

DANIELA CUNHA TORNISIELLO

Versão Original

A ERGONOMIA NA ABORDAGEM DA INDÚSTRIA 4.0 – O FUTURO DAS
INTERAÇÕES HOMEM-MÁQUINA

São Paulo

2021

DANIELA CUNHA TORNISIELLO

A ERGONOMIA NA ABORDAGEM DA INDÚSTRIA 4.0 – O FUTURO DAS INTERAÇÕES HOMEM-MÁQUINA

Monografia apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Especialista em
Engenharia de Segurança do Trabalho

São Paulo
2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Nelson e Isabel e meus amigos presentes nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo apoio e incentivo ao longo de todo o curso, em todos os encontros semestrais, na elaboração desse trabalho e por sempre me incentivarem aos estudos e na busca de novos conhecimentos durante toda a minha vida.

Aos colegas da turma EST-2019, que mesmo à distância, principalmente em um ano de pandemia, permaneceram em apoio e contribuíram na troca de conhecimento e experiências.

Ao professor Dr. Marcelo Palma, que foi o primeiro a me incentivar neste tema tão pouco abordado quando aluna de Pós-Graduação.

A todos os amigos que diretamente ou indiretamente participaram, seja no incentivo, ou na curiosidade do tema ou simplesmente por vibrarem por cada conquista que esses estudos me proporcionaram.

A todos os professores do curso pelos ensinamentos e vivência compartilhada e aos IMAD's que foram apoio e auxílio constante nos encontros presenciais e virtuais.

“Aprender é a única coisa que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende. ”

Leonardo da Vinci

RESUMO

TORNISIELLO, Daniela Cunha. **A ergonomia na abordagem da Indústria 4.0 – Futuro das Interações Homem – Máquina**, 2021. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Programa de Educação Continuada, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

A quarta revolução industrial traz em si um processo de enorme transformação sócio econômica, com alterações expressivas no comportamento das relações comerciais, industriais e pessoais. Especificamente, as indústrias enfrentam hoje um mundo bastante globalizado e amplamente conectado, os desafios a serem vencidos são cada vez maiores. Agilidade e assertividade são essenciais para inovar e atender demandas mundiais cada vez mais personalizadas e rápidas. A produção tem se tornado cada dia mais inteligente e flexível para adequar capacidades produtivas e atender as expectativas do cliente. O que eram simples processos, se tornaram linhas automatizadas, processos complexos e interligados. No centro desse turbilhão concentram-se as pessoas que precisam ser capazes de lidar com essa complexidade de forma estratégica. Nesse sentido, estas tecnologias geram uma maior interação entre as atividades realizadas pelas pessoas e os novos equipamentos de forma colaborativa. Assim, uma vertente importante, que a autora insere neste trabalho, é identificar como estas tecnologias poderão impactar nas condições ergonômicas nesta nova relação entre as tecnologias e as pessoas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho, é analisar o futuro da ergonomia nos processos de manufatura em indústria 4.0, além de apresentar soluções alinhadas com esse cenário estudado por diversos autores. Buscou-se identificar os principais desafios e habilidades necessárias para a indústria 4.0 e também os ajustes quanto a ergonomia neste processo através de estudo de caso e pesquisa exploratória baseada em uma revisão de literatura com abordagens qualitativas e de natureza aplicada apresentando benefícios e dificuldades na implantação de exoesqueletos, bem como, um teste com eletromiógrafo indicando a percepção de esforço muscular de um indivíduo com e sem o Exoesqueleto.

Palavras-chave: ergonomia, exoesqueleto, indústria 4.0.

ABSTRACT

The fourth industrial revolution brings with it a process of enormous socio-economic transformation, with significant changes in the behavior of commercial, industrial and personal relations. Specifically, industries today face a very globalized and widely connected world, the challenges to be overcome are increasing. Agility and assertiveness are essential to innovate and meet worldwide demands that are increasingly personalized and fast. Production has become increasingly intelligent and flexible to adapt production capacities and meet customer expectations. What were simple processes, became automated lines, complex and interconnected processes. At the center of this whirlwind are people who need to be able to deal with this complexity strategically. In this sense, these technologies generate a greater interaction between the activities carried out by people and the new equipment in a collaborative way.

Thus, an important aspect, which the author inserts in this work, is to identify how these technologies may impact ergonomic conditions in this new relationship between technologies and people.

Thus, the objective of this work is to analyze the future of ergonomics in manufacturing processes in industry 4.0, in addition to presenting solutions aligned with this scenario studied by several authors. We sought to identify the main challenges and skills needed for industry 4.0 and also the adjustments regarding ergonomics in this process through exploratory research based on a literature review with qualitative and applied approaches in a case study presenting benefits and difficulties in the implantation of exoskeletons, as well as, a test with electromyography indicating the perception of muscular effort of an individual with and without the exoskeleton.

Keywords: ergonomics, exoskeleton, Industry 4.0.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de diferenças de um projeto de posto de trabalho, com predominância de aspectos técnicos.	19
Figura 2 - Indústria 4.0 e seu contexto geográfico.	25
Figura 3 - Novas tecnologias na Indústria 4.0	28
Figura 4 - Arquitetura do Sistema de Manutenção Remota em uma Indústria 4.0	34
Figura 5 - Arquitetura do sistema em manutenção remota através de realidade aumentada.	36
Figura 6 - Nova abordagem para design com ergonomia virtual.....	40
Figura 7 - Modelos de configuração em uma área virtual e uma área real.	43
Figura 8 - Exemplo de arquitetura de comunicação para uma rede de exoesqueletos	54
Figura 9 - Exemplo de um exoesqueleto ativo.	56
Figura 10 - Modelo de análise de dados implementados no servidor.	57
Figura 11 - O exoesqueleto conforme uso pelo Kinect.....	61
Figura 12 - Modelo da ferramenta Ergo Sentinel.....	63
Figura 13 - Modelo de gráfico indicando análise de postura do colaborador.	64
Figura 14 - Janela do aplicativo RULA.	68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Benefícios observados.	79
Gráfico 2 - Comparativo com e sem o uso do exoesqueleto em teste de abdução de ombro.	81
Gráfico 3 - Comparativo com e sem o uso do exoesqueleto em teste de flexão de ombro	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Análise de pré-requisito para implantar uma ferramenta de manutenção remota.	32
Tabela 2 - Teste de abdução de 90° com e sem o exoesqueleto.....	80
Tabela 3 - Teste de flexão de ombros a 90° com e sem o exoesqueleto	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APIs	Interfaces de Programação de Aplicativos (Portais da Web)
AR	Realidade Aumentada
CPS	Sistema Ciber-Físico
ECG	Sensor de Eletrocardiograma
EMG	Sensores de Eletromiografia
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
GUI	Interface Gráfica do Usuário
I4.0	Indústria 4.0
ICT	Communication Technologies Innovation
IEA	International Ergonomics Association
M2M	Comunicação Máquina a Máquina
MAS	Arquitetura de Software Modular
MQQT	Message Queuing Telemetry Transport
MSD	Distúrbio Muscoesquelético Relacionado ao Trabalho
NBR	Norma Técnica
NHO	Norma de Higiene Ocupacional
NR	Norma Regulamentadora
OPCUA	Protocolo de Automação Industrial
OS	Sistema Operacional
ROS	Ferramentas que gerencia de forma eficiente a mediação do OS
SEJ2.0	Stuttgart Exo-Jacket 2.0
SELF	Société d'Ergonomie de Langue Française
SF	Fábrica Inteligente

Sumário

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO	15
1.2 JUSTIFICATIVA.....	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1 ERGONOMIA.....	17
2.1.1 Definição.....	17
2.1.2 Definição e objetivos da ergonomia.....	18
2.2 INDÚSTRIA 4.0.....	21
2.2.1 Definição.....	21
2.2.2 Indústria 4.0: nova revolução industrial	23
2.2.3 Tecnologia no novo contexto na indústria 4.0	27
2.2.4 REALIDADE AUMENTADA PARA APOIAR AS OPERAÇÕES DE MANUTENÇÃO E MANUFATURA.....	30
2.2.5 UMA FERRAMENTA PARA MANUTENÇÃO REMOTA	32
2.2.5.1 Análise de pré requisito	32
2.2.6 Novidades de implementação.....	33
2.2.7 DESCRIÇÃO DO USO DA FERRAMENTA	36
2.2.8 Uso da realidade aumentada	37
2.2.9 Design e ergonomia na indústria 4.0.....	38
2.2.10 Exoesqueleto na indústria 4.0.....	44
2.2.11 Linhas de montagem em uma indústria 4.0.....	47
2.2.12 Desenvolvendo distúrbios musculoesqueléticos (MSD).....	47
2.2.13 Fator cognitivo	49
2.3 TECNOLOGIAS E TENDÊNCIAS DE IOT – EXOESQUELETOS OPERANDO EM REDES.....	49
2.3.1 Exoesqueletos operando em um sistema ciber-físico (CPS).....	49
2.3.2 Protocolo e padrão de mensagem enviada por um exoesqueleto	50
2.3.3 Arquitetura de comunicação para CPS.....	51
2.3.4 Análise de dados e processamento de fluxo	52
2.3.5 Exoesqueleto operando em uma rede de computação em nuvem.....	52

2.3.6	Implementação de arquitetura de comunicação em uma rede de exoesqueletos	54
2.3.7	Monitoramento automático de risco postural	58
2.3.8	O que é um operador 4.0	62
2.3.9	O método Rula.....	65
2.3.10	A ferramenta k2rula	65
2.3.11	A ferramenta Ergo Sentinel.....	66
3	METODOLOGIA.....	68
3.1	MÉTODO	68
3.2	ESTUDO DE CASO.....	71
3.3	COLETA DOS DADOS	72
3.4	PERFIL DO ENTREVISTADO	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
4.1	RESULTADOS.....	74
4.2	Benefícios e dificuldades na implantação do exoesqueleto.....	75
4.3	Testes realizados em laboratório	80
5	CONCLUSÕES.....	83
	REFERÊNCIAS.....	85
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DA PESQUISA.....	93

1 INTRODUÇÃO

Mesmo com a transformação socioeconômica profunda, e as indústrias enfrentando atualmente um mundo bastante globalizado e amplamente conectado, os desafios a serem vencidos são cada vez maiores. No contexto atual das Indústrias 4.0, a introdução de novas tecnologias é um dos desafios encontrados tanto em indústrias internacionais, como em indústrias nacionais. Segundo Laudante (2017) a mudança tecnológica, além de tornar as empresas mais expostas à concorrência no mercado, há também uma revolução tecnológica em pauta e definida como revolução industrial, apresentando um impacto em termos de crescimento, rentabilidade e emprego.

A quarta revolução industrial traz em si um processo de transformação sócio econômica profunda, com alterações expressivas no comportamento das relações comerciais, industriais e pessoais. Agilidade e assertividade são essenciais para inovar e atender demandas mundiais cada vez mais personalizadas e rápidas. A produção tem se tornado cada dia mais inteligente e flexível para adequar capacidades produtivas e atender as expectativas dos clientes. O que eram simples processos, se tornaram linhas automatizadas, processos complexos e interligados. No centro desse turbilhão, concentram-se as pessoas que precisam ser capazes de lidar com essa complexidade de forma estratégica. Nesse sentido, estas tecnologias geram uma maior interação entre as atividades realizadas pelas pessoas e os novos equipamentos de forma colaborativa. No atual ambiente de produção há uma transformação denominada de Indústria 4.0, trazendo mudanças de paradigmas, cujos limites e tempos são difíceis de definir e que conseguirá envolver todo o setor, principalmente o de manufatura em indústrias internacionais (LAUDANTE, 2017). Essa mudança apresenta uma ruptura tecnológica que nunca existiu trazendo a fusão do mundo real das plantas industriais com o mundo virtual e suas tecnologias para aumentar os níveis de produção usando sistemas eletrônicos e tecnologia da informação. Entretanto, também traz vantagens competitivas de longo prazo, persegue a estratégia que gera produtos e serviços com um novo significado, desenvolvendo sociedades e economias avançadas, caracterizando-se como uma inovação tecnológica no mercado global.

Outra vertente importante, é identificar como estas tecnologias poderão impactar nas condições ergonômicas nesta nova relação entre as tecnologias e as pessoas.

Especificamente, inserida em vários relatórios como a engenharia integradora de tecnologia, automação e gestão, a ergonomia entra em voga como um dos personagens centrais no fornecimento de profissionais que conduzirão processos de implementação da I4.0. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é analisar o futuro da ergonomia nos processos de manufatura em uma indústria 4.0 e soluções alinhadas com esse cenário na interação homem-máquina e os benefícios na implantação do exoesqueleto.

Buscou-se identificar os principais desafios e habilidades necessárias para a Indústria 4.0 e os ajustes quanto à ergonomia neste processo utilizando uma metodologia de natureza aplicada com abordagens qualitativas através de uma pesquisa exploratória baseada em uma revisão de literatura. O estudo de caso é uma pesquisa que tem o objetivo de gerar conhecimento para posteriormente uma aplicação prática, e a abordagem qualitativa foi utilizada para interpretar os casos estudados e teorias apresentadas, explicando o que foi experimentado no estudo de implantação de exoesqueletos e seus benefícios no processo de implantação em uma indústria 4.0.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar as novas abordagens das colaborações proporcionadas pelas novas tecnologias na ergonomia dos postos de trabalho e a interação homem-máquina no futuro e os benefícios observados na implantação do exoesqueleto.

1.2 JUSTIFICATIVA

Devido as inovações trazidas pela nova revolução industrial, ou indústria 4.0 (I4.0), os layouts de trabalho se informatizaram e os processos de produções se virtualizaram. Dessa forma, houve uma descentralização na gestão e um movimento em ajustar as demandas como prioridade de otimização dos processos de fabricação. Nesse momento, temos a opção positiva de intervir em situações laborais nesses ambientes de trabalho, seja com maquinários, sistemas de produção mais sofisticados,

implantação de robôs colaborativos, ou ainda, dispositivos ergonômicos mais evoluídos. Essas ações trazem como consequência maior produtividade, menor desperdícios e principalmente a redução de lesões relacionadas ao trabalho, que se bem orientadas e implantadas de forma correta, podem ocorrer ganhos prolongados a saúde do colaborador durante sua vida profissional.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ERGONOMIA

2.1.1 DEFINIÇÃO

Conforme apresentado no site da ABERGO (Associação Brasileira de Ergonomia), em agosto de 2000 adotou-se a seguinte definição de ergonomia:

“A Ergonomia (ou Fatores Humanos) é uma disciplina científica relacionada ao entendimento das interações entre os seres humanos e outros elementos ou sistemas, e à aplicação de teorias, princípios, dados e métodos a projetos a fim de otimizar o bem-estar humano e o desempenho global do sistema. ”

Esta definição é também utilizada pela International Ergonomics Association - IEA (www.iea.cc) e pela Société d'Ergonomie de Langue Française — SELF (www.ergonomie-self.org). (EPUSP, 2020).

Além da definição de ergonomia, o site da ABERGO também lista como os ergonomistas tornam o ambiente e sistemas de trabalho compatíveis com os seres humanos, suas necessidades e limitações através de planejamento, projeto e avaliação das tarefas, postos e ambientes de trabalho, produtos e sistemas de produção.

A ergonomia é dividida em Ergonomia Física, Cognitiva e Organizacional. A ergonomia física estuda a postura do trabalhador, seus movimentos e a relação com o projeto dos postos de trabalho, o uso de materiais e equipamentos e distúrbios músculos esqueléticos provenientes do trabalho, usando conceitos de anatomia humana, antropometria, fisiologia e biomecânica.

