonte: Empresa pesquisada

No conjunto, temos o sistema de óleo passando internamente no resfriador e o sistema de arrefecimento passando pelo lado externo do resfriador, garantindo o resfriamento adequado para o funcionamento do motor.

3.4. PROCESSO ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO COBOT

O processo estudado consiste na montagem do conjunto resfriador de óleo no bloco de cilindro em uma linha de montagem de motores diesel. O conjunto é fixado no bloco de cilindros através de parafusos e prisioneiros conforme apresentados na figura 9.

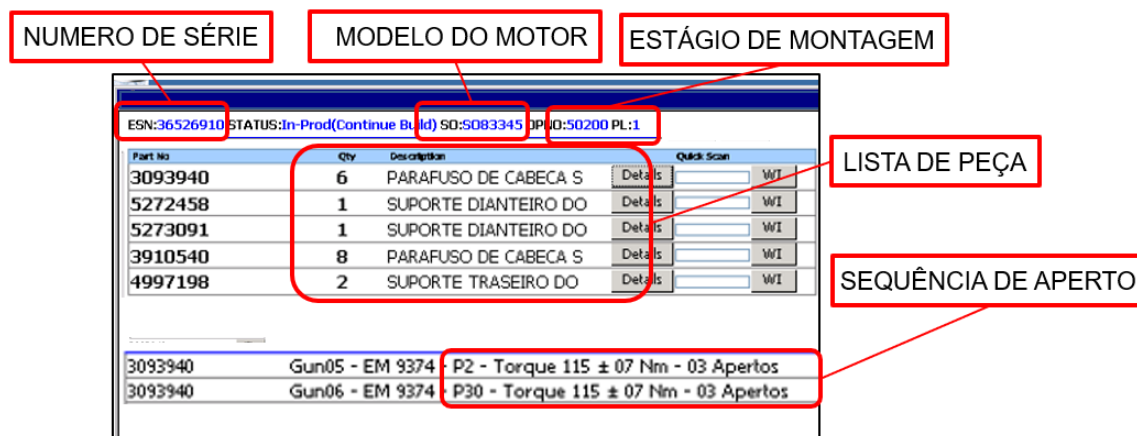
Figura 9 - Apresentação de montagem do conjunto



Fonte: Empresa pesquisada

No posto de trabalho, é disponibilizado um computador industrial com um software utilizado pela produção. Este software tem a função de exibir para o montador quais as peças ele deve utilizar para o motor que está no processo, além da sequência de montagem, o modelo do motor, o número de série do motor, assim como os dispositivos necessários, conforme demonstrado na figura 10.

Figura 10 - Tela do computador industrial com o software utilizado pela produção



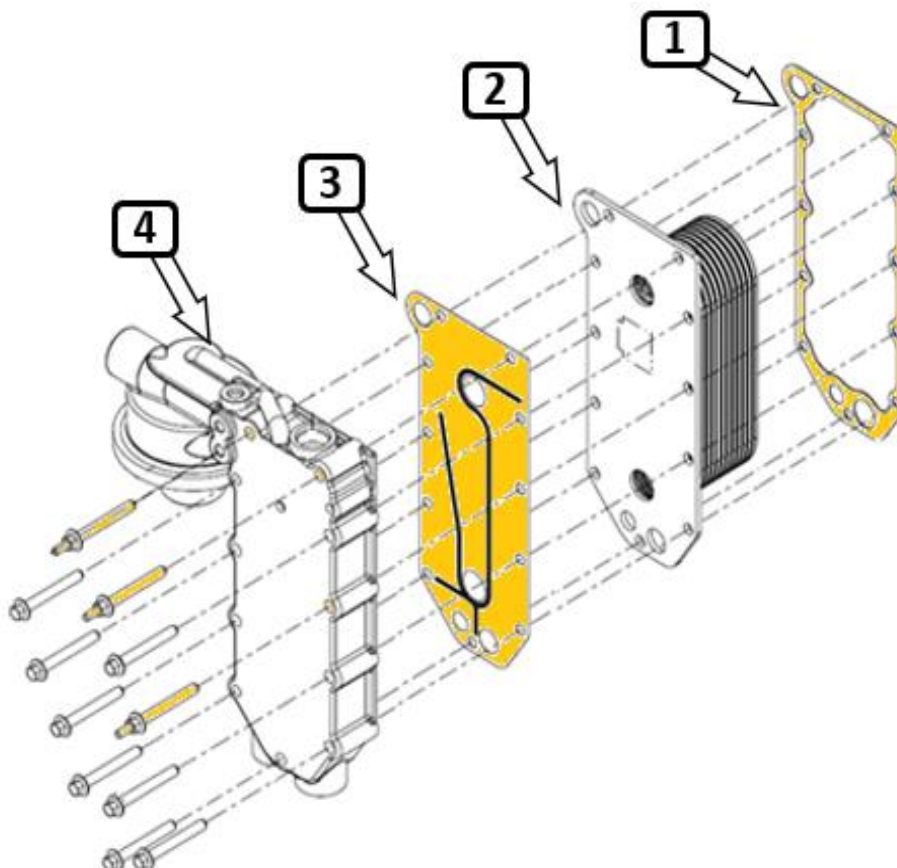
Fonte: Empresa pesquisada

Neste processo de montagem, o operador primeiro posiciona a junta e o elemento resfriador, na sequência posiciona a junta e o conjunto carcaça do

resfriador e filtro e por último aponta os parafusos e os prisioneiros no resfriador de óleo.

A sequência de montagem está ilustrada na figura 11.