A ergonomia cognitiva estuda, entre outros tópicos, a interação homem computador, os processos de tomada de decisão, o estresse e a carga mental de trabalho através da observação dos processos mentais, como a percepção, a memória e o raciocínio. Já a Ergonomia Organizacional estuda a comunicação dentro da organização, o gerenciamento dos recursos e do tempo do trabalho, as interações do trabalho em grupo e projetos participativos, através da avaliação de estruturas organizacionais, políticas e de processos da organização estudada. (ABERGO e EPUSP 2020).

2.1.2 DEFINIÇÃO E OBJETIVOS DA ERGONOMIA

A ergonomia (*ergonomics*), também chamada de fatores humanos (*human factors*), é o estudo da *adaptação* do trabalho ao ser humano. O destaque tem uma observação muito ampla, que abrange não apenas os trabalhos executados com máquinas e equipamentos, utilizados para transformar os materiais, mas também todas as situações em que ocorre o relacionamento entre o ser humano e uma atividade produtiva de bens e serviços não envolvendo somente o ambiente físico, mas também os aspectos organizacionais. A ergonomia tem uma atuação muito ampla, e abrange as atividades de planejamento e projeto, que ocorrem antes do trabalho a ser realizado; monitoramento, avaliação e correção, que ocorrem durante a execução do trabalho ou serviço; e análises posteriores das consequências do trabalho. Essas fases são necessárias para que o trabalho ou atividade possam atingir os resultados desejados (GUIMARÃES, 2018).

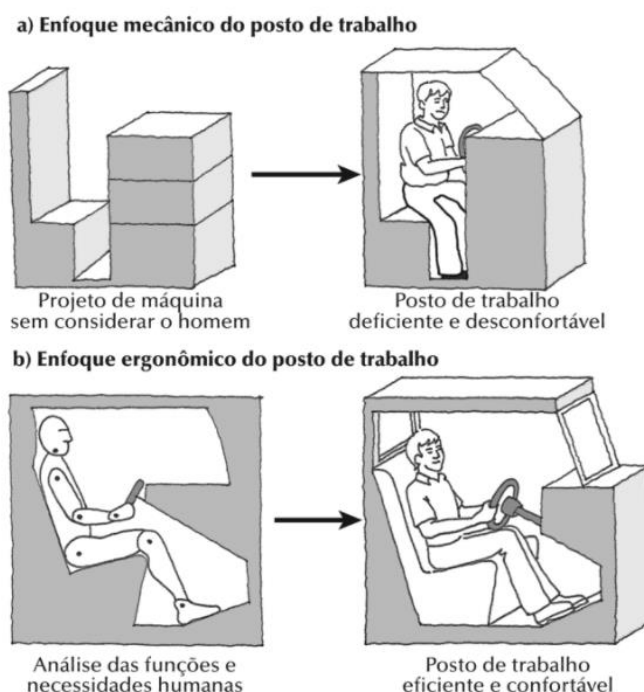
Pensando em ergonomia, é necessário iniciar o estudo observando as características dos trabalhadores para depois, projetar o trabalho a ser executado, visando preservar a saúde e o bem-estar do trabalhador. Assim, a ergonomia é o princípio sobre o conhecimento do ser humano para fazer o projeto do trabalho, adaptando-se às suas capacidades e limitações (GUIMARÃES, 2018). Porém, observa-se que, essa adaptação ocorre no sentido do trabalho, para o ser humano, na maioria dos casos. Isso reflete em que o trabalho deve ser projetado para que depois seja executado pela maioria da população, levando à produção de máquinas e equipamentos fáceis de operar, em condições adequadas de trabalho, sem sacrifícios para o trabalhador (GUIMARÃES, 2018).

O inverso também ocorre, e é quando, o projeto é feito sem considerar as características ou informações adequadas sobre os trabalhadores e as condições que serão executadas este trabalho. Como por exemplo, quando há uma preocupação prioritária com os aspectos técnicos que será executado o trabalho (máquinas, equipamentos, *softwares*), deixando o operador humano/ trabalhador para ser “encaixado” posteriormente na função, conforme Figura 1. Esse cenário não é recomendado, pois pode gerar situações que produzem ao trabalhador muita fadiga,

erros, acidentes, além de baixa produtividade para a empresa. Essas situações são consideradas inaceitáveis para a ergonomia (GUIMARÃES, 2018).

Contudo, essas inversões podem ocorrer em certos casos excepcionais, podendo acontecer em situações que o trabalhador precisa realizar a atividade em equipamentos de grande porte e já existentes, elevando os custos de adaptação, justificando a seleção de operadores com treinamentos especiais para realizar a atividade.

Figura 1 – Exemplo de diferenças de um projeto de posto de trabalho, com predominância de aspectos técnicos para a atividade (a); e outro exemplo de um projeto com foco ergonômico, com análise prévia das necessidades do trabalhador (DAMON, SOUDT E MCFARLAND, 1971).



Fonte: Livro Ergonomia: projeto e produção.

Apresentar soluções e propostas para um trabalho melhor é o objetivo maior da ergonomia. A ergonomia é uma disciplina que promove uma abordagem holística e centrada no ser humano para o design de sistemas de trabalho que considera relevantes os fatores físicos, cognitivos, sociais, organizacionais e ambientais (GRANDJEAN, 1986; RANDJEAN, 1986; WILSON e CORLLET, 1995; SANDERS e

MCCORMICK, 1993; CHAPANIS, 1999; SALVENDY, 1997; VICENTE, 2004; STANTON et. al; 2004).

Como entendido por Karwoski (2005), ergonomia é uma disciplina que se foca na natureza das interações do ser humano com os artefatos, a partir de uma perspectiva unificada da ciência, engenharia, design, tecnologia e gerenciamento da compatibilidade humano-sistema, incluindo uma variedade de produtos, processos e ambientais naturais e artificiais. O autor ainda descreve que, com o avanço da tecnologia, sendo que o trabalho humano muitas vezes se dá em ambientes complexos, a utilização da ergonomia é importante para a análise de sistemas complexos, particularmente na *área de manufatura*. Pois, a tomada de decisão e os modos de controle cognitivos em sistemas complexos utilizados pelos trabalhadores devem ser analisados em função dos fatores de complexidade da atividade de manufatura. Os acidentes, muitos dos quais em função das disfunções entre o ser humano e os sistemas complexos, apontam a área de ergonomia na área de manufatura como sendo um dos temas a gerarem mais pesquisas num futuro próximo. Outro aspecto da ergonomia evidenciado para a melhoria do trabalho humano é o estudo do ambiente no qual o trabalho é realizado, sendo esta a área da ergonomia do ambiente construído. As situações de risco e segurança nos espaços arquitetônicos e nas cidades tem possibilitado aos ergonomistas uma reflexão sobre o que pode ser melhorado e uma busca de soluções (SOARES, 2007). A ergonomia do ambiente construído estuda a utilização e a acessibilidade das edificações e dos ambientes públicos considerando a relação do ser humano com o ambiente, levando em conta as suas características e limitações físicas, culturais, cognitivas e emocionais.

Os processos participativos são abordagens comuns na ergonomia contemporânea e objetivam o envolvimento dos trabalhadores nas condições de trabalho. Lima, Resende e Vasconcelos, nesta edição verificada, discutem a importância das interações sócio cognitivas no projeto de instrumentos de trabalho no nível de relações físicas. Os autores apresentam um estudo de caso de concepção de postos de trabalho centrado na atividade dos usuários a partir de um processo participativo. A análise e concepção de postos de trabalho pode ser considerada uma área em ascensão e possui um número bastante significativo de contribuições nos congressos da ABERGO (GUIMARÃES, 2018).

Um dos aspectos nos quais a ergonomia atua visando a melhoria do trabalho humano é na prevenção de riscos e custos humanos do trabalho. Para a ergonomia o risco compreende uma percepção multidimensional envolvendo fatores psicológicos, sociais e culturais (WILLIAM, 2006). Já os custos humanos do trabalho se expressam através de mortes, mutilações, lesões permanentes e temporárias, doenças e fadigas, decorrentes dos acidentes e incidentes, e da carga de trabalho (MORAES E MONT'ALVÃO, 2003).

Assim, para a ergonomia, a melhoria do trabalho humano envolve a redução dos custos humanos do trabalho. Neste sentido, Teixeira, Torres, Moro e Merino investigam queixas musculoesqueléticas associadas às inadequações ergonômicas de posto de trabalho a partir do descumprimento da NR-17; Regis Filho, Michels e Sell analisam os aspectos biomecânicos dos *distúrbios ósteos-musculares relacionados ao trabalho* (DORTs) nas atividades do cirurgião-dentista e Ballardin e Guimarães avaliam a carga de trabalho dos operadores de uma empresa distribuidora de derivados de petróleo. Cumpre observar que, assim como a análise e concepção de postos de trabalho, a área de riscos e custos humanos no trabalho é uma área de estudo bastante consolidada na ergonomia industrial, sendo esta a terceira área de maior incidência de trabalhos científicos nos congressos da ABERGO (SOARES, 2006).

2.2 INDÚSTRIA 4.0

2.2.1 DEFINIÇÃO

Segundo (MASONI et. al, 2017), a Indústria 4.0 é uma tendência atual no domínio da manufatura, baseada no conceito de “Fábrica Inteligente”. Entre outros serviços organizacionais, a Indústria 4.0 requer um serviço de manutenção rápido e eficiente para garantir que as empresas implementem um sistema de produção eficiente. Dessa forma, se insere, o uso da Realidade Aumentada (AR) como suporte para operações de manutenção (AZUMA, 2016), o uso da AR não é uma ideia inédita, pois, desde o início, foi claro para a comunidade de pesquisa que uma das aplicações mais interessantes para a AR poderia ter sido o apoio de aplicação industrial, incluindo essa tecnologia na área de manutenção, que não foi inserida naquela época, devido seu

alto custo e, portanto, exigindo altos investimentos (AZUMA, 1997 e AZUMA, 2016). Depois de décadas, e grandes avanços na capacitação de tecnologias de AR, por exemplo, câmeras, sensores, algoritmos de rastreamento e tecnologias de visualização, e graças à evolução das tecnologias de informação e comunicação em geral, a AR entrou no mercado consumidor e no mesmo momento, a AR foi reconhecida como uma das tecnologias de ponta da 4ª Revolução Industrial, a chamada Indústria 4.0.

Conforme (MASONI et. al, 2017) indica, entre os motivos pelos quais a AR ainda não foi introduzida na prática industrial, deve-se a relação entre baixo desempenho e custos do software e tecnologias de hardware disponíveis no mercado. A tecnologia de rastreamento sempre parece não ser precisa o suficiente, conforme exigido em aplicações industriais. Como por exemplo, muitas vezes sofrem com as condições de iluminação que, apesar de vários óculos de proteção serem acessíveis no mercado, ainda não podem ser utilizados por um longo período. Já as baterias, por exemplo, não são permitidas seu uso por um longo período do tempo. Já a ergonomia foi melhorada, em comparação com os pesados monitores vestíveis em relação há alguns anos atrás, mas ainda existem muitas questões em aberto, principalmente quando relacionadas a percepção visual de informação mista (real, mas virtual). De qualquer forma, o interesse industrial pela tecnologia AR é alto, e nos últimos anos, houveram muitas tentativas em usá-la como suporte para manutenção que foram feitos por grupos de pesquisas antigos e emergentes, grupos de consultorias, novas *startups*, entre outros, além disso, grandes empresas também estão investindo na mesma direção.

A Realidade Aumentada (AR) como suporte para manutenção é apenas um exemplo do que pode ser feito introduzindo-a na indústria, podendo ajudar a reduzir o tempo e os erros das tarefas de manutenção (FIORENTINO, 2014). A manutenção pode ser de diferentes tipos como: desde que a falha das máquinas possa ser prevista com precisão, a manutenção preditiva permite a frequência da manutenção ser o mais baixo possível para evitar manutenção reativa não planejada, sem incorrer em custos associados à realização de muitas manutenções preventivas.

Porém, (MANSONI, 2017) diz que, infelizmente, algumas falhas não podem ser facilmente previstas e, nesses casos, a manutenção requer uma análise aprofundada na análise do problema e, em seguida, operadores de manutenção especializados

para executar a tarefa de reparo. Este tipo de intervenção pode ser caro, tanto para o proprietário da máquina quanto para a empresa que vende o serviço de manutenção, e às vezes leva tempo para o especialista chegar ao local onde a tarefa de manutenção deve ser realizada. Operadores locais podem tentar consertar a máquina comunicando-se com especialistas remotos usando qualquer suporte multimídia, ou seja, enviando fotos, vídeos ou conversando.

Nesse contexto, (BORDEGONI, 2014) propõe uma aplicação da AR com tecnologia móvel para ajudar os produtores de máquinas a melhorar os serviços de manutenção, onde um operador especialista ensina o operador local por troca de instruções de manutenção e por meio de símbolos e textos projetados no ambiente real. A aplicação, bem como suas características, foi desenvolvida considerando que, uma alta largura de banda de rede não poderia ser garantida em muitos cenários reais de manutenção. Após o primeiro lançamento, o aplicativo foi testado em várias situações, e alguns novos recursos foram adicionados observando o que se aprendeu em campo e depois como foi a evolução da aplicação da realidade aumentada (AR).

2.2.2 INDÚSTRIA 4.0: NOVA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

De acordo com *The Research Report Factory of The Future* (2014), o cenário que a Indústria 4.0 está inserida consiste na nova relação entre o mundo físico dos seres humanos (isto é, dos atores do sistema econômico e social, como empresários e trabalhadores, consumidores, etc.) e o mundo digital (computadores, sensores, o mundo virtual de simulações e assim por diante). A união desses dois mundos é muito complicada e há muitos estudos procurando as interfaces mais adequadas para isso. Mas, as energias e benefícios que seriam obtidos, são muito elevados, porque nos permitiria explorar um enorme potencial das tecnologias digitais das quais hoje utilizamos apenas uma pequena parte. No atual ambiente de produção está em andamento uma transformação chamada Indústria 4.0, uma mudança de paradigma cujo limite e tempo ainda são difíceis de definir e conseguirá envolver todo o setor de manufatura internacionalmente.

Na descrição deste processo inovador e complexo, existem diferentes sinônimos com o termo de Indústria 4.0, como *Smart Manufacturing*, *IV Industrial Revolution*, *Intelligent Factory*, *Factory of the Future*, e dependendo do país de sua implantação,

nasceram iniciativas para o desenvolvimento e disseminação de tecnologias subjacentes ao paradigma de Indústria 4.0. como por exemplo, nos Estados Unidos foi implementado como *Industrial Internet*, na Alemanha como *Industrie 4.0*, na França como *Industrie du Futur*, no Reino Unido como *High Value Manufacturing*, e na Itália como *Fabbrica del Futuro*, cujas peculiaridades são as mesmas e principalmente identificadas na integração dos processos físicos com as tecnologias digitais. Em detalhes, o modelo europeu da Indústria 4.0 está sendo definido como base nas atividades de cada um dos Estados-Membros e na intervenção da Comissão Europeia através das iniciativas do Horizonte 2020, no sentido de aumentar a competitividade industrial com investimentos direcionados à implantação de uma indústria inteligente (LAUDANTE, 2017).

Conforme (MAGONE, MAZALI, 2016), “O mundo das fábricas, na Itália como em outros lugares, está no limiar de uma transformação profunda que, segundo muitos cientistas tecnológicos e sociais, líderes empresariais e sindicalistas – não será nenhuma transformação. É uma mudança de paradigma que tem no fundo uma ruptura tecnológica que nunca existiu: a fusão do mundo real das plantas industriais com o mundo virtual do que se chama Internet das Coisas, um sistema integrado de dispositivos interconectados e inteligentes que sabe se colocar em contato através de rede, objetos, pessoas e lugares. [...] O processo de produção será simulado em um ambiente virtual para identificar e resolver problemas antes de construí-lo fisicamente.

”

A Indústria 4.0, é uma evolução das revoluções industriais anteriores que vieram respectivamente a introdução da energia hídrica e a vapor, para mecanizar a produção de eletricidade para a produção em massa e tecnológica da informação e a era digital para aumentar os níveis de produção de automação usando sistemas eletrônicos e tecnologia da informação, como ilustra a Figura 2 da Indústria 4.0 no seu contexto geográfico (LAUDANTE, 2017) e tradução livre.

Figura 2 - Indústria 4.0 e seu contexto geográfico. USA 2012: Parceiros de Fabricação Avançada; CANADÁ 2015: Centro de Manufatura Inteligente; FRANÇA 2014: Indústria do Futuro; REINO UNIDO 2014: Alto Valor na Indústria de Manufatura; ALEMANHA 2011: Indústria 4.0; ITÁLIA 2014: Fábrica do Futuro; CHINA 2015: Fábrica na China; AUSTRÁLIA 2013: Nova Onda da Indústria de Manufatura.



Fonte: Industry 4.0, Innovation and Design. A new approach for ergonomic analysis in manufacturing system.

Segundo (Laudante, 2017) inovação, é uma das maiores vantagens de busca competitiva em longo prazo, pois prevê na estratégia que geram produtos e serviços com um novo significado radical como um fator importante no desenvolvimento da sociedade e economias avançadas em diferentes nações que, respectivamente, à sua capacidade de alimentar ao longo do tempo, um desenvolvimento contínuo de inovação, determina a economia e a tecnologia como supremacia no mercado global. A inovação da tecnologia gera inevitavelmente a organização a inovação a um novo ponto de vista da companhia.

Conforme (VIALE, 2008) aborda, “A tecnologia ou organização em inovação não pode ser simplesmente uma ideia, um projeto, ou um protótipo de um novo projeto, um novo processo ou uma nova organização praticada pela empresa, mas isso deve ser trazido no cotidiano, em procedimentos rotineiros e padronizados, que possibilitem a produção eficiente do novo produto, a implementação do novo processo produtivo e o exercício diário dessa nova prática organizacional”. Esse é o resultado de dois processos conectados um ao outro: um de aprendizagem organizacional, por meio da qual a organização adquire e dissemina entre seus novos conhecimentos e novos métodos de operação; e o outro de mudança organizacional. Um dos aspectos cruciais da inovação nas empresas é que deve quase sempre e, é quase sempre necessário, ser acompanhado por uma mudança organizacional. Novas tecnologias, novos mercados, novas formas de operar inevitavelmente trazem mudanças na estrutura organizacional”.

Já (LAUDANTE, 2017) afirma que, é um novo modo de produção em que a combinação de fabricação e inovação é fortalecido pelo uso de tecnologias digitais em seus processos produtivos através do potencial de hibridizações entre o mundo físico e o mundo virtual, cuja centralidade é representada pela evolução no mundo da produção. Da fusão de dois mundos nasce um sistema denominado ciberfísico (*Cyber-Physical System* - CPS), composto por uma rede complexa de máquinas, produtos físicos, itens virtuais, instalações de computadores e armazenamento, dispositivos de comunicação que interagem entre si e exploram o enorme potencial das novas tecnologias, ainda não totalmente exploradas. A utilização de um *sistema ciberfísico* trará uma melhoria na indústria e distribuição dos processos, alcançando maior eficiência através da redução dos custos de produção e da consequente diminuição dos preços de venda, aumentando o número de novos produtos e serviços para o mercado e outras variáveis através da utilização dos recursos tecnológicos atuais. Em um contexto onde os paradigmas de mercado mudam tão radicalmente em um tempo muito curto, os esforços das empresas privadas e públicas devem ser direcionados para a rápida adoção das cadeias de valor digital como elemento estratégico de recuperação, crescimento e aceleração.

Enquanto (POGGIANI, TEDESCHI, 2014) diz que “A transformação digital não pode representar apenas uma opção ou canal acessório, mas um elemento central no qual se concentrar, por meio da disseminação de habilidades, o investimento em pesquisas

e medidas relativas às infraestruturas de conectividade, data center e acesso à Internet, evolução dos modelos operacionais, gestão coerente da cultura e húmus empresarial – dos testes ao *start-up*”. As novas mudanças no setor manufatureiro também mudam a cadeia de valor, cria uma nova relação entre o homem e a máquina, melhorando a cooperação, embora deixando a função principal do usuário inalterada, também definindo a importância das habilidades mais avançadas e profissionais. Com o advento do digital e manufatura robótica, nas fábricas, estamos vendo uma mudança de paradigma no mundo corporativo. Será importante identificar e planejar competências transversais como as capacidades de capital humano presentes nas realidades de produção.

Segundo a (EUROPEAN SCHOOLNET, DIGITAL EUROPE, 2014) “Seja qual for a taxa de mudança ou o resultado final dessas mudanças, podemos ter certeza de uma coisa: os trabalhadores de amanhã precisarão de habilidades que lhes permitam criar valor econômico em um mundo onde cada vez mais grandes áreas do mercado de trabalho provavelmente serão substituídas por automação, *softwares* e robôs”. O novo ambiente de negócios levará a uma maior experiência em *know-how* do trabalhador no projeto, uso, e supervisão de máquinas inteligentes capazes de auxiliar os recursos humanos no desempenho de tarefas.

2.2.3 TECNOLOGIA NO NOVO CONTEXTO NA INDÚSTRIA 4.0

Segundo (LAUDANTE, 2017) a Indústria 4.0 consiste na transformação da produção industrial impulsionada pelos avanços tecnológicos e regido por nove principais tecnologias que são pilares, representando a visão de um sistema produtivo no futuro. As principais tecnologias implantadas a serviço da empresa representam uma nova forma de fabricação, e inova o sistema “fábrica” melhorando os produtos tangíveis em termos de qualidade.

“As tecnologias digitais se inseriram na vida cotidiana de centenas de milhões de pessoas em todo o mundo. O desenvolvimento de soluções técnicas e funcionais em um campo empresarial é avançado e, em diferentes setores industriais, também a sua implementação é estabelecido e implementado para atender aos requisitos mais elevados colocados pelos clientes do processo ou diretamente pelos consumidores. O desafio atual para as empresas do setor de manufatura é, portanto, para agarrar as

potencialidades dos modelos de tecnologias com uma visão estratégica global, a fim de permitir a concepção da produção nos processos de forma integrada com as soluções tecnológicas disponíveis” (POLI et. al, 2014).

As palavras-chave da Indústria 4.0 são Internet das Coisas, Big Data, Computação em Nuvem, Simulação, Realidade Aumentada, Robótica, Aditivo de Fabricação, Cibersegurança, e Integração de Sistemas Horizontais e Verticais conforme ilustrada na Figura 3 (LAUDANTE, 2017) em tradução livre.

Figura 3 - Novas tecnologias na Indústria 4.0: robótica, integração de sistemas horizontais e verticais, adição de manufatura, internet das coisas,



Fonte: Industry 4.0, Innovation and Design. A new approach for ergonomic analysis in manufacturing system.

Conforme (LAUDANTE, 2017) destaca que, através de tecnologias inseridas na Indústria 4.0, como por exemplo, impressão 3D, Internet das Coisas, Big Data e ferramentas de simulação e visualização tridimensional, é possível simular todo o ciclo de produção antes da implementação de forma física, a fim de verificar as possíveis melhorias e simular em detalhes o comportamento individual de máquinas, trabalhadores, matérias-primas e componentes.

Atualmente, as tecnologias que capacitam o trabalho estão em um estágio de evolução para apoiar novas abordagens e processo, visando conectar os produtos ao operador que realiza a atividade às linhas de produção, sendo assim, estabelece-se a interconexão na produção em processos e melhorias dos produtos.

Do ponto de vista da inovação do produto e serviço, essas tecnologias inteligentes permitem a identificação de soluções de design cada vez mais avançadas do produto e para a inovação de processo que conduzem as novas soluções relacionadas a logística, em produções mais adaptadas e dinâmicas, ao atendimento e manutenção do processo e das fases das quais é composto também remotamente com o auxílio de instrumentação inovadora. Uma das principais tecnologias utilizadas no ambiente industrial atual é a realidade virtual (AR), uma ferramenta economicamente eficiente de apoio ao desenvolvimento produtivo e com resolução antecipada de questões relacionadas a aspectos ergonômicos e desempenho em ambientes industriais, em diferentes áreas das aplicações, do automotivo a auto-defesa, da medicina a educação, etc.

Alinhado com os princípios da Indústria 4.0, além de permitir avaliações ergonômicas em um breve tempo em comparação com os métodos padrão, a realidade virtual é uma “experiência comunicativa” em que o usuário, envolvido através dos diferentes canais sensoriais, torna-se o principal protagonista dentro do espaço gerado pelo computador.

“A realidade virtual pode ser considerada uma interface “experencial” no qual o componente de percepção (visual, tátil e cinestésico) depende da interatividade: conhece-se os objetos e usa-se para aprender por meio de experiência direta em tempo real de suas reações como uma função de minhas ações. No entanto, para alcançar essa experiência, é necessário a integração de muitos diferentes elementos.” (MORGANTI, RIVA, 2006).

O processo virtual realizado através de sistemas avançados dedicados, permite a visualização tridimensional de ambiente simulado e detecção antecipada de quaisquer problemas relacionados a posturas incongruentes da produção operacional e fornece a capacidade de validar as atividades de montagem no projeto e industrialização, reduzindo o tempo e o custo de produção do produto físico. O objetivo desta contribuição é avaliar e verificar o valor desta tecnologia na produção. Os processos de apoio aos métodos padrão atuais é através de avaliação ergonômica, durante a fase de montagem e na realização de atividades de trabalho em postos de trabalhos manuais. A interação entre a disciplina de ergonomia e tecnologia da realidade virtual trouxe o conceito ergonomia virtual, definida como a principal forma de ergonomia preventiva (LAUDANTE, 2017).

2.2.4 REALIDADE AUMENTADA PARA APOIAR AS OPERAÇÕES DE MANUTENÇÃO E MANUFATURA

De acordo com, (AZUMA, 2016) e (AZUMA, 1997), desde os primeiros trabalhos de pesquisa, a realidade aumentada (AR) foi reconhecida como um suporte interessante na indústria para aplicações de manutenção, montagem e reparo de máquinas. Por exemplo, (FEINER et. al, 1993) descreve sobre KARMA, que é um protótipo de um sistema de realidade aumentada que apresenta uma manutenção simples de impressora laser para o usuário final com aplicação baseada em um visor montada na cabeça transparente, o autor ainda explica que, uma das principais vantagens de usar um aplicativo de AR em comparação com a tradicional é que o operador pode acessar as informações necessárias para realizar as atividades diretamente na área de trabalho, sem a necessidade de consultar o manual tradicional impresso. O tipo de informação a ser exibida em AR, segundo (RADKOWSKI et. al, 2015), a fim de permitir uma tarefa de manutenção eficiente ainda é um problema em aberto.

A realidade aumentada descrita por (WEBEL et. al, 2013), também permite uma modalidade de treinamento eficiente para manutenção e montagem que acelera a aquisição de novas habilidades pelos técnicos em procedimentos de manutenção. Assim como, (HARITOS et. al, 2005) descreve que uma AR móvel na área de manutenção de aeronaves, por exemplo, em substituição do modelo tradicional no serviço de treinamento, pode ser útil tanto para treinamento de tarefa de trabalho,

quanto para a orientação de tarefas de trabalho para iniciantes técnicos no ambiente de trabalho.

Já Regenbrecht et. al (2005) apresenta alguns exemplos de aplicação, onde a AR é usada no setor da indústria automotiva e também aeroespacial, mostrando as potenciais aplicações industriais que utilizadas nos possíveis campos de aplicação industrial, principalmente na manutenção e montagem de produtos.

Enquanto Ferrise et. al (2013) descreve uma aplicação colaborativa da AR, onde há uma simulação de montagem haptica é conectada remotamente com uma aplicação de AR para permitir o treinamento de um operador habilidoso para um não qualificado e, afirma que, a principal desvantagem deste aplicativo é que requer um longo tempo de utilização. Esta é uma das principais desvantagens de várias aplicações existentes de AR na área de manutenção, e, em particular, daquelas baseadas na utilização de geometrias tridimensionais de um produto. Alega que, geralmente, cada aplicação é desenvolvida especificamente para um produto específico usando as geometrias tridimensionais do CAD. Enquanto, esta abordagem pode ser bem-sucedida de uma perspectiva de marketing, as geometrias durante as operações de manutenção podem criar oclusões, mesmo quando tornadas ligeiramente transparentes. Além disso, dependendo da qualidade do algoritmo de rastreamento, as geometrias podem não ser sobrepostas perfeitamente às geometrias reais, criando uma experiência ruim para o usuário, o último problema citado por (FERRISE et. al, 2013), bastante comum nos primeiros exemplos de aplicações de AR, ainda não foi resolvido. Em outras aplicações, em vez de representar geometrias em movimento, fazem uso de alguns símbolos tridimensionais, indicando as operações a realizar, ou seja, girar no sentido horário ou anti-horário um parafuso e assim por diante. Ao analisar a literatura, percebe-se que um dos problemas mais interessantes que a comunidade científica tem de enfrentar é o tipo de informação a serem adicionadas à realidade para realizar as operações de manutenção.

Conforme descrito por (BORDEGONI et. al, 2014), o desenvolvimento de uma aplicação como suporte à manutenção remota baseada na combinação de ferramentas móveis com tecnologias AR com o objetivo de permitir que as empresas executassem remotamente atividades de manutenção de diversos produtos industriais, sem necessidade de ambientes estruturados ou de conexões com a internet de alta velocidade. O aplicativo não foi baseado em modelos tridimensionais

e ou animações, mas em símbolos bidimensionais de instruções que podem ser colocados em produtos existentes. O aplicativo foi projetado para reduzir tanto quanto possível o tempo de autoria e foi baseado em interfaces que o operador qualificado poderia usar para instruir o não qualificado. O aplicativo foi testado com várias empresas durante anos, e novas funcionalidades foram introduzidas para melhorar a eficácia da manutenção colaborativa remota. A seguir, vamos primeiro descrever as especificações que um aplicativo deve incluir, com base na experiência de (BORDEGONI et. al, 2014), e também será descrito como o aplicativo original foi aprimorado para levar em consideração o feedback que recebemos da indústria, lembrando-se que, segundo o mesmo autor, o aplicativo ainda está em desenvolvimento.

2.2.5 UMA FERRAMENTA PARA MANUTENÇÃO REMOTA

2.2.5.1 ANÁLISE DE PRÉ REQUISITO

Uma análise descrita por (MANSONI, 2017) como pré-requisito para implantar uma ferramenta em manutenção remota com base nas necessidades industriais para possibilitar a manutenção remota após o lançamento com a aplicação descrita por (BORDEGONI, 2014) é destacada abaixo, e deve incluir os seguintes recursos para um suporte remoto, conforme descreve a Tabela 1, elaborada pelo autor.