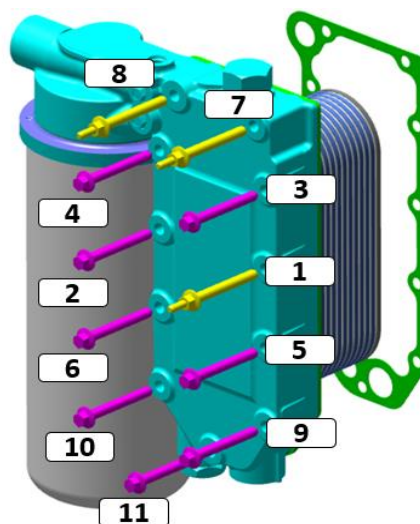
Figura 11 - Apresentação da sequência de montagem dos componentes



Fonte: Empresa pesquisada

Devido ao tamanho do resfriador de óleo, como requisito do produto para o processo é necessário realizar os apertos dos parafusos em uma sequência pré-determinada, o torque para esse produto é de 33Nm. Essa sequência é requerida para garantir que o resfriador de óleo esteja devidamente assentado e alinhado sobre a junta evitando assim possíveis vazamentos de óleo ou água no conjunto. A figura 12 apresenta a sequência de aperto especificada pela engenharia de produto.

Figura 12 - Apresentação da sequência de aperto dos parafusos



Fonte: Empresa pesquisada

O motor se desloca pela linha de montagem através de uma esteira com roletes revestidos em borracha movimentados por motores elétricos. O recurso disponível em cada estágio de operação dependerá do tipo de atividade de montagem que o operador irá executar. Para a montagem do resfriador de óleo o operador tem disponível alguns pinos guias para posicionar o resfriador e a ferramenta eletrônica para torque dos parafusos e os prisoneiros do conjunto no bloco do motor. Na figura 13 é possível ter uma visão geral do estágio de montagem.

Figura 13 - Visão geral do processo de montagem



Fonte: Empresa pesquisada

4. RESULTADOS

Neste estudo de caso, tem como abordagem a implementação de um cobot em um processo de montagem de motores.

O estudo de caso foi desenvolvido em uma empresa multinacional americana de grande porte do ramo de fabricação de motores diesel. Na década de 70, iniciou suas atividades no estado de São Paulo e atualmente conta com aproximadamente 1100 funcionários. Além da fabricação de motores diesel ela também atua em 4 outros segmentos complementares, tais como: Distribuição, fabricação de componentes (turbo compressores e sistema de pós-tratamento), geradores e novas energias com foco em hidrogênio e eletrificação. Possui certificações de qualidade (IATF 16949), sistema de gestão ambiental (ISO14001) e segurança e saúde ocupacional (OHSAS 18001).

A empresa está passando por uma transformação tendo como objetivo implementação de tecnologias habilitadores da indústria 4.0, promovendo o desenvolvimento das pessoas e dos processos. Além disso, ela oferece oportunidades de desenvolvimento de carreira profissional e tem um forte programa de inclusão social com foco em atrair e reter profissionais do mercado de trabalho. E dispõem de projetos à sociedade trazendo melhor qualidade de vida às pessoas.

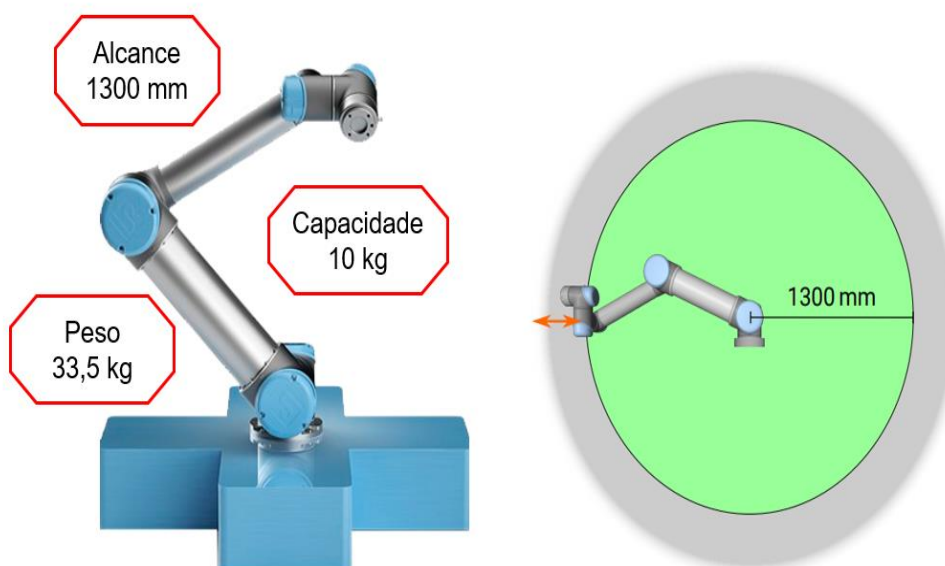
4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO COBOT

Na busca por reduzir falhas no processo de torque dos parafusos do conjunto resfriador de óleo, a fábrica precisava automatizar essa operação em tempo hábil, com recursos financeiros pré-determinados pela matriz e sem grandes modificações no chão de fábrica. Um outro requisito necessário é que a solução pudesse estar em operação lado a lado com o operador sem apresentar riscos à saúde ou segurança no local de trabalho.

Durante a busca por soluções que atendesse o layout da linha de montagem, a empresa estudada implementou um cobot modelo UR10 em sua linha produtiva na tarefa de torque dos parafusos do conjunto resfriador de óleo. Neste estágio a atividade era pouco ergonômico, já que o operador era exposto a um processo extremamente repetitivo. Apesar de não ser um estágio gargalo, quando estudado junto com a pré-montagem do resfriador foi identificado uma grande oportunidade no

ganho de produtividade, pois com o cobot, foi possível liberar o montador de parte das tarefas e adicionar parte da atividade do montador da pré-montagem. O cobot UR10 adotado pela empresa como solução para o processo tem uma capacidade de carga de 10 kg e alcance de 1300 mm. O peso do hardware é de 33,5 kg, conforme demonstrado na figura 14.