Tabela 1 –Análise de pré-requisito para implantar uma ferramenta de manutenção remota.

Análise de pré requisito para implantar uma ferramenta em manutenção remota					
Módulos	Implantação	Diagnóstico	Sistema	Descrição desse processo	Ponto negativo
Módulo de Inspeção	O especialista deve ver o motivo e onde ocorreu a falha para entender como realizar a manutenção	Realizado visualmente ou inspecionado auditivamente	Deve incluir um módulo com um streaming de vídeo e áudio	Manutenção especialista deve ser capaz de ver e ouvir através dos olhos e ouvidos do operador, e em seguida, operar através das suas mãos	As tecnologias móveis disponíveis não permitem uma inspeção visual eficaz, às vezes, a falha faz a máquina parar de funcionar, mas às vezes a falha causa movimentos indesejados e para detectar a falha é necessário ver a máquina enquanto ela está funcionando
Uso da linguagem universal	Uso de símbolos gráficos no sistema, junto com mensagens de texto e áudio			Pode acontecer que o especialista em manutenção seja solicitado a comunicar com os operadores locais, que não falam necessariamente a mesma língua	Operadores que não são bilingues ou não consigam se comunicar com outros operadores de nacionalidades diferentes
Utilizando a visando de uma pessoa operando de forma remota	O operador remoto é especialista neste processo e deve seguir passo a o que o operador local está executando		Sistema operado de forma remota por operador especialista	O operador remoto é especialista neste processo e deve seguir passo à o que o operador local está executando	
Modelo de registro de manutenção	A operação de manutenção deve ser registrada, a fim de se tornar um manual em potencial, se a mesma falha ocorrer em outra máquina, ou, para registrar a operação de manutenção por questões legais		Sistema de manutenção gerando registro	A operação de manutenção deve ser registrada, a fim de se tornar um manual em potencial, se a mesma falha ocorrer em outra máquina, ou, para registrar a operação de manutenção por questões legais	

Fonte: análise verificada pelo autor.

Essas considerações foram baseadas na experiência que (BORDEGONI et. al, 2014) realizou em anos com empresas.

Algumas demais considerações descritas por (MANSONI et. al, 2017) devem ser consideradas como seguintes restrições consideradas durante o desenvolvimento e a atualização do aplicativo:

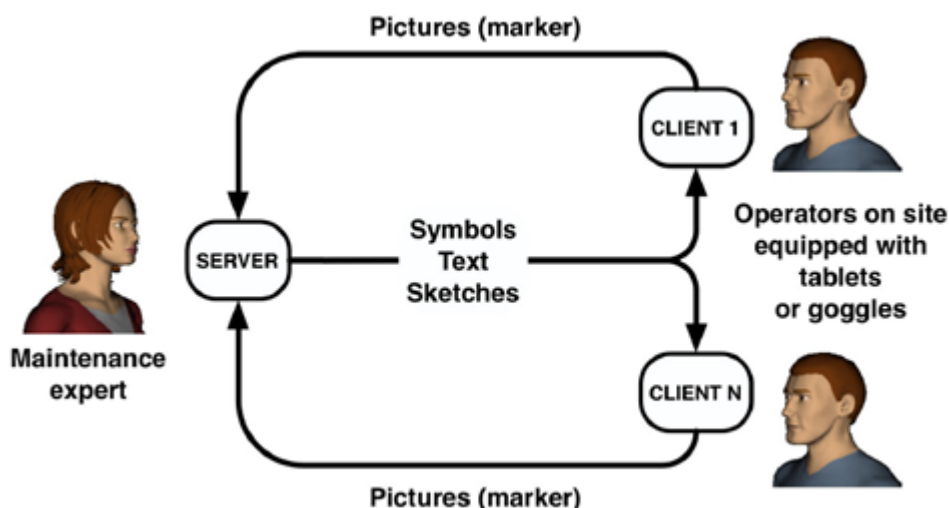
- A manutenção pode ser realizada em um ambiente equipado com conexões de internet de alta velocidade mas, também pode ser realizado em um local onde a conexão não é tão boa quanto necessária para a troca informações como streaming de vídeo de alta velocidade, imagens de alta definição, geometrias tridimensionais e assim por diante. É importante projetar o aplicativo para funcionar nas piores condições.
- A manutenção pode ser realizada em máquinas conhecidas, onde modelos tridimensionais do CAD são disponíveis porque são usados durante a atividade de design, mas também máquinas antigas onde geometrias tridimensionais não estão disponíveis ou mesmo novas máquinas que foram projetadas usando ferramentas de modelagem bidimensional. Além disso, as operações de manutenção podem ser realizadas em ambientes com um alto nível de informação visual disponível. Nesta situação, as informações devem ser fornecidas com moderação para não sobrecarregar o canal visual. Por esses motivos, na solução proposta pelo autor, decidiu-se não exibir informações geométricas, como peças móveis. Decidiu-se comunicar então, apenas as informações necessárias para realizar a tarefa. Este tipo de informação, que pode ser um símbolo, um esboço, ou algumas palavras, na visão do autor, devem complementar as informações já disponíveis no ambiente.

2.2.6 NOVIDADES DE IMPLEMENTAÇÃO

A Figura 4, de tradução livre, ilustra a arquitetura do aplicativo conforme descrito pelos autores, a mesma não foi modificada desde o primeiro lançamento conforme descrito por (BORDEGONI et. al, 2014), enquanto alguns recursos foram adicionados, alguns removidos ou alterados. A arquitetura do aplicativo é do tipo cliente-servidor, que também suporta a conexão de um operador qualificado com um não-qualificado, ou com vários operadores não qualificados trabalhando na mesma máquina, localizados remotamente conforme descreve (MASONI et. al, 2017).

Figura 4 - Arquitetura do Sistema de Manutenção Remota em uma Indústria 4.0 –

Tradução livre do autor: O especialista e os operadores podem se comunicar com um sistema servidor/cliente. Os operadores locais enviam fotos do ambiente real ao especialista, que as utiliza para localizar instruções que serão devolvidas por meio de símbolos, esboço ou texto.



Fonte: Supporting remote maintenance in Industry 4.0 through augmented reality.

O aplicativo funciona da seguinte forma: o operador/ operadores não qualificados (cliente) tira/tiram algumas fotos dos ambientes reais e envia-os para o habilitado (servidor) automaticamente através do aplicativo. Essas fotos são utilizadas para o cliente como um marcador para visualizar as instruções no ambiente real, e para o servidor para indicar as tarefas de manutenção a realizar.

(MASONI et. al, 2017), explica que o operador experiente utiliza alguns símbolos para indicar onde agir e o que fazer, basicamente exibindo a operação mais comum (girar no sentido horário e anti-horário, montar e desmontar, localizar e alertar). Um estudo mais preciso dos símbolos ainda está em andamento pelo mesmo autor. Porém, também, ele pode fazer um rascunho na foto, ou adicionar uma mensagem de texto e enviar as informações ao cliente. O recurso de esboço não foi incluído no aplicativo descrito por (BORDEGONI et. al, 2014). Na versão anterior do aplicativo, um sistema de chat foi incluído, e decidiram removê-lo porque não era utilizável quando o operador local estava usando óculos de proteção e, portanto, teve que ser desativado. Então,

substituiu-se o sistema com a possibilidade de enviar mensagens de texto diretamente exibidas na AR (realidade aumentada). O especialista em manutenção pode escrever uma mensagem de texto e também decidir onde exibi-la. Na verdade, o esboço e o texto serão exibidos em realidade aumentada para o cliente. O servidor pode se comunicar simultaneamente com um ou mais clientes atuando no mesmo sistema.

(MANSONI et. al, 2017) explica que a nova versão do aplicativo ainda é baseada no ambiente Unity3D 4.3.4 (<http://unity3d.com>), integrado com a ferramenta Qualcomm Vuforia 2.8.9 (<https://www.vuforia.com>) usada para rastreamento de cena real, e permitindo sobrepor informações digitais ao ambiente real. Vuforia é a tecnologia de rastreamento usada para reconhecer as imagens que serão usadas como um marcador para aplicações de realidade aumentada. Em particular, o autor descreve que, Vuforia permite usar cenas de imagem como marcadores. Isso é particular do aplicativo, pois nenhum ambiente estruturado é necessário para os componentes de realidade aumentada. O aplicativo foi desenvolvido e usado com vários dispositivos de hardware. Atualmente, o operador experiente pode indicar as operações a serem executadas usando um computador pessoal, equipado com a tradicional entrada e saída de dispositivos (teclado, mouse e monitor) ou um *tablet* ou dispositivo móvel equipado com o sistema operacional Android.

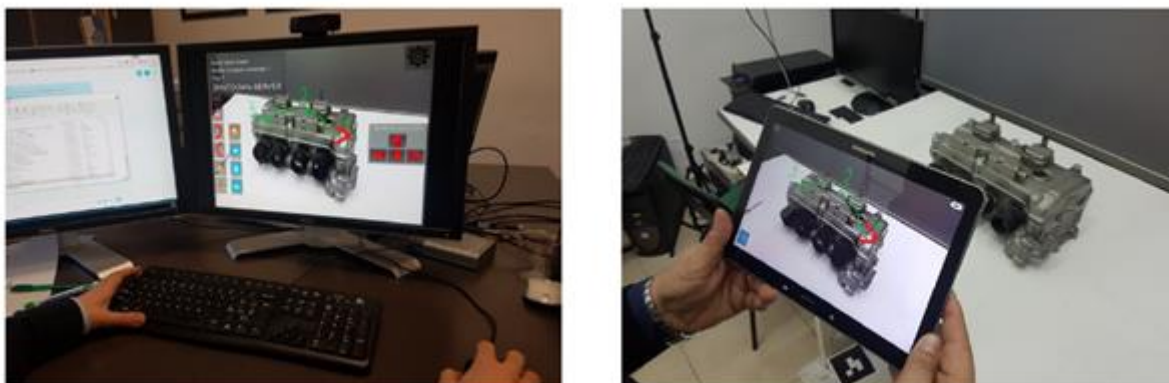
Segundo (MANSONI et. al, 2017) o operador não qualificado pode usar um *tablet* (que também é equipado com o sistema operacional Android) através de que ele assiste a uma série de declarações projetadas diretamente nos objetos atendidos. Alternativamente, o mantenedor pode usar capacetes ou quaisquer óculos de proteção de AR, que lhe permitam ver as instruções de manutenção simultaneamente com a execução da operação.

Embora, a maioria das empresas sejam fascinadas pelo uso de óculos de proteção, o que pode permitir ao operador local para trabalhar enquanto vê as informações de AR exibidas na cena real (vendo, assim, o AR ambiente com mãos livres), descobrimos que os óculos de AR ainda não estão prontos para isso pelos motivos já discutidos. Assim, embora durante anos, os autores tenham tentado esta aplicação em várias tecnologias vestíveis, os mesmos estão convencidos de que a melhor solução ainda é o uso do *tablet*.

2.2.7 DESCRIÇÃO DO USO DA FERRAMENTA

Conforme Mansoni et. al (2017) informa, o aplicativo permite que o usuário, na primeira tela, decida se é servidor ou cliente, ou seja, escolher iniciar a sessão como operador qualificado ou não qualificado. Deve-se sublinhar que, devido ao uso de algoritmos de rastreamento Vuforia, a versão cliente não roda em um computador pessoal (algoritmos Vuforia foram desenvolvidos especificamente para tecnologias móveis), conforme ilustra a Figura 5, com tradução livre.

Figura 5 - Arquitetura do sistema em manutenção remota através de realidade aumentada – O especialista e os operadores podem se comunicar com um sistema servidor/cliente. Os operadores locais enviam fotos do ambiente real ao especialista, que as utiliza para localizar instruções que serão devolvidas por meio de símbolos, esboço ou texto.



Fonte: Supporting remote maintenance in Industry 4.0 through augmented reality.

O mesmo autor, (MANSONI et. al, 2017) descreve o uso do aplicativo quando, primeiro, o cliente enquadra a cena onde o usuário deve operar e tira uma foto que é enviada automaticamente para o servidor. Essas imagens são usadas como marcadores para o aplicativo de realidade aumentada (AR). Na parte superior direita da tela do cliente, há o botão para tirar uma foto do ambiente real. O botão só aparece se o programa reconhecer a imagem como um marcador potencialmente bom enquanto analisa a cena. Normalmente, as máquinas industriais são bem adequadas para serem usadas com marcadores, e se isso não for verdade, uma solução simples é adicionar informações visuais ao ambiente real. Assim que o operador qualificado receber a imagem, ele pode fazer anotações em sua tela (lado esquerdo na Figura 5),

escolher que tipo de mensagem enviar ao operador local entre símbolos, decidimos representar um conjunto de operações comuns em manutenção: desparafusar, parafuso, indicação de localização, advertir, desmontar e montar. Para mover os símbolos, o operador pode usar algumas setas, que são representadas no lado direito da tela. Para os esboços, o operador qualificado pode escolher entre três cores (branco, vermelho e verde). Terminado o esboço, este é transformado em imagem e enviado ao cliente. Finalmente, ele também pode enviar mensagens de texto. Algumas funções dos elementos da Interface Gráfica do Usuário (GUI) do aplicativo do servidor podem ser exibidas ou ocultas seletivamente. Já na parte do cliente, inserido no aplicativo (lado direito da Figura 5), o operador não qualificado através da janela de realidade aumentada (AR) vê o símbolo ou os esboços enviados pelos operadores qualificados, sobrepostos, ao ambiente real no local correto. O autor descreve que, a Interface Gráfica do Usuário (GUI) aqui é limpa para não sobrecarregar o canal visual do operador e para ser usada com diferentes dispositivos (óculos, *smartphones*, *tablets*).

2.2.8 USO DA REALIDADE AUMENTADA

Dessa forma, Mansoni et. al (2017) conclui que, na recente iniciativa da Indústria 4.0, a realidade aumentada (AR), passou a ser considerada uma das tecnologias mais interessantes em que as empresas deveriam investir, especialmente para melhorar seus serviços de manutenção, embora esse tipo de uso da realidade aumentada não seja uma ideia nova como destacado por (AZUMA et. al, 1997 e 2016).

No passado, várias limitações impediram a realidade aumentada (AR) de se tornar uma ferramenta industrial. Neste trabalho, os autores analisaram essas limitações que são tecnológicas se foram superadas e a realidade aumentada (AR) parece estar pronta para se tornar uma ferramenta industrial. Neste trabalho, os autores também analisaram essas limitações que são tecnológicas (*software/hardware*) e também devido ao uso incorreto da tecnologia. Agora que algumas das limitações tecnológicas foram superadas e a realidade aumentada (AR) parece estar pronta para se tornar uma ferramenta para a indústria, os autores acreditam que a comunidade científica pode se concentrar em tentar resolver os reais problemas reais. Em uma atividade de pesquisa em andamento, os autores analisaram um conjunto de necessidades de

algumas empresas interessadas em melhorar seus serviços de manutenção utilizando as tecnologias hoje disponíveis e em particular as tecnologias de realidade aumentada (AR). Os autores também descrevem a projeção e implementação de ferramenta de manutenção remota baseada em tecnologias móveis e AR disponíveis no mercado. Inicialmente descritas por (BORDEGONI et. al, 2014), testando a primeira versão com alguns usuários finais e, com base no feedback que esta pesquisa, segundo os autores receberam, foi introduzido então novos recursos. Os autores descreveram a nova versão do sistema de manutenção remota e, o mais importante, a lógica por traz dele, que é o resultado mais importante que os autores obtiveram da interação com os usuários finais.

Segundo os autores, a pesquisa e o desenvolvimento ainda estão em andamento para que esta aplicação se torne uma ferramenta industrial a partir de um protótipo de laboratório.

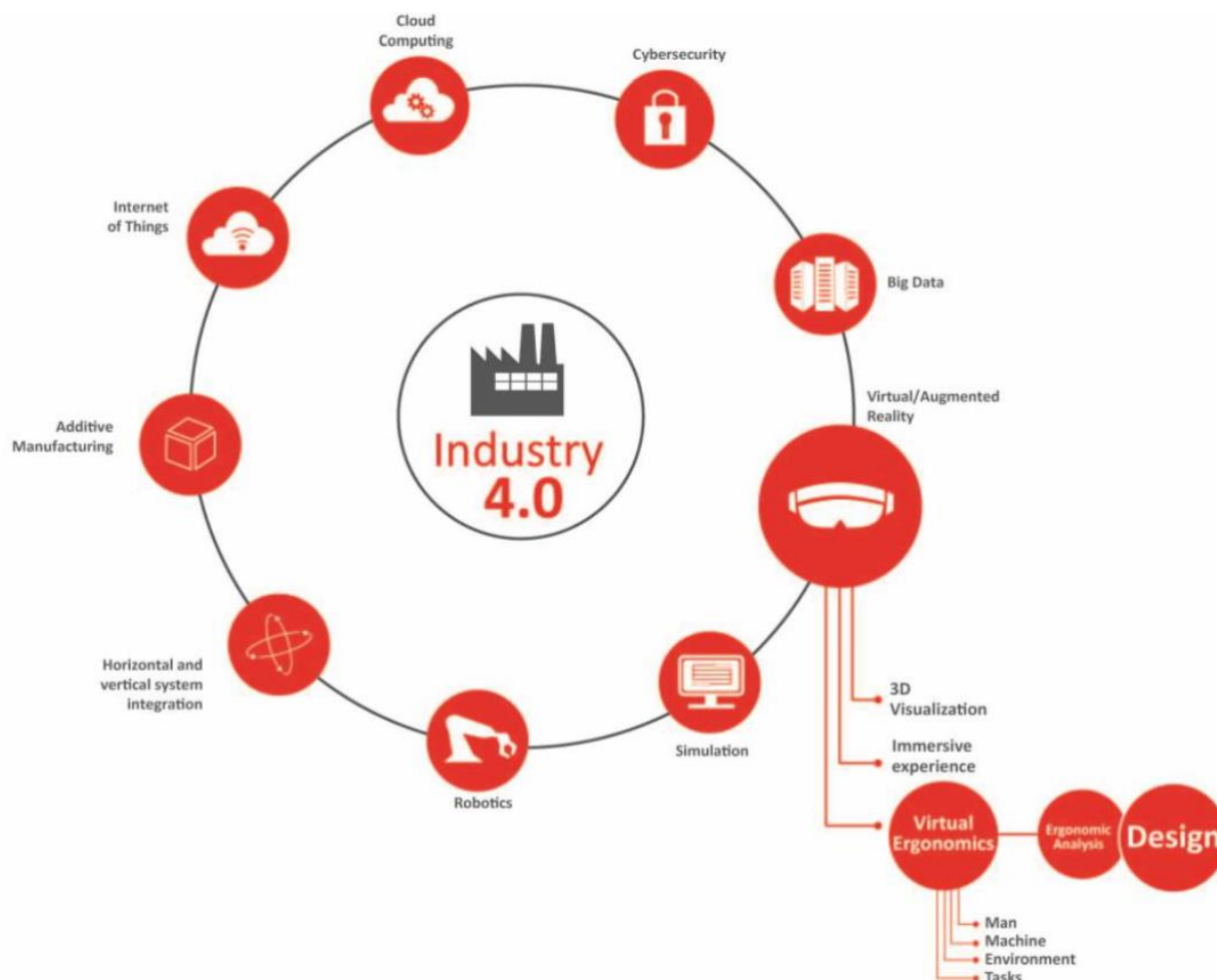
2.2.9 DESIGN E ERGONOMIA NA INDÚSTRIA 4.0

Sobre design e ergonomia, (LAUDANTE, 2017) defende que, a contribuição é baseada em uma abordagem multidisciplinar e enfatiza a interação entre diferentes habilidades e conhecimentos de campos que também parecem distantes. A disciplina de design integra com engenharia e medicina ocupacional. Por meio do uso de tecnologias avançadas, existem muitas possibilidades oferecidas para o design. Por meio da disciplina de design, vista como ferramenta para inovar, é possível definir e projetar equipamentos, ferramentas e estações de trabalho manuais por meio da abordagem do sistema ergonômico, a partir do uso da realidade virtual. Os métodos de design permitem que você estabeleça um link direto com o usuário, detectando e entendendo as necessidades e com foco no potencial da tecnologia e no impacto na cultura e na sociedade.

Conforme definido pelo “Conselho Internacional de Sociedades de Desenho Industrial do ICSID: O design é uma atividade criativa cujo objetivo é definir as múltiplas qualidades de objetos, processos, serviços e seus sistemas ao longo de seu ciclo de vida. O design é, portanto, o fator central na humanização das tecnologias e fator crucial para o intercâmbio cultural e econômico”.

Design e ergonomia na Indústria 4.0 é baseado em uma abordagem multidisciplinar e enfatiza a interação entre diferentes habilidades e conhecimentos de campos que também parecem distantes. A disciplina de design integra com a engenharia e medicina ocupacional por meio de tecnologias avançadas, existem muitas possibilidades oferecidas para o design e por meio do design, visto como uma ferramenta de inovação, é possível definir e projetar equipamentos, ferramentas e estações de trabalho manuais abordados por meio do sistema ergonômico a partir do uso da realidade virtual. Os métodos de design permitem que você estabeleça um link direto com o usuário, detectando e entendendo as necessidades e com foco no potencial da tecnologia e no impacto na cultura e na sociedade. Conforme definido pelo “Conselho Internacional de Sociedades de Desenho Industrial do ICSID: “O design é uma atividade criativa cujo objetivo são definidas múltiplas qualidades de objetos, processos, serviços e seus sistemas ao longo de seu ciclo de vida. O design é, portanto, o fator central da humanização das tecnologias e fator crucial para o intercâmbio cultural e econômico. ” A Figura 6 ilustra uma nova abordagem para design com ergonomia virtual, com tradução livre.

Figura 6 - Nova abordagem para design com ergonomia virtual, em sentido da direita para a esquerda: robótica, sistema de integração vertical e horizontal, manufaturas adicionadas, internet das coisas, computação em nuvem, cibersegurança, big data, realidade virtual e aumentada em visualização 3D com experiência emersiva em ergonomia virtual e interação do homem, máquina, ambiente e tarefas.



Fonte: Industry 4.0, Innovation and Design. A new approach for ergonomic analysis in manufacturing system.

Assim, segundo (VITTORIA, 1999) a atual revolução industrial que emprega a disciplina de design envolve empresas por meio de investimento em equipamentos e atua para criar novos padrões de consumo, para gerar conhecimento e fornecer serviços inovadores. Destacando a contribuição específica do projeto tecnológico “para o desenvolvimento de uma cultura industrial destinada a equilibrar os dados

emocionais e estéticos do design passa a ser o “lugar de convergência de ideias e competências relacionadas com uma inteligência multidisciplinar.

Enquanto (CASONI, FANZINI, 2011) afirma que, a abordagem do design para a inovação também se qualifica na capacidade de combinar duas orientações diferentes: de um lado, a busca de novos conhecimentos científicos e tecnológicos e oportunidades de mercado e, por outro lado, a capacidade de alavancar a base do conhecimento de projetos-produtos já existentes no mercado, garantindo uma inovação incremental. (LAUDANTE, 2017) diz que, na era de constantes transformações e experimentos tecnológicos, o design desempenha um papel central no novo ambiente de fabricação, onde a ergonomia é o ponto focal para a melhoria em termos de produto e processo produtivo com foco no bem-estar do usuário e para sua segurança; o principal ator na fábrica digitalizada é o operador de produção que faz a interface com os diferentes equipamentos presente na linha.

Já a ergonomia aplicada ao desenho industrial está agora muito ativa no campo de produtos de grandes séries e aqueles com tecnologias avançadas, tanto para o grande peso que o desenho industrial passou a ter para o desenvolvimento da qualidade, quanto para a evolução das relações complexas envolvidas no projeto, a tecnologia, o design e a satisfação do usuário”. (BANDINI BUTTI, 2008).

Sendo assim, o design industrial e a ergonomia representam em paralelo novas oportunidades para a investigação oferecidas pelas atuais inovações tecnológicas a serem traduzidas em produtos tangíveis e criando uma ponte direta entre tecnologia, sociedade e o mundo da produção. Nos atuais contextos industriais, a ergonomia é aplicada de forma preventiva através do uso de meios e sistemas digitais que permitem reduzir o tempo de verificação e validação de análises ergonômicas para a melhoria na fase do projeto de equipamentos utilizados nas etapas do processo produtivo. As tecnologias modernas da Indústria 4.0, no detalhe da virtualização de processos e o uso da realidade virtual no contexto industrial cria a Ergonomia Virtual através da qual é possível oferecer valiosos apoio na tomada de decisão como parte do processo de design de novas linhas de produção, ou parte delas, reduzindo a necessidade de protótipos físicos e reduzindo o tempo e custos de desenvolvimento. Através desse método é possível avaliar os Fatores Humanos (HF) introduzidos em ambientes virtuais, já criado para protótipos de produto e processo, manequins

virtuais, modelos britânicos digitais para simular o homem do ponto de vista cinemático e dinâmico (LAUDANTE, 2017).

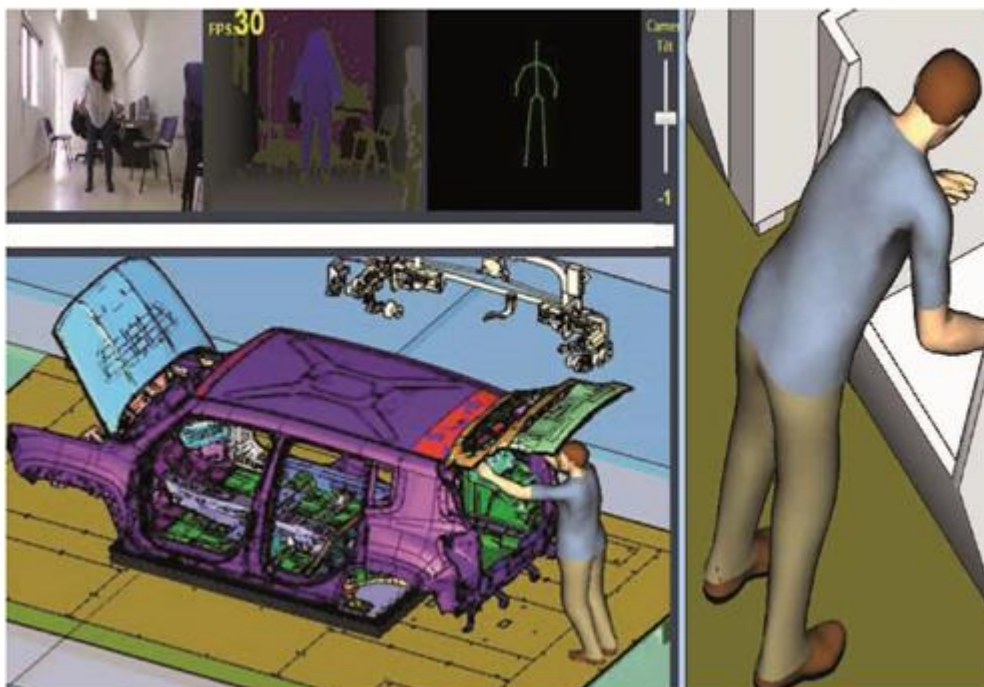
“Os modelos de simulação podem ser obtidos rapidamente, com a mesma rapidez, visto de todos os ângulos, e modificados se necessário. Portanto, o impacto positivo na melhoria de um produto é significativo, tanto que, graças à biomecânica, designers, engenheiros e outros especialistas que são capazes de conduzir um estudo muito completo de todos os aspectos do projeto em suas habilidades e potencial. A biomecânica é um dos componentes da ergonomia e é intimamente relacionado ao fator humano de design; enquanto os denominadores comuns das três disciplinas podem ser encontrados na tecnologia. ” (LUPACCHINI, 2008).

Segundo, (LAUDANTE, 2018), o uso de modelos digitais permite uma descrição matemática do movimento do operador durante as fases operacionais, que paralelamente utiliza as técnicas de visualização em ambientes virtuais, e fornece ao design-ergonomista os dados disponíveis de outra forma. Por meio de requisitos de processamento de dados, os requisitos são verificados para serem cumpridos com a estação de trabalho manual ou o uso de determinado equipamento presente ao longo da linha de produção, incluindo a visibilidade, acessibilidade, e monitoramento dos índices de ergonomia e análise antropométrica.

Ainda conforme (LAUDANTE, 2018) para validar a metodologia, com o objetivo de identificar novas formas de otimizar o processo de montagem, um estudo de caso significativo foi desenvolvido como parte do projeto de colaboração entre a Universidade de Estudos da Campania “Luigi Vanvitelli” e a empresa FCA Fiat Chrysler Automobiles, em termos de integração geral de gerenciamento do trabalho e do layout, partindo dos princípios da “organização do WorkPlace” e as teorias da “Produção Enxuta”, envolvendo a contribuição de várias disciplinas com diferentes habilidades para melhorias e implementação no processo de produção existente, foram utilizados dispositivos tecnológicos e sistemas de rastreamento e permitidos reproduzir um segmento da cadeia de produção no ambiente virtual para analisar uma tarefa de trabalho na fase de montagem. Digitalização e informatização dão vida a “fábrica inteligente”, que é inteligente, inovadora, flexível, e colaborativa em que adaptação, eficiência e ergonomia foram as principais diretrizes de caso estudado. Em detalhes, foi realizado um caso piloto para a aplicação de ferramentas de realidade virtual no setor automotivo no contexto de produção. Através da utilização do software

Tecnomatrix Process Simulate Siemens onde foi reproduzido um cenário virtual a ser testado com a inserção de modelos 3D dos diferentes equipamentos presentes na linha produtiva e com o manequim virtual que, dependendo dos requisitos das tarefas, é possível manipular e definir comportamentos muito realistas. Posteriormente, a cena virtual encenada foi explorada de forma “imersiva” através do uso de sistemas de rastreamento de movimento que permitiram a detecção de uma série de dados de forma rápida e intuitiva. A Figura 7 apresenta modelos da configuração em uma área virtual; de um mundo real para um mundo virtual.

Figura 7 - Modelos de configuração em uma área virtual e uma área real.



Fonte: Industry 4.0, Innovation and Design. A new approach for ergonomic analysis in manufacturing system.