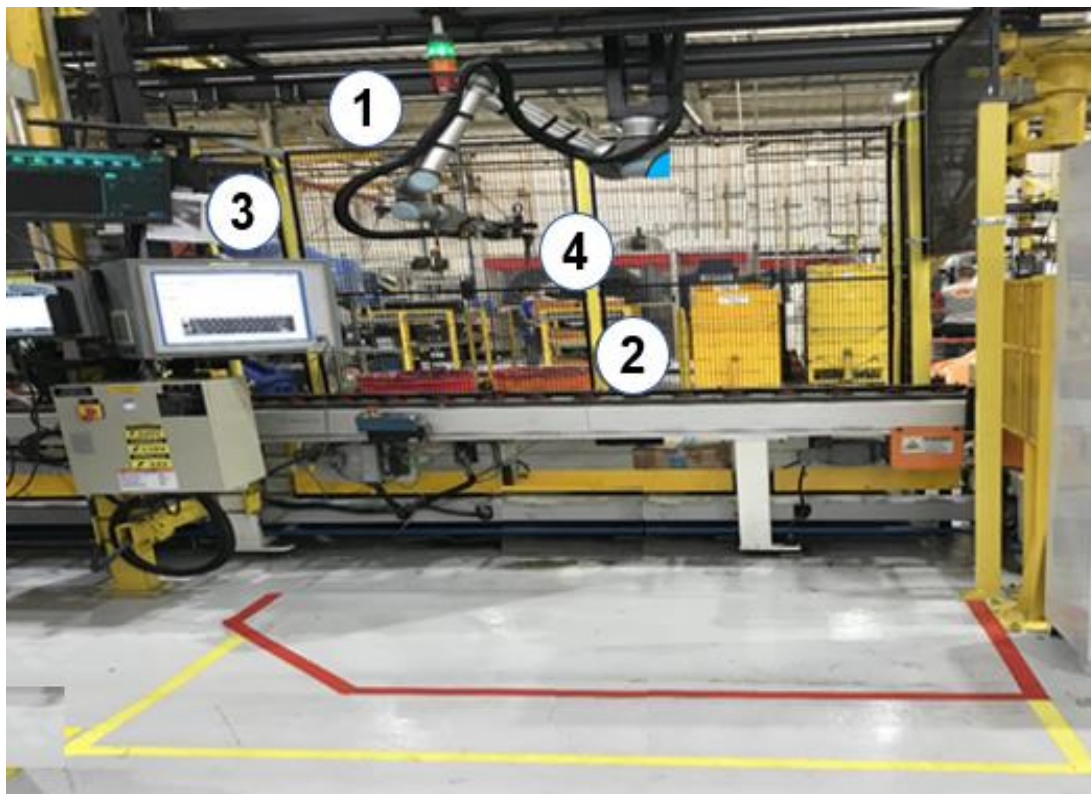
Figura 14 - Visão geral do cobot modelo UR10.



Fonte: Empresa pesquisada

A empresa procurava por uma tecnologia que atendesse às necessidades do processo sem grandes investimentos. Com esse objetivo, o cobot foi integrado aos recursos já existentes. Essa operação era composta por uma esteira movimentada por servomotores, uma ferramenta eletrônica para execução do torque dos parafusos do resfriador de óleo e o painel com o sistema de manufatura, além de todo o sistema de segurança da linha. A arquitetura da linha com os recursos está demonstrada na figura 15.

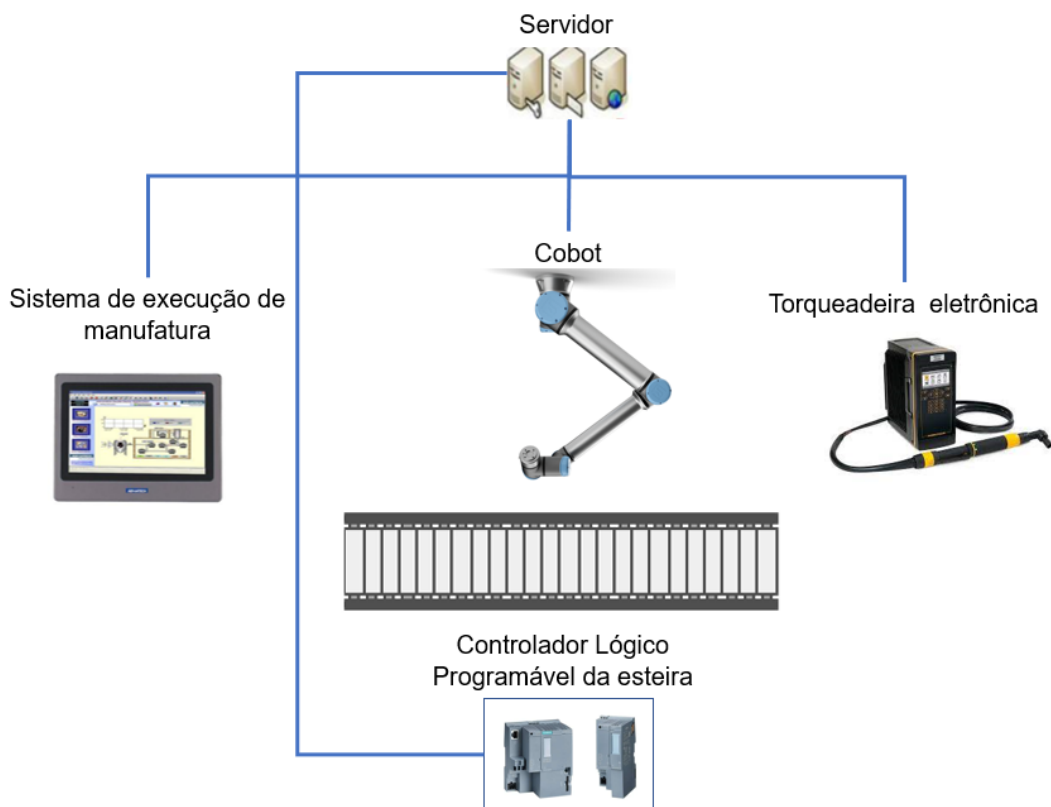
Figura 15 - Visão geral da arquitetura da linha.



Fonte: Empresa pesquisada

Uma arquitetura de rede de comunicação também foi necessária para que os equipamentos trabalhassem de forma integrada e sincronizada. Para ser integrado à rede de comunicação, a esteira é gerenciada por um controlador lógico programável. Todos os demais equipamentos que compõem esta estrutura do processo têm capacidade de trocar informações com o servidor, fazendo com que cada comando aconteça no momento oportuno de cada tarefa. A figura 16 demonstra a estrutura de comunicação entre os equipamentos.