Segundo (LAUDANTE, 2017) através da implementação da “ergonomia virtual”, o manequim conduzido pelo operador real “navega” rapidamente por uma cena virtual, é colocado em pouco tempo na estação de trabalho e assume postura real durante a execução de uma tarefa de trabalho. É possível verificar a priori a acessibilidade de um ponto de trabalho ou para a utilização de equipamentos através da aquisição dinâmica de dados ergonômicos pelos diferentes movimentos do manequim. O autor

ainda informa que, o mundo virtual é integrado ao real, o operador externo é sincronizado com o boneco virtual e passa a fazer parte do mundo simulado, transferindo os gestos do avatar e ações. Após a análise da interação entre o homem e os dados ergonômicos do sistema, foram detectados suplemento aos métodos padrões de posturas ergonômicas dos operadores para o processo de verificação e, foi observado a coerência dos índices ergonômicos derivados dos métodos padrões, com aqueles obtidos com a abordagem virtual. Os métodos padrões levam muito tempo e são feitos através de uma série de modelos que são gerados e baseados na observação direta dos operadores durante o curso de seus trabalhos. Através deste novo método de detecção de dados ergonômicos será possível trazer uma inovação substancial nos ambientes de produção existentes, nos quais denota uma maior atenção para o bem-estar e segurança do operador. Por meio do suporte tecnológico, o aprimoramento das atividades dos trabalhadores é um aspecto fundamental que emprega todo o seu potencial na execução de vários processos.

(LAUDANTE, 2017) ainda afirma que, nos moldes da Indústria 4.0, a Realidade Aumentada (AR) passou a ser considerada uma das tecnologias mais interessantes que as empresas devem investir, principalmente para melhorar seus serviços de manutenção. Várias limitações tecnológicas no passado, impediram a AR de se tornar uma ferramenta industrial eficaz. Agora, algumas destas limitações foram superadas, outras ainda não foram colocadas fora da prateleira de tecnologias. Sendo assim, (MASONI, 2017) apresenta uma solução para manutenção remota baseada em dispositivos móveis prontos para o uso de tecnologias de realidade aumentada. (MASONI, 2017) indica que a arquitetura do aplicativo nos permite conectar remotamente um operador qualificado em uma sala de controle com um não qualificado, localizado onde a tarefa de manutenção deve ser realizada. Esta aplicação foi melhorada com base no feedback recebido por parceiros industriais.

2.2.10 EXOESQUELETO NA INDÚSTRIA 4.0

Segundo (BANCES et. al, 2020), a volatilidade e flexibilidade de uma linha de produção em uma Indústria 4.0 exige alta dinâmica durante as tarefas de montagem e movimentos repetitivos em uma postura corporal pouco ergonômica. Assim, os trabalhadores estão expostos ao perigo de desenvolver distúrbios osteomoleculares

relacionados ao trabalho (DORT). Estudos anteriores relataram que, os exoesqueletos ajudam a reduzir a fadiga e prevenir lesões durante o levantamento, transporte, empurrão, puxão e posições com tarefas realizadas acima da cabeça, melhorando a produtividade na indústria de manufatura.

No entanto, nenhum estudo relatou as vantagens da integração digital de uma rede de exoesqueletos em uma fábrica inteligente (Indústria 4.0), (BANCES et. al, 2020) apresenta uma visão geral dos benefícios e desafios em relação à conectividade de exoesqueletos dentro de uma fábrica inteligente. Além disso, descreve a arquitetura de comunicação de uma rede de exoesqueleto físico cibernético. Finalmente, um teste experimental de estrutura de computação em nuvem onde foi conduzida com base em protocolos de mensagens IoT (Internet das Coisas), permitindo análises de dados em tempo real nos benefícios do processo de fabricação.

(BANCES et. al, 2020) descreve que a crescente demanda dos clientes por produtos adequados aos seus requisitos individuais (customização em massa), a concorrência com o mercado global, e a complexidade da cadeia de produção para satisfazer essas demandas, são alguns desafios que um sistema de manufatura moderno deve enfrentar. Como consequência, os fabricantes requerem ferramentas de automação que podem se adaptar rapidamente às necessidades de mudança, sem paralisações ou despesas excessivas. Isso também não deve afetar sua execução de produção ou aumentar os custos de fabricação. Com base nisso, (HENNING et. al, 2013) diz que uma fábrica inteligente (SF) é capaz de gerenciar esta complexidade.

(BANCES et. al, 2020) diz que uma fábrica inteligente é baseada em sistemas ciber-físicos (CPS) e um sistema inteligente de rede de máquinas e produtos. O próprio produto comunica as informações exigidas pela fábrica inteligente (SF) para fabricação. De acordo com essas informações, a produção individual e as etapas são controladas para obter o resultado final desejado.

Os autores (BURKE et. al, 2017; LEE et. al, 2015; ZHONG et. al, 2017) ainda afirmam que, as principais características de uma fábrica inteligente (SF) são conectividade, otimização, transparência, pró-atividade e agilidade, essas características contribuem na melhoria do processo de produção. Além disso, para alcançar a conectividade no setor de automação industrial e o IoT; OPC-UA, MQTT, DDS-I e ROS são os protocolos de comunicação mais comumente usados e também os *frameworks* (PROFANTER et. al, 2019).

Por outro lado, nas fábricas inteligentes, os trabalhadores ainda estão expostos a várias atividades de produção, como montagem, cargas de trabalho física (como, manuseio de materiais), movimentos repetitivos como levantamento e movimentação de peças ou produtos para a linha de montagem, flexão frequente e postura corporal e pouco ergonômica. Portanto, eles estão expostos a desenvolver um distúrbio muscoesquelético relacionado ao trabalho (MSD). Nestes casos, um exoesqueleto, segundo (BANCES et. al, 2020), representa uma solução viável como uma ferramenta ergonômica, a fim de reduzir a MSD.

(DE LOOZE et. al, 2017 e WESSLÉN et. al, 2018) trazem uma ampla visão geral dos exoesqueletos no mercado e os protótipos desenvolvidos em universidades ou instituições de pesquisa mostra que, os exoesqueletos podem ser classificados em duas categorias:

- No sistema passivo que não usa nenhum tipo de atuador, mas sim, usa materiais, amortecedores e molas para apoiar uma postura ou movimento;
- No sistema ativo, um exoesqueleto ativo compreende no atuador para aumentar a força humana e suporta as articulações durante a operação.

Nos últimos cinco anos, o interesse pelo uso de exoesqueleto passivo nas linhas de montagem aumentou. Por exemplo, na Ford Motor Company que testou o EksoVest (desenvolvido por uma parceria entre Ford e Ekso Bionics) e registrou queda de até 83% de lesões em sua linha de montagem durante os anos de 2015-2016 conforme destaque por (BARTOSIAK, DAVE, 2017). Além disso, um estudo conduzido pela universidade estadual de Iowa que empregou sensores de eletromiografia (EMG) ligados a trabalhadores para examinar a fadiga reduziu de 18% a 39% nos ombros e bíceps, conforme avaliado por (HITCH, J., 2018). No entanto, não há estudos relatados que mostram exoesqueletos usando tecnologias IoT e uma comunicação arquitetura para a integração desses dispositivos em uma fábrica inteligente (SF).

Os autores descrevem um exemplo de implementação de uma rede de exoesqueleto com base na arquitetura de comunicação IoT, computação em nuvem (análise de dados) e o desenvolvimento de serviços em nuvem. Esta implementação foi organizada da seguinte forma conforme a descrição do processo de implementação, na seção II, é apresentado um breve resumo dos dois principais problemas comuns durante as tarefas de montagem manual, como o desenvolvimento do MSD e o fator

cognitivo. Na seção III, são fornecidas as principais tecnologias de IoT envolvendo uma rede de exoesqueleto e tendências em comunicação, computação em nuvem para desenvolver processamento de fluxo e análise de dados. A seção IV descreve a implementação de uma rede de exoesqueleto baseada em protocolos de comunicação MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). O método usado para processamento de stream e análise de dados, bem como o desenvolvimento de aplicativos de software e serviços na nuvem é descrito. Na seção V, os principais problemas e desafios das tecnologias-chave são apresentados. Finalmente, na seção VI, uma breve conclusão e visão de desenvolvimento adicional de integração de exoesqueletos em uma fábrica inteligente (SF).

2.2.11 LINHAS DE MONTAGEM EM UMA INDÚSTRIA 4.0

Os autores, (BANCES et. al, 2020) diz que apesar da alta conectividade e automação em uma fábrica inteligente, a montagem manual ainda é uma parte fundamental na linha de produção. A variação contínua de produtos e tarefas exige um alto nível de flexibilidade e habilidade cognitivas. Quer dizer, capacidades dos seres humanos de observar, decidir e adotar ações adequadas são requeridas. No entanto, os trabalhadores da fábrica ainda estão expostos a carga de trabalho física, movimentos repetitivos, flexão frequente e posturas corporais não ergonômicas. Portanto, eles estão expostos ao perigo de desenvolver distúrbios musculoesqueléticos relacionados ao trabalho (MSD).

Por outro lado, (BROLIN et. al, 2016 e 2017), complementa que, devido à variação e complexidade do produto na fabricação, o operador de montagem precisa de informações apropriadas no momento certo para realizar o correto, em uma tarefa eficaz e precisa. Caso contrário, existe um alto risco que esta variação afeta o tempo e aumenta os erros durante a montagem.

2.2.12 DESENVOLVENDO DISTÚRBIOS MUSCULOESQUELÉTICOS (MSD)

As MSDs são umas das reclamações mais comuns relacionadas ao trabalho, afetando milhões de trabalhadores e custando bilhões de euros para as empresas. Quanto aos trabalhadores de fábrica, esses MSDs podem tornar sua vida profissional penosa e,

em muitos casos, leva-la à aposentadoria precoce. Existem vários estudos que relataram como os MSDs afetam a saúde dos trabalhadores. Por exemplo, em 2015, mais de 61% dos trabalhadores relataram qualquer tipo de MSD na Europa, conforme relata (European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions, 2015), aumentando em 21% em comparação com o estudo anterior realizado em 2012, conforme descreve (ANXO et. al, 2013).

Particularmente, na indústria automotiva, alto desconforto e problemas ergonômicos que afetam a saúde dos trabalhadores foram notificados, conforme descreve (LANDAU et. al, 2008). Outros estudos afirmaram que cerca de 70% das tarefas de trabalho tem um risco muito alto de MSDs para a postura do pescoço e 60% para as costas (em condição de movimento) e postura de ombro/ braço conforme descreve (AZIZ et. al, 2017).

Em uma indústria automotiva, algumas soluções foram implementadas para reduzir MSDs, por exemplo, o uso de um assento em balanço para algum processo de montagem interior do veículo. A eficácia da cadeira depende da região do veículo durante a montagem. Os resultados experimentais mostram que na maioria dos casos, as cargas da coluna foram reduzidas durante a atividade, mas não o músculo do ombro, é o que relata (DE LOOZE et. al, 2016). Além disso, esta solução tem a desvantagem de requer um certo tempo para caber a cadeira na posição correta e confortável para trabalhar. No entanto, outras soluções de ergonomia podem reduzir MSDs e são necessárias para as seguintes atividades:

- As tarefas de “posições aéreas” que conduzem a uma alta probabilidade de dor no ombro/ braço;
- A instalação de pneus que conduzem a uma alta probabilidade de dor no punho, ombro e dor nos braços;
- A instalação do assento do automóvel que afeta os músculos e articulações nos ombros, braços, costas e punhos;
- Tarefas logísticas, como levantamento e transporte de componentes pesados embalados em caixas na altura do quadril;
- Tarefas logísticas, como coleta e colocação de objetos de/ para uma gaiola de palete.

2.2.13 FATOR COGNITIVO

Sobre fatores cognitivos, (BANCES et. al, 2020) descreve que em fábricas inteligentes (fábricas do futuro/ fábricas modernas) na área de manufatura dinâmica de vários produtos, onde a tarefa é contínua, exige um alto nível de flexibilidade e habilidades cognitivas, onde ainda há a capacidade humana de observar, decidir e adotar as ações adequadas. Essas variações de tarefas podem afetar o processo de montagem e existe um alto risco de erros de montagem. O trabalhador provavelmente mostra um comportamento automático após uma série do mesmo produto e misturar informações de um produto com outro. Consequentemente, a produtividade e até a qualidade do produto são afetadas. Portanto, em uma linha de montagem manual, é importante que o trabalhador receba as informações corretas no momento certo para realizar uma tarefa de montagem eficaz e precisa. A questão deste sistema é que os trabalhadores precisam estar preparados para configurações de diferentes tipos e diferentes componentes de cada produto e isso coloca uma pressão considerável sobre eles (BROLIN et. al, 2017).

Segundo (BROLIN et. al, 2016), alguns estudos experimentais mostraram que, os produtos e variantes aumentam a complexidade na fabricação e tem um efeito negativo na produtividade e na qualidade do produto. O motivo é o grande número de componentes a serem tratados, bem como uma apresentação insuficiente dos suprimentos e informações na área de montagem da estação de trabalho.

2.3 TECNOLOGIAS E TENDÊNCIAS DE IOT – EXOESQUELETOS OPERANDO EM REDES

2.3.1 EXOESQUELETOS OPERANDO EM UM SISTEMA CIBER-FÍSICO (CPS)

O sistema ciber-físico, vulgo CPS, são entidades que estão em intensa conexão com o mundo físico circundante, fornecendo e usando, ao mesmo tempo, serviços de acesso e processamento de dados disponíveis na Internet (MONOSTORI, 2016). Com base nesta definição, o exoesqueleto ativo precisa deixar de ser um sistema tradicional construído sobre um sistema embarcado para ser um CPS como parte de uma rede de elementos de interação por meio da comunicação sem fio e sua conexão com a Internet (computação em nuvem). No caso de um exoesqueleto passivo, deve

ser instalado um grupo de sensores CPS que permitem monitorar a condição de trabalho dos exoesqueletos. Os resultados dos dados processados fornecem informações para melhorar o desempenho de uma linha de produção, integração da cadeia de suprimentos, conectando o chão de fábrica à sala da diretoria, criando uma produção altamente flexível e criando custos substanciais em uma fábrica inteligente (SF). Essa interconexão do CPS por meio da Internet em uma SF no que diz respeito à segurança, confiabilidade e proteção é chamada de IoT Industrial (IIoT).

2.3.2 PROTOCOLO E PADRÃO DE MENSAGEM ENVIADA POR UM EXOESQUELETO

O protocolo e padrão de mensagem, segundo (BANCES et. al, 2020), consiste na chave do padrão de mensagens e, basicamente é entender como os dados são transportados na rede para realizar uma determinada tarefa. Dois dos padrões comumente usados são Solicitação/ Resposta e Publicar/ Assinar.

- Solicitação/ Resposta (req/resp): É um padrão de comunicação básico. Consiste em um cliente que solicita informações do servidor. Previamente, uma ligação é estabelecida entre eles;
- Publicar/Assinar (pub/sub): permite a distribuição em massa de informações de um editor para vários assinantes de interesse, reduzindo o tráfego da rede.

Em relação aos protocolos de IoT, existentes, publicar/ assinar, solicitar/ responder ou ambos os padrões comumente usados, não é o objetivo desse projeto aprofundar em detalhes sobre as características de cada protocolo utilizado, mas sim, apenas citá-lo e indicar uma visão resumida de como são fornecidos os protocolos IoT mais comumente implementados. Por exemplo, (HUNKELER et. al, 2008), descreve que MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um protocolo de IoT de peso leve, que usa o padrão pub/subcomunicação e é usado para comunicação máquina a máquina (M2M). É especialmente projetado para trabalhar em cenários de baixa largura de banda e permite que os usuários se comuniquem com eficiência, consumindo o mínimo de baterias possível de dispositivos de *hardware*.