Figura 16 - Estrutura de comunicação entre os equipamentos.

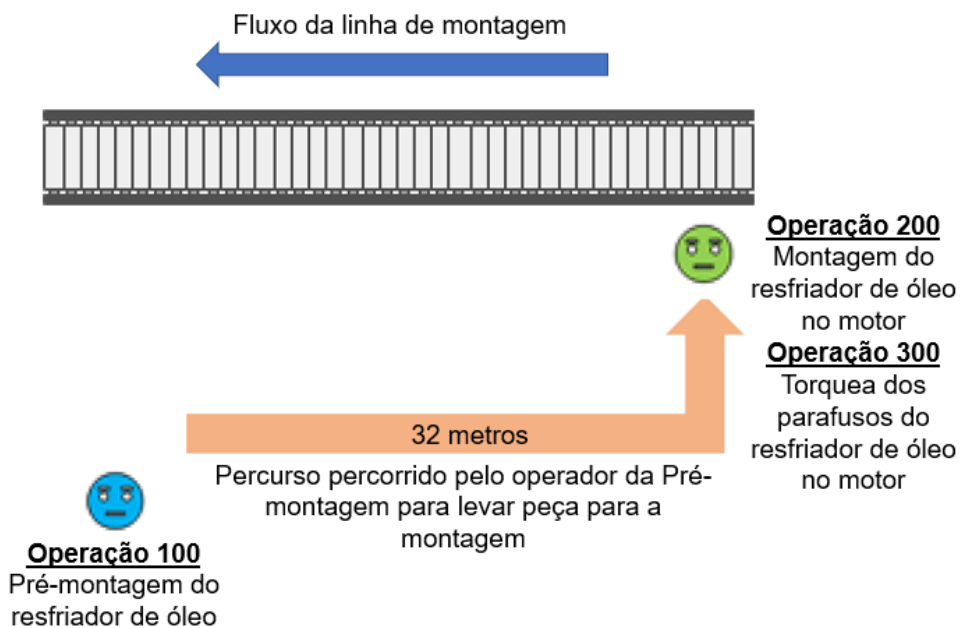


Fonte: Empresa pesquisada

4.2 CAPACIDADE DO PROCESSO

Antes da montagem do resfriador de óleo no bloco do motor, é necessário realizar algumas pré-montagens, entre elas podemos considerar bujões, molas, válvula de alívio e válvula de passagem de óleo. A pré-montagem é realizada em um posto de trabalho separado da linha principal. Neste caso, após a conclusão deste processo, o operador tem que se locomover e levar a peça até a estação de montagem final, conforme figura 17.

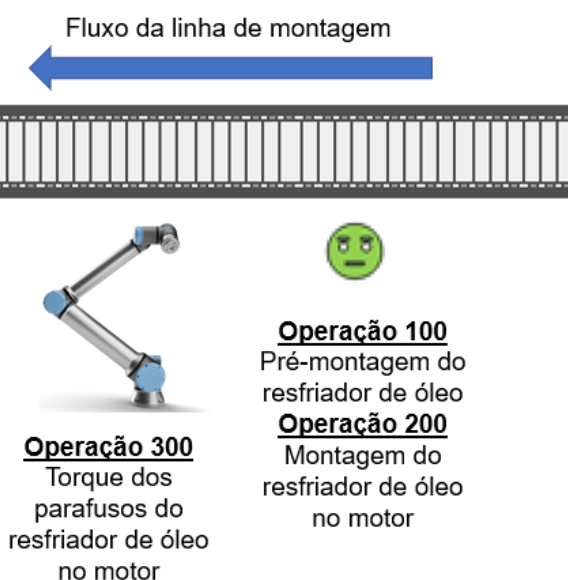
Figura 17 - Processo antes do cobot.



Fonte: Empresa pesquisada

Com a introdução do cobot no processo, foi possível aproximar a pré-montagem (operação 100) da montagem do resfriador de óleo no motor (operação 200), uma vez que parte da atividade da operação 300 será realizada pelo cobot, conforme a figura 18.

Figura 18 - Processo após implementação do cobot.



Fonte: Empresa pesquisada

Para atender a demanda atual do cliente o processo deve ser realizado em até 4,5 minutos. O tempo de pré-montagem é de 1,5 minutos e 1,3 minutos para transportar a peça até a linha principal. A montagem do resfriador no bloco do motor é de 1,0 minuto e a operação de torque 1,7 minutos, somando o total de 5,5 minutos sendo necessário 2 montadores para atender a demanda do cliente.

Após a implementação do cobot, o operador inicia a pré-montagem do resfriador de óleo (1,5 minutos), em seguida a montagem do resfriador de óleo no motor (1,0 minuto) e aciona o cobot para iniciar o processo de torque (1,7 minutos).

A tabela 1 apresenta os cenários, antes da implementação do cobot e após a implementação do cobot.

Tabela 1 - Balanceamento de linha para atender a demanda do cliente

Cenário 1 (2 montadores)					
Operação	Montador	Descrição	Tempo (minutos)		
100	1	Pré-montagem do resfriador de óleo	1,5		
		Transporte		1,3	
200	2	Montagem do resfriador de óleo no motor		1,0	
300		Torqueamento dos parafusos do resfriador de óleo no motor			1,7
Tempo total = 5,5 minutos					

Cenário 2 (1 montador e 1 cobot)					
Operação	Montador	Descrição	Tempo (minutos)		
100	1	Pré-montagem do resfriador de óleo	1,5		
200	Montador	Montagem do resfriador de óleo no motor		1,0	
300	Cobot	Torqueamento dos parafusos do resfriador de óleo no motor			1,7
Tempo total = 4,2 minutos					

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme apresentado na tabela 1, com esse novo cenário foi possível disponibilizar uma mão-de-obra para realizar outras atividades na montagem, demonstrando ganhos de eficiência ao processo produtivo.

4.3 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise da introdução do cobot na linha de montagem foi iniciada por meio da avaliação de viabilidade econômica deste modelo de tecnologia. Para isso, foram coletados custos operacionais e dados de investimentos.

O investimento para este projeto foi exclusivamente a compra do cobot e sua integração na linha de montagem. O custo do cobot foi de R\$260.000,00 e a integração na linha de montagem foi de R\$80.000,00.

Neste caso o investimento total do projeto foi de R\$340.000,00.

A análise dos ganhos econômicos levou em conta a redução do custo operacional com a introdução do cobot. O custo hora operacional para a empresa é de R\$ 54,17. A linha trabalha 16 horas por dia em 2 turnos, desta forma o custo diário de produção é de R\$866,72. A empresa trabalho 20 dias no mês, 12 meses no ano, na qual apresentou um ganho de R\$17.334,40 mês e R\$208.012,80 por ano. O resumo com os ganhos está demonstrado na tabela 2.

Tabela 2 - Custo operacional (ano)

Descrição dos custos		
Custo operacional / hora	R\$	54,17
Custo operacional / dia (16 horas por dia)	R\$	866,72
Custo operacional / mês (20 dias por mês)	R\$	17.334,40
Custo operacional / ano (12 meses por ano)	R\$	208.012,80

Fonte: Elaborado pelo autor.

O cobot apresenta um consumo baixo de energia elétrica, cerca de 0,350 kWh, o fabricante chega a comparar seu consumo com um eletrodoméstico. A figura 19 demonstra o baixo consumo de energia pelo cobot.

Figura 19 - Consumo de energia elétrica do cobot



Fonte: Empresa pesquisada

O custo, apesar de baixo, também foi considerado na análise econômica. A fábrica produz aproximadamente 48000 motores ano, o cobot é utilizado 1,7 minutos por ciclo de motor, dessa forma o cobot é utilizado cerca de 81.600 minutos ou 1.360 horas por ano. O custo kWh de energia elétrica pago pela empresa é de R\$0.92, e o total anual de R\$437.92.

Os dados utilizados na avaliação para o consumo do cobot estão mostrados na tabela 3.

Tabela 3 - Custo total de energia elétrica consumida pelo cobot (ano)

Descrição dos custos	
Total de motores produzidos (ano)	48000
Tempo de utilização do cobot por motor (minutos)	1,7
Tempo total de utilização do cobot por ano (minutos)	81600
Tempo total de utilização do cobot por ano (horas)	1360
Consumo cobot (kwh)	0,35
Custo kWh (R\$)	0,92
Custo total de energia elétrica consumida pelo cobot (ano)	R\$ 437,92

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro custo que está relacionado ao cobot e foi considerado pela empresa é o de manutenção preventiva. Para este caso, como é uma tecnologia nova a empresa optou por contratar o serviço do fabricante. O custo médio mensal do serviço foi de R\$1.800,00 ou R\$ 21.600,00 por ano.

Os valores totais de investimento e a redução operacional por ano estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Custo total de investimento e a redução operacional por ano

Descrição	R\$
Custo do cobot	R\$ 260.000,00
Custo integracao	R\$ 80.000,00
Custo de energia (ano)	R\$ 437,92
Custo contrato de manutencao (ano)	R\$ 21.600,00
Investimento total	R\$ 362.037,92
Redução do custo operacional por ano	R\$ 208.012,80

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na análise do fluxo de caixa apresentou um saldo positivo já no segundo ano. Para a introdução do projeto foi necessário a retirada de R\$362,037.92 do caixa, enquanto os ganhos anuais foram de R\$208.012,80. O fluxo de caixa esta apresentado na tabela 5.

Tabela 5 – Fluxo de caixa

Fluxo de caixa	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3
Investimento total (Cobot e integração)	-340000.00			
Custos energia e manutenção (ano)	-22037.92	-22037.92	-22037.92	-22037.92
Lucro líquido		208012.80	208012.80	208012.80
Fluxo de caixa acumulado	-362037.92	-176063.04	9911.84	195886.72

Fonte: Elaborado pelo autor.

A implantação do cobot gerou redução dos custos operacionais. Com isso, o cálculo de retorno indicou que o investimento realizado na modernização da linha de montagem retornará em um curto tempo. O cálculo de retorno simples (divisão do investimento total pelo lucro líquido) não levou em conta a taxa de juros, conforme apresentado na tabela 6.

Tabela 6 - Cálculo do retorno sobre o investimento

Descrição	R\$
Investimento total	R\$ 362.037,92
Redução do custo operacional por ano	R\$ 208.012,80
Retorno sobre o investimento	1,74 ano

Fonte: Elaborado pelo autor.

O cálculo do retorno sobre o investimento indicou que o valor de R\$362,037.92 para a modernização da linha de montagem será recuperado em 1,74 anos ou 1 ano e 9 meses. Para a empresa quanto menor o tempo de retorno sobre o investimento mais interessante é o projeto, esse foi um dos principais fatores de decisão para a priorização na introdução dessa nova tecnologia ao comparar com outros projetos que também foram solicitados.

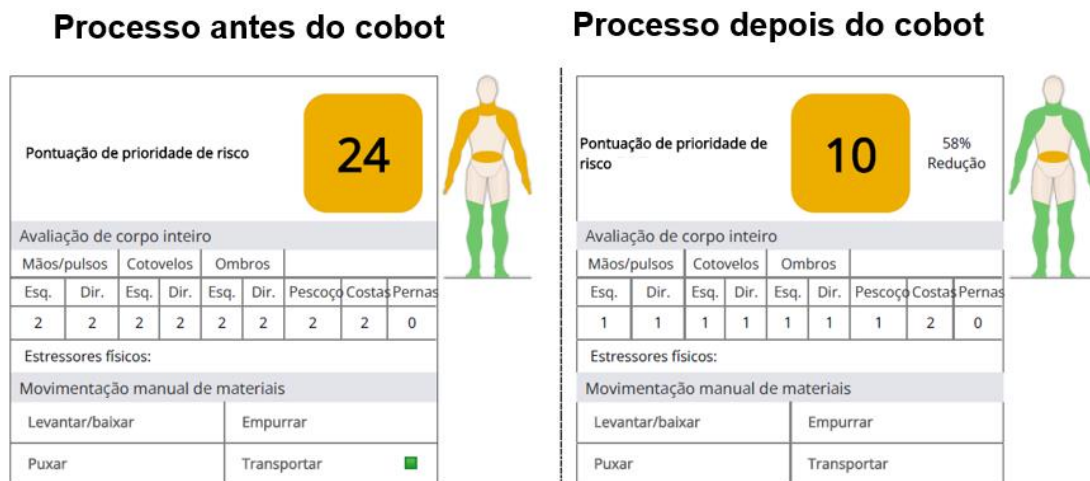
4.4 ANÁLISE ERGONÔMICA DO PROCESSO

O fator ergonômico também é um ponto importante considerado no processo. Conforme demonstrado na seção 4.2 durante a operação de montagem, o montador ficava aproximadamente 1,7 minutos sustentando a ferramenta de torque para realizar o aperto dos parafusos. Esta atividade oferece riscos aos membros superiores, tais como braços, ombros e punhos além de riscos para o pescoço.