Além disso, fortalecendo o conceito de IoT Industrial (IIoT), OPCUA é um protocolo de automação industrial que inicialmente é usado apenas a arquitetura q/resp como

uma padrão de comunicação. No entanto, a extensão pub/sub foi posteriormente lançada em 2018 (DRAHOS et. al, 2018), permitindo a implementação de interconectividade universal de dados e interoperabilidade de informações. O pub/subflavor deste protocolo integra características de protocolos existentes MQTT e AMQP, como definir um corretor para a distribuição de uma mensagem e permitir o uso deste protocolo pela Internet, mas mantendo a segurança ponta a ponta e as vantagens da modelagem de dados padronizada. Além disso, OPCUA pub/sub usa o protocolo de transporte UDP e foi listado como protocolo de referência par a Industria 4.0 (ADOLPHS, et. al, 2015).

2.3.3 ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO PARA CPS

Conforme escreve (BAUERNHANSL et. al, 2014), existem três cenários para soluções futuras em relação à arquitetura de automação de qualquer CPS e sua integração com uma plataforma em nuvem: Evolução, Progresso e Revolução. A arquitetura de evolução consiste em interconectar um sistema usando uma ponte ou conexão inteligente ou uma plataforma de manufatura. Por exemplo, um robô com protocolo de comunicação instalado, como OPCA-UA ou MQTT, pode ser conectado a um *gateway* IoT. Este *gateway* com uma configuração adequada a uma interface de plataforma instalada permite a conexão do robô e a plataforma de nuvem.

Já (TSARDOULIAS et. al, 2017) destaca que, a arquitetura de progressão é baseada em uma arquitetura de software modular (MAS) instalada na máquina. A MAS se refere ao design e à comunicação de alto nível entre componentes (módulos) em diferentes níveis da arquitetura de controle de qualquer sistema. Assim, permite substituir ou adicionar qualquer módulo sem afetar o máximo do sistema. Existem vários *frameworks* para sistemas de robóticas que permitem uma robótica modular e escalável da arquitetura de *software* g, ROS, HoP, Aria, Orocos e Orca. No entanto, ROS é o *framework* de código aberto mais comumente usado na comunidade de busca.

2.3.4 ANÁLISE DE DADOS E PROCESSAMENTO DE FLUXO

Sobre as análises de dados e processamento de fluxo dessas informações, (ZIKOPOULOS et. al, 2011) determina que a análise de dados é a ciência de examinar dados brutos com o objetivo de tirar conclusões. As técnicas de análise de dados podem revelar tendências e métricas que, de outra forma, seriam perdidas na massa de informações. Essas informações podem então ser usadas para otimizar processos para aumentar a eficiência geral de um sistema. O processo analítico começa com a coleta de dados (por exemplo, ingestão de dados do sensor), em que a informação é identificada para um aplicativo analítico específico. Em seguida, envolve a aplicação de um algoritmo (processamento de fluxo).

O processamento de fluxo, também chamado de análise em tempo real, é uma tecnologia que permite aos usuários consultar fluxos de dados contínuos e detectar condições rapidamente em um curto período a partir do momento em que os dados são recebidos. O período de detecção leva apenas alguns mili segundos conforme indica (GAROFALAKIS et. al, 2016). Por exemplo, podemos consultar fluxos de dados provenientes dos sensores de posição do exoesqueleto localizados nos braços dianteiros e receber um alerta quando a posição ergonômica durante as tarefas não for adequada. Como consequência, pode prevenir futuras lesões nas articulações ou nos músculos. A última etapa do processo de análise de dados é comunicar os resultados aos usuários para apoiar sua tomada de decisão (pessoas responsáveis, serviços de software, robôs ou máquinas). Isso geralmente é feito com a ajuda de técnicas de visualização de dados, que muitas vezes são incorporadas em aplicativos em painel que exibem dados em uma única tela e podem ser atualizados em tempo real à medida que novas informações se tornam disponíveis.

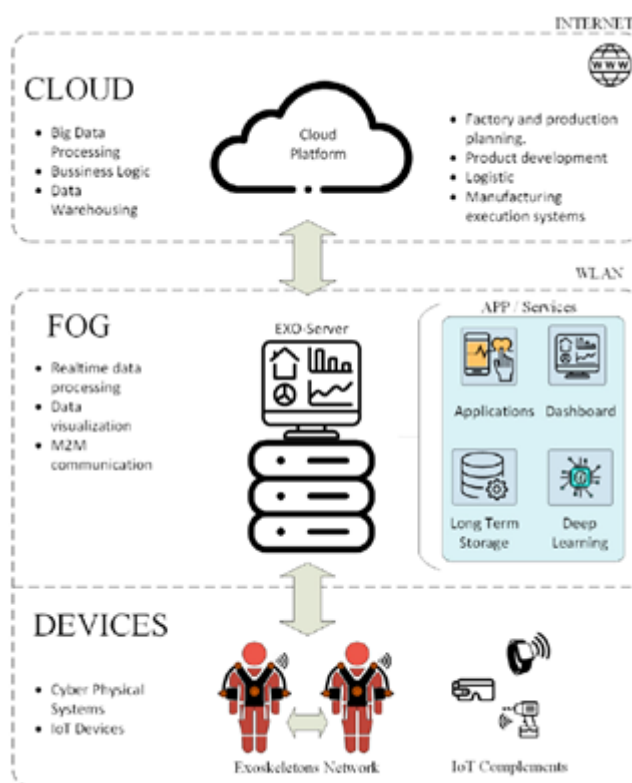
2.3.5 EXOESQUELETO OPERANDO EM UMA REDE DE COMPUTAÇÃO EM NUVEM

Os autores (AAZAM et. al, 2018 e BONOMI et. al, 2014), descrevem que, a computação em nuvem permite o processamento de dados localmente, em vez de enviar todos esses dados para a nuvem. Isso, reduz a possibilidade e perda de conexão, devido aos múltiplos canais interconectados. Além disso, a computação em

nuvem aumenta a eficiência da rede, permitindo os dados a serem processados e acessados de forma mais rápida e eficiente, o que reduz o risco de latência de dados. Por outro lado, a computação em nuvem tem o papel de processar uma grande quantidade de dados provenientes de dispositivos IoT. No entanto, as longas distâncias entre os clientes e o centro de processamento de dados aumenta a latência de transmissão.

A Figura 8, em tradução livre, mostra um exemplo de arquitetura de comunicação para a rede de exoesqueletos. A nuvem atua como um dispositivo mediador das centrais na nuvem pela internet e a IoT de dispositivos locais e CPS como os exoesqueletos. Nesta camada de nuvem, o data center (exo-servidor) permite a inserção de dados de vários dispositivos e o uso de plataforma para o processamento de stream. Também o data center oferece o desenvolvimento de diversas soluções digitais como serviços e aplicativos. Por exemplo, a data center permite o armazenamento de dados a longo prazo, a visualização e o monitoramento de sinais de sensores, bem como o aprendizado de máquina e algoritmos para melhorar o desempenho do exoesqueleto. A camada superior desta arquitetura conecta a rede de exoesqueleto com a nuvem via internet, permitindo o acesso às informações relevantes de outro setor, por exemplo, planejamento de produção, produto, instruções de desenvolvimento ou características de montagem do produto.

Figura 8 - Exemplo de arquitetura de comunicação para uma rede de exoesqueletos



Fonte: Exoskeletons Towards Industry 4.0: Benefits and Challenges os the IoT Communication Architecture.

2.3.6 IMPLEMENTAÇÃO DE ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO EM UMA REDE DE EXOESQUELETOS

Segundo Bances et. al (2020) como exemplo, o método desenvolvido mostra como um ativo, o exoesqueleto foi integrado a uma rede de topologia publish/subscribe. Além disso, a rede está conectada a uma data center denominado exoserver. Este servidor funciona como um corretor e permite o desenvolvimento de fluxo de análise de dados. O experimento usou um corpo superior ativo do exoesqueleto “Stuttgart Exo-Jacket 2.0” (SEJ2.0) desenvolvido por Franhofer IPA Stuttgart, na Alemanha, o SEJ2.0 é um personalizado sistema desenvolvido para atender às funções de transporte e elevação. A Figura 9, em tradução livre pelo autor, ilustra um modelo deste exoesqueleto, na Figura A mostra que o exoesqueleto conta com dois tipos de motores (brushless) em cada braço (ombro e cotovelo). Cada um desses motor possui um sensor codificador que permite medir a posição e aceleração da velocidade do movimento, conforme destacado por (MONOSTORI et. al, 2016). Além disso, cada

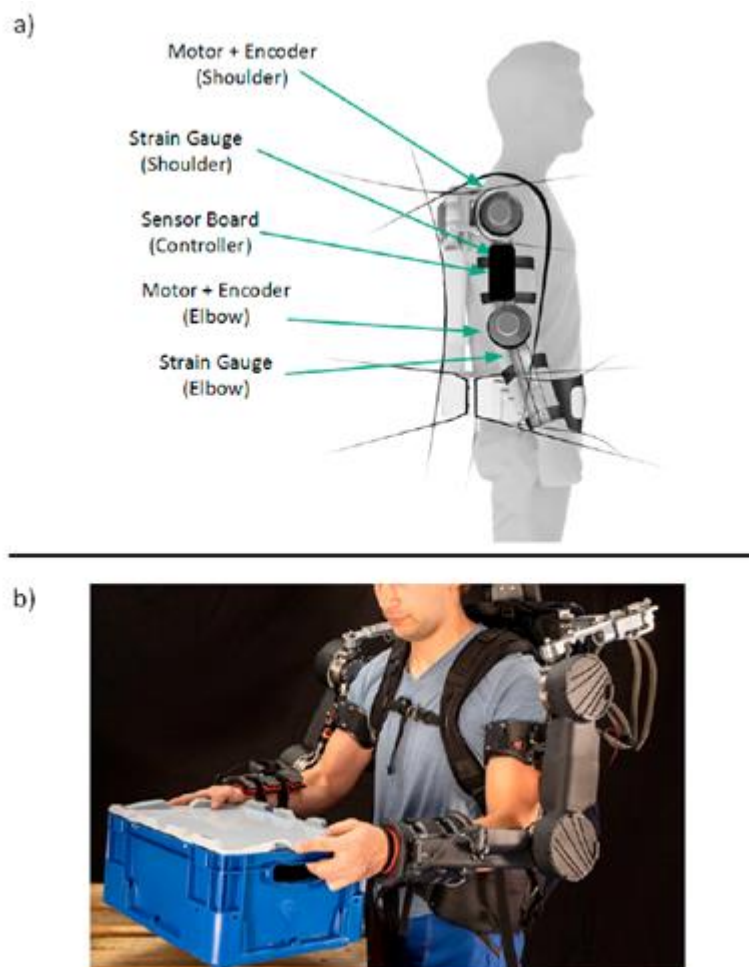
braço tem dois sensores de medidor de tensão usado para detectar a intenção do movimento e o desenvolvimento do algoritmo de controle conforme a Figura B. O exoesqueleto integra uma placa baseada em microcontroladores (placas do sensor) em cada braço. Esta placa, segundo o mesmo autor, inclui um módulo Wifi, permitindo um sensor de transmissão de dados.

A comunicação deste sistema que foi implementado foram baseadas em MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), futuramente, outras aplicações serão consideradas para implementar em projetos futuros, como o monitoramento do exoesqueleto, o desempenho, características ergonômicas durante as atividades e a eficiência e indicadores de saúde do usuário, bem como calcular e avaliar as taxas de produtividade no processo de montagem. Em seguida, essas informações podem ser compartilhadas com outras pessoas do CPS usando interfaces de programação de aplicativos (APIs) ou portais da web.

Figura 9 - Exemplo de um exoesqueleto ativo.

Figura a) SEJ2.0 - modelo de distribuição dos sensores e dos atuadores.

B) SEJ2.0 - implementado durante as tarefas de ação de levantamento e transporte.

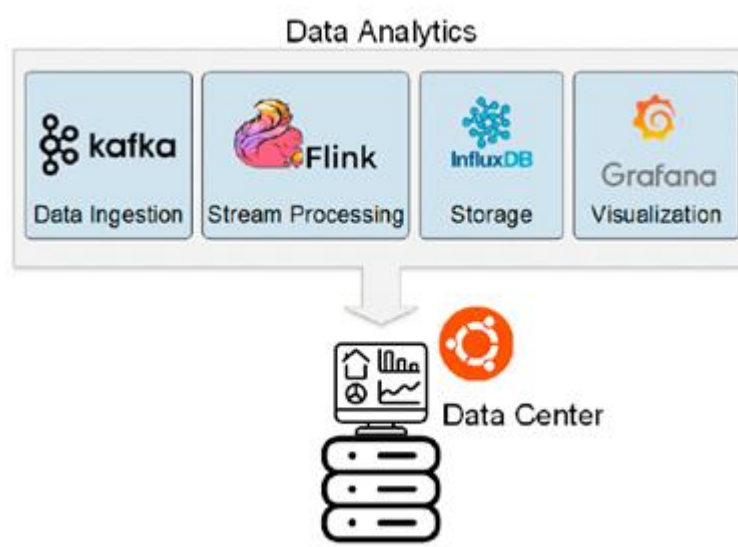


Fonte: Exoskeletons Towards Industry 4.0: Benefits and Challenges os the IoT Communication Architecture.

Finalmente, os dados processados seguem uma direção específica dependendo da aplicação. Por exemplo, os dados retornam ao exoesqueleto ou são reenviados para outros dispositivos com mensagens informativas ou de alerta. Os dados são armazenados em um banco de dados de termo (Influxdb3) e visualizados em um painel de controle (Grafana4). A Figura 10 mostra o modelo de análise de dados implementados no servidor. Por outro lado, a interação com o trabalho do exoesqueleto, permitindo configurar o desempenho do sistema antes ou durante a

atividade. Além disso, receber alertas do data center com os resultados dos dados processados. O aplicativo SEJ2.0 foi testado com um *tablet*, *smartphone* *desktops*. Além do exoesqueleto, outros sete dispositivos foram conectados à rede. Dois smartphones baseados no sistema operacional Android (assinantes) e a conexão foi temporariamente perdida. O tempo de reconexão foi inferior a alguns segundos, de modo que, os dados perdidos não foram considerados relevantes para aplicações e atividades com exoesqueletos. Como trabalho futuro, considera-se testar o protocolo OPC-UA para comparar com o MQTT atual. Outro trabalho futuro é projetar um *middleware* de comunicação de alto nível, mudando a arquitetura eletrônica do exoesqueleto e usar uma placa- mãe para hospedar o Ubuntu OS e o framework ROS (BANCES et. al, 2020).

Figura 10 - Modelo de análise de dados implementados no servidor.



Fonte: Exoskeletons Towards Industry 4.0: Benefits and Challenges of the IoT Communication Architecture.

A seguir, será apresentado o último caso estudado pelo autor.

2.3.7 MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DE RISCO POSTURAL

As fábricas inteligentes, através da Indústria 4.0 (I4.0), estão enfrentando grandes desafios, que vão desde o de otimização dos processos de produção, relacionados com o paradigma da customização e o da sustentabilidade do trabalho. Neste contexto, preservar o bem-estar dos trabalhadores desempenha um papel de importância suprema. Conforme notado pelo Relatório do Eurostat sobre “Estrutura da população europeia terá 65 anos ou mais (Eurostat, 2019). Portanto, fábricas inteligentes que desempenham o papel de sistemas sociotécnicos, precisará formar e adotar uma perspectiva social a fim de preservar o bem-estar dos operadores consistente com seus ativos de envelhecimento no ciclo de produção. De acordo com o sexto inquérito europeu sobre as condições de trabalho (Eurofound, 2015), a exposição a movimentos repetitivos do braço e posições cansativas ainda permanecem um problema comum. As condições de trabalho inadequadas geralmente envolvem o desenvolvimento de atividades musculoesqueléticas relacionadas a doenças do trabalho (DORTs) com altos custos para o bem-estar dos países. WMSDs incluem “todos os distúrbios musculoesqueléticos que são induzidos ou agravados pelo trabalho e as circunstâncias de seu desempenho” (WHO, 2003). Esses problemas não são apenas sociais, mas estão ligados a requisitos regulamentares específicos. Hoje, segurança ocupacional e a saúde na União Europeia (UE) são regulamentadas com base em uma estrutura diretiva e 19 diretivas individuais diferentes, mais 6 diretivas com relevância para a segurança e saúde no trabalho, esta estrutura afirma que o design do local de trabalho, equipamentos de trabalho, e os métodos de trabalho precisam ser ajustados ao indivíduo a fim de minimizar os impactos no trabalho monótono e na saúde negativa.