O novo processo apresentou uma redução de 58% do risco, uma vez que a operação de torque dos parafusos do resfriador de óleo foi transferida para o cobot. Desta forma a modernização também proporcionou redução de risco à saúde humana.

A figura 20 demonstra o índice de risco anterior ao cobot e após a implementação do cobot.

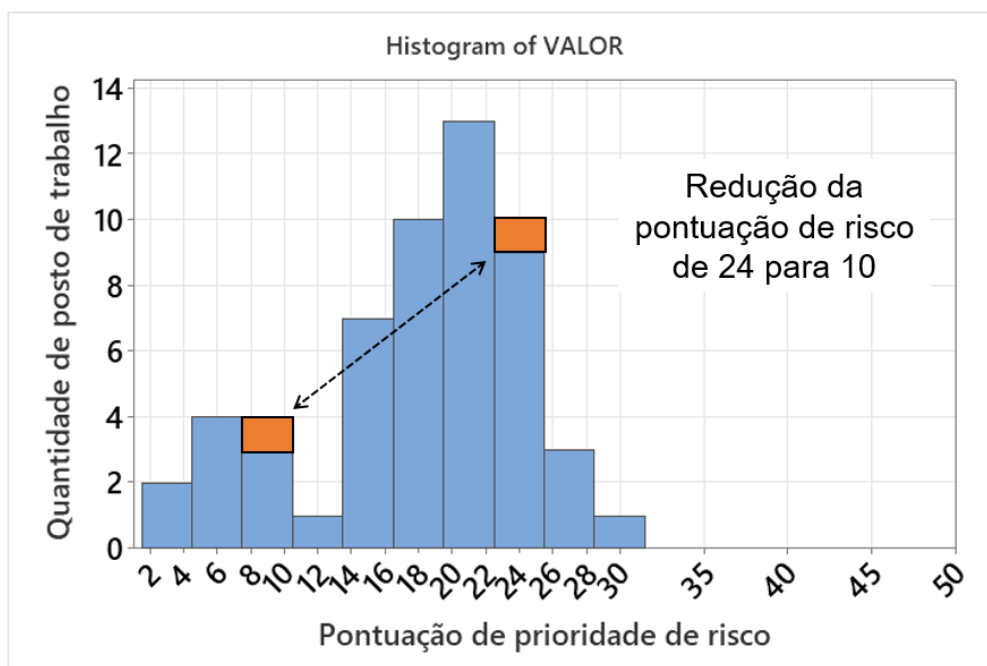
Figura 20 - Análise ergonômica do estágio antes e depois



Fonte: Empresa pesquisada

O software de análise ergonômica utilizado pela empresa pesquisada é o sistema Humantech e o resultado da análise é apresentado em PPR (Pontuação de prioridade de risco). A pontuação dentro do software vai de uma escala de 1 até 50 PPR. Nesta linha de montagem dos motores existem 54 estações de trabalho, na qual cada estação tem sua avaliação ergonômica. A pontuação de prioridade de risco por estágio está apresentada no gráfico 5.

Gráfico 5 - Pontuação de prioridade de risco por estágio



Fonte: Empresa pesquisada

Conforme o gráfico 5, apenas 10 dos 54 postos de trabalho apresentam risco igual ou menor que 10 PPR isso equivale 22,73%. Isso demonstra que a redução da pontuação de 24 para 10 torna essa estação de trabalho mais segura para o trabalhador, além de colaborar para o objetivo da empresa em reduzir a pontuação de risco de todos os estágios para menor ou igual que 10.

4.5 VULNERABILIDADE DE QUALIDADE DO PROCESSO

O processo de torque e o correto assentamento do conjunto resfriador de óleo no bloco do motor é importante para o funcionamento do sistema. Uma falha neste requisito do produto, torque baixo ou sequência de aperto errada pode gerar vazamento entre as galerias, ocasionando a mistura de líquido de arrefecimento com óleo lubrificante. O efeito desta mistura ou do vazamento externo será a perda de desempenho do motor e dependendo da quantidade até mesmo a perda do motor. A figura 21 demonstra uma falha na qual gerou vazamento de óleo lubrificantes pelos furos de fixação dos parafusos (local indicado pelas setas vermelhas) devido a falha no processo de torque, essa falha ocorreu em um teste de durabilidade com o motor já no veículo.

Figura 21 - Vazamento de óleo pela furação dos parafusos



Fonte: Empresa pesquisada

Após a implementação do cobot, foi possível garantir o torque na sequência correta, desta forma a ocorrência de falha reduziu no processo. A introdução do cobot apresentou uma redução de 71% na pontuação de risco.

Para análise de risco de qualidade foi utilizado a análise de modo e efeitos de falha (PFMEA). Na figura 22 demonstra o índice anterior ao cobot e após a implementação do cobot.

Figura 22 - Análise de modo e efeitos de falha

	Função do Processo / Montagem	Requisitos do processo	Como a Função Pode Falhar (Modo de Falha)	Efeitos da Falha no Produto ou processo	Severidade	C	Causa(s) Potencial(is) da Falha	Controles Atuais do Projeto / Processo			Detecção	RPN	Ações Recomendadas
								Controles Prevenção	Ocorrência	Controles Detecção			
Processo antes do cobot	Torquear resfriador de óleo no bloco do motor	Torquear parafusos do resfriador de óleo no bloco do motor na sequência correta	Não torquear na sequência correta	- Vazamento - Retrabalho	7		Não torquear de acordo com processo	Documento - Texto e Visual	7	Teste de vazamento	4	196	Implementar cobot para evitar erro na sequência de torque
Processo depois do cobot	Torquear resfriador de óleo no bloco do motor	Torquear parafusos do resfriador de óleo no bloco do motor na sequência correta	Não torquear na sequência correta	- Vazamento - Retrabalho	7		Não torquear de acordo com processo	Cobot (Prova de erro)	2	Teste de vazamento	4	56	

Fonte: Elaborado pelo autor

Com a introdução do cobot, a pontuação de ocorrência do modo de falha aplicar o torque na sequência incorreta, reduziu de 7 para 2 em uma escala de 0 até 10, já que o cobot no controle de prevenção foi classificado como um sistema a prova de erro no processo. Essa melhoria apresentou uma redução na pontuação de risco de 196 para 56 em uma escala de 0 até 1000.

5. DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a introdução de cobot em processo de montagem trouxe uma série de benefícios para a empresa pesquisada. Esse estudo serviu como base para direcionar a alta direção sobre futuros projetos, reduziu desperdícios, custo operacional, aumentou a qualidade do produto através da redução de risco do PFMEA, aumentou a eficiência da linha e tornou a operação mais seguro para o operador, pois reduziu a risco ergonômico. Os resultados estão alinhados com o trabalho de Realyvasques-Vargas *et al.* (2019) que constataram redução ou eliminação de riscos ocupacionais ao introduzir cobot na tarefa de montagem e, assim, aumentou a eficiência organizacional. O estudo revelou que o cobot atingiu com sucesso seu objetivo.

Outro ponto positivo relacionado a introdução do cobot no processo de montagem foi a aproximação da pré-montagem do resfriador de óleo com a linha de montagem de motores. Sem a implementação do cobot essa alteração do leiaute não seria possível, pois no posto de trabalho não comportava 2 operadores dividindo o mesmo espaço. Essa ação resultou na eliminação dos desperdícios relacionados às atividades que não agregam valor, pois o operador utilizava aproximadamente 1,3 minutos para levar a peça até a linha de montagem. Com o novo cenário foi possível balancear a linha atribuindo algumas tarefas operacionais ao cobot tornando a linha mais eficiente. Esta constatação corroborou o estudo de Quenehen; Pocachard; Klement (2019), que abordaram os modelos de Industria 4.0 e manufatura enxuta, ambos buscam maior eficiência nas operações e a utilização de técnicas como trabalho padronizado e melhoria continua. Esses são alguns dos principais fatores de sucesso para a implantação do cobot. Além disso, essa constatação corroborou o resultado de Zhang *et al.* (2021), que enfatizaram melhoria de produtividade devido a implantação de cobot em processos de montagem.

A avaliação econômica realizada neste estudo levou em consideração o investimento para a implementação do cobot e os ganhos obtidos com a redução dos custos operacionais. Os valores analisados foram fundamentais para justificar a viabilidade econômica do projeto. Os dados apresentados demonstraram que em 1 ano e 9 meses o projeto foi amortizado. Esses resultados corroboram o estudo de Realyvasques-Vargas *et al.* (2019), no qual demonstraram que ao integrar o

cobot com a estação de montagem o retorno sobre o investimento foi de 5,29 anos. O tempo para obter o retorno sobre investimento pode variar, fatores como valor de investimento, complexidade de integração e o valor dos ganhos operacionais pode afetar no índice final.

A redução do risco ergonômico foi outro benefício obtido com a implementação do cobot. Esta alteração, permitiu uma redução da pontuação de risco em membros superiores como pescoço e braços. Essa redução refletiu diretamente na qualidade de vida do trabalhador, prevenindo distúrbios osteo musculares relacionados ao trabalho. Os resultados corroboram o estudo de Román Ibáñez *et al.* (2021), demonstraram que o cobot melhora a ergonomia do processo para o trabalhador humano, uma vez que remove parte da atividade manual e, portanto, minimiza os movimentos exigidos pelo operador humano. Além disso, Salunkhe *et al.* (2019) identificaram que a ergonomia não era mais um problema, pois o cobot foi bem sucedido em eliminar a operação com risco ergonômico realizada pelo operador.

O ganho com a qualidade do produto foi outro resultado positivo com a introdução do cobot. O processo antes do estudo apresentava potencial falha e risco de quebra de qualidade uma vez que o torque do resfriador de óleo no motor deveria acontecer em uma sequência específica e a tarefa era totalmente manual podendo o operador cometer erro. No estudo com a introdução do cobot eliminou o risco de falha através da redução da pontuação de risco do PMEA. O estudo corroborou os achados de Salunkhe *et al.* (2019) na qual mencionam que o uso de cobots na área fabril é benéfico para a estação de montagem, especialmente na eliminação de questões de qualidade.

6. CONCLUSÃO

Este estudo alcançou seu objetivo, que foi avaliar a aplicação de cobot em linha de montagem de motores e suas vantagens econômicas, sociais e de qualidade. Os resultados indicaram que o cobot em linha de montagem de motores é uma alternativa vantajosa para a melhoria da eficiência na manufatura. O projeto reduziu em R\$208.012,80 por ano o custo operacional, o que possibilitou o retorno do investimento em 1 ano e 9 meses. Além disso, aumentou a qualidade do produto através da redução da incidência de erros, e a implementação desta tecnologia reduziu o risco ergonômico e de lesões aos operadores. A contribuição teórica desta pesquisa foi oferecer um trabalho ainda não encontrado na literatura sobre a aplicação de cobot em linha de montagem de motores. Com isso, os aspectos positivos relatados neste estudo incrementaram o conhecimento acerca do tema pesquisado. Como uma contribuição para a prática corporativa, este estudo pretende estimular os gestores a buscar oportunidades de implementação de cobot que garantam ganhos e oportunidades para seus processos produtivos. A divulgação deste trabalho pode alcançar gestores de fornecedores e clientes e incentivá-los a incluir estratégias que visem a melhoria da eficiência no processo de manufatura com a aplicação de cobot.

O propósito exploratório desta pesquisa limitou suas conclusões à empresa foco do estudo. O método e os dados coletados não permitem a generalização dos resultados. Sugestões de pesquisas futuras são direcionadas para trabalhos que aprofundem o conhecimento sobre a aplicação de cobot na manufatura, em especial, nas vantagens que promovam ganhos ambientais e economia circular.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AYDIN, Y.; SIRINTUNA, D.; BASDOGAN, C. Towards collaborative drilling with a cobot using admittance controller. **Transactions of the Institute of Measurement and Control**, v. 43, n. 8, p. 1760–1773, 2021.

BABAEI, M.; ABAZARI, A.; MUYYEEN, S. M. Coordination between demand response programming and learning-based FOPID controller for alleviation of frequency excursion of hybrid microgrid. **Energies**, v. 13, n. 2, 2020.

CHEN, Q.; HEYDARI, B.; MOGHADDAM, M. **Leveraging task modularity in reinforcement learning for adaptable industry 4.0 automation**. **Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME**, 2021.

CHERUBINI, A. *et al.* Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 40, p. 1–13, 2016.

COHEN, Y. *et al.* Deploying cobots in collaborative systems: major considerations and productivity analysis. **International Journal of Production Research**, v. 60, n. 6, p. 1815–1831, 2022.

D'SOUZA, F.; COSTA, J.; PIRES, J. N. Development of a solution for adding a collaborative robot to an industrial AGV. **Industrial Robot**, v. 47, n. 5, p. 723–735, 2020.

DAHL, M.; BENGTSSON, K.; FALKMAN, P. **Application of the sequence planner control framework to an intelligent automation system with a focus on error handling**. **Machines**, 2021.

DALLE MURA, M.; DINI, G. Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach. **CIRP Annals**, v. 68, n. 1, p. 1–4, 2019.

DIMITROKALLI, A. *et al.* On the assessment of human-robot collaboration in mechanical product assembly by use of Virtual Reality. **Procedia Manufacturing**, v. 51, n. 2019, p. 627–634, 2020.

EYAM, A. T.; MOHAMMED, W. M.; MARTINEZ LASTRA, J. L. **Emotion-driven analysis and control of human-robot interactions in collaborative applications. *Sensors*, 2021.**

HENTOUT, A. *et al.* Human–robot interaction in industrial collaborative robotics: a literature review of the decade 2008–2017. ***Advanced Robotics***, v. 33, n. 15–16, p. 764–799, 2019.

JAVAID, M. *et al.* Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation. ***Cognitive Robotics***, v. 1, n. May, p. 58–75, 2021.

Knecht, W.; Lakshminarayanan, P.A. Modern Diesel Combustion. In Design and Development of Heavy Duty Diesel Engines. Energy, **Environment, and Sustainability**; Lakshminarayanan, P., Agarwal, A., Eds.; Springer: Singapore, 2020.

MALIK, A. A.; BILBERG, A. Complexity-based task allocation in human-robot collaborative assembly. ***Industrial Robot***, v. 46, n. 4, p. 471–480, 2019a.

MALIK, A. A.; BILBERG, A. **Collaborative robots in assembly: A practical approach for tasks distribution**. *Procedia CIRP. Anais...Elsevier B.V.*, jan. 2019b.

MALIK, A. A.; MASOOD, T.; KOUSAR, R. Reconfiguring and ramping-up ventilator production in the face of COVID-19: Can robots help? ***Journal of Manufacturing Systems***, v. 60, n. October 2020, p. 864–875, 2021.

MOHER, D. *et al.* Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. ***International Journal of Surgery***, v. 8, n. 5, p. 336–341, 2010.

OLIVEIRA NETO, G. C. DE *et al.* A framework of actions for strong sustainability. ***Journal of Cleaner Production***, v. 196, p. 1629–1643, 2018.

PESHKIN, M.; COLGATE, J. E. Feature Cobots. ***Industrial Robot***, v. 26, n. 5, p. 335–341, 1999.

PINI, F.; LEALI, F. Human-robot collaborative reconfigurable platform for surface finishing processes. ***Procedia Manufacturing***, v. 38, n. Faim 2019, p. 76–83, 2019.

PINTO, L. F. R. *et al.* Cleaner production initiatives in a diesel engines factory. **International Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 11, n. 2, p. 73–80, 2020.

QUENEHEN, A.; POCACHARD, J.; KLEMENT, N. Process optimisation using collaborative robots - comparative case study. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 13, p. 60–65, 2019.

REALYVÁSQUEZ-VARGAS, A. *et al.* Introduction and configuration of a collaborative robot in an assembly task as a means to decrease occupational risks and increase efficiency in a manufacturing company. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 57, n. October 2018, p. 315–328, 2019.

ROMÁN IBÁÑEZ, V. *et al.* Collaborative robotics in wire harnesses spot taping process. **Computers in Industry**, v. 125, 2021.

SALUNKHE, O. *et al.* Assembly 4.0: Wheel hub nut assembly using a cobot. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 13, p. 1632–1637, 2019.

VALENTINA, D. P. *et al.* Smart operators: How Industry 4.0 is affecting the worker's performance in manufacturing contexts. **Procedia Computer Science**, v. 180, n. 2019, p. 958–967, 2021.

WECKENBORG, C.; SPENGLER, T. S. Assembly Line Balancing with Collaborative Robots under consideration of Ergonomics: A cost-oriented approach. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 13, p. 1860–1865, 2019.

ZHANG, Y. J. *et al.* From Manual Operation to Collaborative Robot Assembly: An Integrated Model of Productivity and Ergonomic Performance. **IEEE Robotics and Automation Letters**, v. 6, n. 2, p. 895–902, 2021a.

ZHANG, Y. JUN *et al.* Flow time in a human-robot collaborative assembly process: Performance evaluation, system properties, and a case study. **IIE Transactions**, v. 0, n. 0, p. 000, 2021b.

ZHANG, Y. JUN *et al.* Flow time in a human-robot collaborative assembly process: Performance evaluation, system properties, and a case study. **IIE Transactions**, v.

54, n. 3, p. 238–250, 2022.