As melhores abordagens viáveis para a prevenção de DORTs segundo (BOENZI et. al, 2010 e DIGIESI et. al, 2018) consistem em:

- dar atenção específica ao ciclo de produção;
- treinar o pessoal com relação à correção de posturas;
- monitorar o processo de produção a fim de detectar precocemente as condições de risco e, conseqüentemente, redesenhar o processo, também por

meio de rotação adequada de cargos para minimizar e equilibrar o risco ergonômico.

Tradicionalmente, o monitoramento do risco de postura ergonômica (EPR) é realizado por meio de métodos diretos e indiretos. Métodos indiretos incluem questionários de autoavaliação (como a Escala de Borg e NASA-TLX (BORGS et. al, 1998 e HART et. al, 2006) e métodos observacional. Este último requer a intervenção de um experiente ergonomista que observa as posturas do operador, visualmente e estima os ângulos das articulações do corpo (cotovelo, ombro, joelho, tronco e pescoço), as cargas movimentadas e a frequência de operações, e relata um índice de risco. Uma revisão detalhada da maioria dos métodos observacionais comuns podem ser encontrados em (ROMAN et. al, 2014), onde OWAS, revisou NIOSH, RULA, OCRA, REBA, LUBA e EAWs são comparados.

Métodos diretos usam dados de sensores anexados ao corpo do trabalhador, como acelerômetros, giroscópios, magnetômetros, eletromiográficos e sensores ecocardiográficos. Em um estudo de pesquisa, a maioria das questões de Segurança Ocupacional e os profissionais de saúde indicaram que eram a favor de usar tecnologias vestíveis para medir objetivamente os aspectos de riscos de saúde do funcionário durante o trabalho (SCHALL et. al, 2018), e na literatura existem aplicações promissoras dessas tecnologias (NATH et. al, 2017 e VIGNAIS et. al, 2017).

Todos esses métodos possuem desvantagens que dificultam sua aplicação no campo industrial. Questionários de auto-avaliação sofrem com fatores não objetivos e são afetados por limites intrínsecos de avaliações subjetivas (BALOGH et. al, 2004 e DAVID et. al, 2005).

Métodos observacionais, os mais utilizados na área industrial, consomem tempo e requerem a intervenção de pessoal altamente especializado, tais métodos, a fim de melhorar sua precisão e para acelerar a medição dos ângulos das articulações do corpo, mas essa solução é cara em termos de custos e tempo de instalação. Métodos diretos são normalmente mais caros, intrusivos e demorados assim, seu uso é limitado a laboratório com configuração experimental (SCHALL et. al, 2018; KOWALSKI et. al, 2012; XU et. al, 2015). Além disso, os sensores envolvidos sofrem de fenômenos que

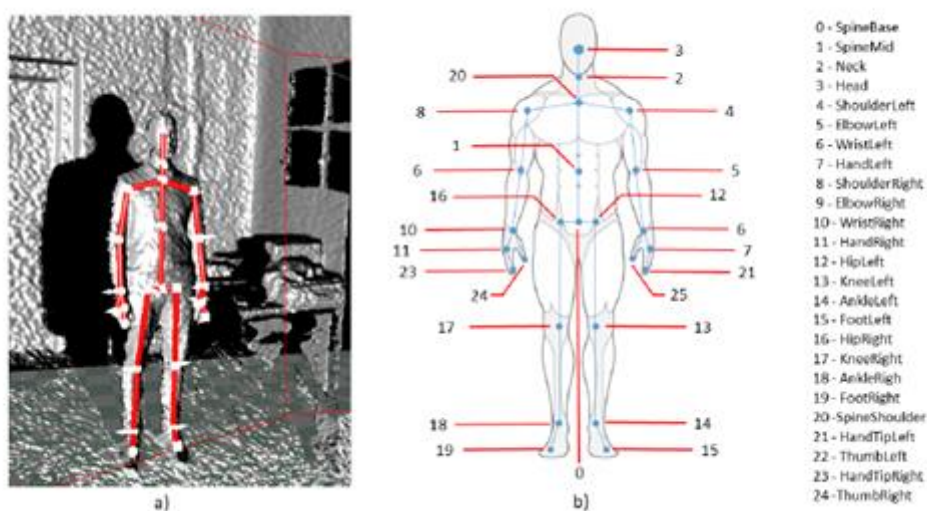
não são fáceis de controlar na fábrica, como interferências de campos eletromagnéticos.

O padrão ISO 11228-3:2007 (E) (ISO, 2007) sugere o uso de um método simplificado na fase inicial da análise e fornece o método OCRA a ser aplicado para investigação adicional se condições críticas forem detectadas. As tecnologias de habilitação na I4.0 apoiam empresas em como lidar com esses problemas, promovendo o desenvolvimento de sistemas inovadores apoiando o operador no setor de manufatura.

Recentemente, novas tecnologias de rastreamento corporal de baixo custo, com base em câmeras D-RGB, como o Microsoft Kinect, foram introduzidos no mercado, inicialmente desenvolvido para jogos, dado boa precisão de rastreamento (XU, 2015) esses sensores foram amplamente utilizados em vários campos de pesquisa, desde Interação Humano-Computador no campo industrial (UVA et. al, 2019) para Patrimônio cultural (MANGHISI et. al, 2018; MANGHISI et al, 2017).

A vantagem dessas tecnologias consiste no rastreamento preciso das articulações do corpo principal, conforme ilustra em tradução livre, a Figura 11 e sua alta taxa de aquisição. Em particular, o Microsoft Sensor Kinect V2, baseado em tecnologia de tempo de voo, supera sua versão anterior. Ele rastreia 25 articulações do corpo; isto é mais robusto à iluminação artificial e luz solar (ZENNARO et. al, 2015) e mais robusto e preciso no rastreamento do corpo humano (WANG et. al, 2015).

Figura 11 - O exoesqueleto conforme uso pelo Kinect. Figura a) o exoesqueleto apresentado em superfície normal e visualizado pelo Microsoft Kinect Studio V2.0; Figura b) o exoesqueleto ilustrando as articulações em relação a posição do corpo humano conforme descrito por Microsoft HIG (Microsoft, 2014).



Fonte: Automatic Ergonomic Postural Risk Monitoring on The Factory Shopfloor – The Ergosentinel Tool.

Essas propriedades permitem desenvolver o EPR, sistema inovador de monitoramento para a I4.0. Na literatura existem algumas tentativas de explorar estas inovações tecnológicas para implementar sistemas para avaliar automaticamente os ângulos das articulações do corpo e avaliar os índices de acordo com alguns métodos observacionais (DIEGO-MAS et. al, 2014; LOBO et. al, 2019). Essas inovações permitem superar os limites de aplicação de métodos de observação no campo industrial em fornecer ferramentas úteis para o crescimento das empresas rumo à sustentabilidade e condições de trabalho, também no que se refere à preservação de bem-estar dos operadores e envelhecimento ativo. Enfim, entre as soluções desenvolvidas neste campo até agora, as baseadas na primeira versão do sensor Kinect sofrem de três principais problemas técnicos: a falta de rastreamento das articulações do punho, a influência das condições de iluminação do ambiente e as auto oclusões (em posturas como cruzar os braços, flexão do tronco, flexão lateral do tronco e rotação do tronco). A introdução da versão renovada da câmara Microsoft D-RGB permitida por pesquisadores para explorar seu melhor desempenho em termos

de precisão de rastreamento das articulações do corpo. Este grupo de pesquisa desenvolveu e validou uma ferramenta de software inovadora com base no Sensor Microsoft Kinect V2 para fornecer uma avaliação semiautomática do EPR de posturas estáticas – a Ferramenta K2RULA (MANGHISI et. al, 2017). Os autores apresentaram as funcionalidades do sistema e as inovações introduzidas com sua evolução – A ferramenta ErgoSentinel.

Abaixo será apresentado a abordagem que o autor utiliza, em um segundo momento descreve-se mais detalhes quanto ao método aplicado para a avaliação do EPR, em terceiro detalha-se um protótipo implementado e o quarto, os recursos inovadores que foram introduzidos em uma versão mais recente.

2.3.8 O QUE É UM OPERADOR 4.0

Segundo Manghisi et. al (2019), o termo Operador 4.0 foi introduzido nesta literatura em paralelo com o termo Indústria 4.0. que indica um operador operando tecnologias que foram habilitadoras do programa I4.0, conforme Figura 12. De acordo com as finalidades para as quais essas tecnologias integram-se para apoiar o trabalhador, a literatura define diferentes facetas para o Operador 4.0. Entre estes, o Operador Saudável é aquele que lida com a preservação do bem-estar do operador e a prevenção de riscos posturais.

No Operador Saudável, soluções inteligentes (ou seja, vestíveis rastreadores para métricas relacionadas à saúde) junto com a Interação Homem-Máquina, são usados para monitoramento de bio-dados (ou seja, os dados fisiológicos, posturas e carga de trabalho), portanto, dirigir uma mudança positiva em termos de melhoria da produtividade, bem-estar, e medidas de segurança proativas em locais de trabalho inteligentes (ROMERO et. al, 2016).

A abordagem de (MANGHISI et. al, 2019), visa fornecer uma ferramenta de apoio ao Operador Saudável na fábrica I4.0, a fim de diminuir tanto quanto possível a incidência de DORTs. Na prevenção de EPR foram exploradas duas, das três abordagens viáveis neste campo: o monitoramento de alto nível e o treinamento dos operadores. Com base nesse objetivo, definiu-se os seguintes requisitos do sistema:

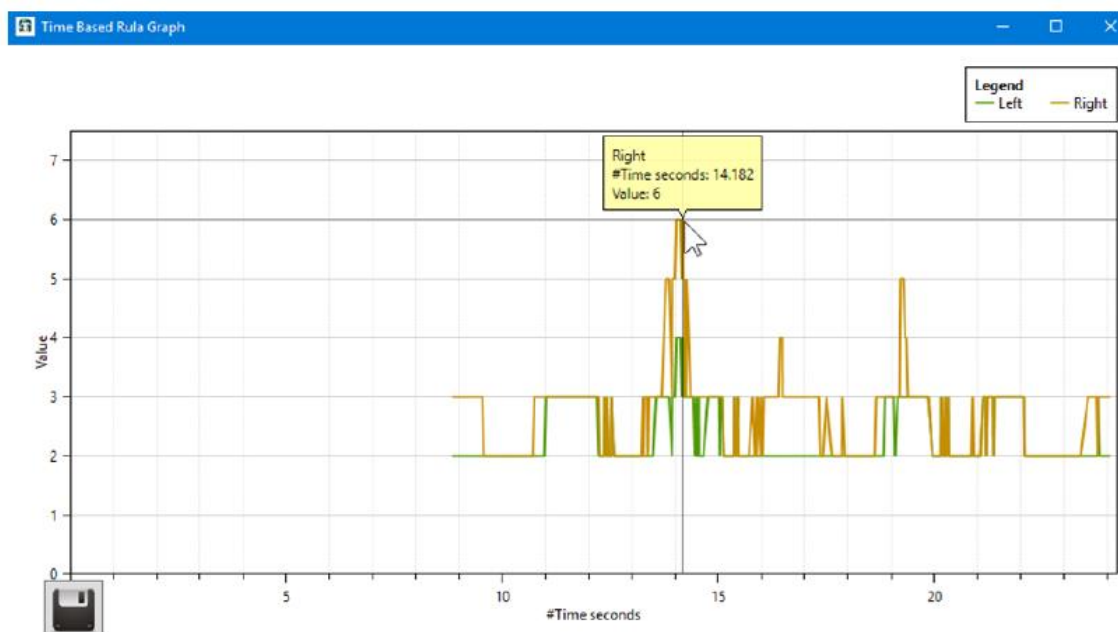
- A ferramenta deve ser baseada em sensores de baixo custo que permite um uso generalizado na loja da fábrica;
- A ferramenta deve ser projetada de forma a monitorar uma única estação de trabalho no momento (ou seja, um único operador);
- A ferramenta deve permitir um rápido e confiável alto nível de monitoramento do risco de EPR sem prejudicar os operadores e as tarefas;
- A ferramenta deve contar com uma métrica de avaliação EPR cujo uso está consolidado no ambiente industrial;
- A ferramenta deve permitir uma análise postural detalhada se o alto nível a análise evidencia um risco potencial;
- A ferramenta deve permitir o monitoramento em tempo real do operador a fim de revisá-lo em caso de EPR.

Figura 12 - Modelo da ferramenta Ergo Sentinel



Fonte: Automatic Ergonomic Postural Risk Monitoring on The Factory Shopfloor – The Ergosentinel Tool.

Figura 13 - Modelo de gráfico indicando pontuação máxima no segundo 14 quando requer análise posterior devido postura crítica do trabalhador.



Fonte: Automatic Ergonomic Postural Risk Monitoring on The Factory Shopfloor – The Ergosentinel Tool

Atendendo aos requisitos apresentados, foram projetados e desenvolvidos uma ferramenta de software semiautomática para monitoramento EPR. Nos primeiros, desenvolveu e validou um protótipo – a ferramenta K2RULA. Incentivado pelos resultados apresentados, foram aprimoradas algumas funcionalidades ao desenvolvimento da ferramenta Ergo Sentinel (Figuras 12 e 13). Para cumprir o primeiro requisito, baseou-se o corpo humano no sistema de rastreamento no Microsoft Kinect V2. A precisão deste sensor também permitiu cumprir o requisito de confiabilidade deste sistema. Foi validado a precisão desta ferramenta em posturas estáticas, comparando-as com um sistema de tratamento ótico e encontrou-se uma concordância perfeita entre os escores do EPR (MANGHISI et. al, 2017).

Quanto ao método de avaliação de EPR, optou-se por implementar o sistema com base no membro superior e rápidas métricas de avaliação (utilizando o RULA) (MCATAMNEY et. al, 1993).

O RULA é um dos métodos mais populares de observação no campo industrial, e é citado pelo padrão ISO 11228-3:2007 (E) com um dos métodos simplificados para

análise rápida de EPR, principalmente em tarefas estáticas. O aplicativo visa apoiar o operador como ferramenta e estende as funcionalidades de estações de trabalho inteligentes na “loja” de indústrias do futuro, assim como descrito em (UVA et. al, 2018 e UVA et. al, 2016) que seguem os exemplos explorando os aplicativos IAR, a fim de apoiar o operador durante a execução da tarefa. Consequentemente, foi implementado pelos autores o aplicativo para monitorar apenas um operador, que é o mais próximo do sensor e da estação de trabalho.

2.3.9 O MÉTODO RULA

Segundo (MANGHISI et. al, 2020), o método RULA consiste no cumprimento de uma grande avaliação, que divide o corpo humano em duas seções (Seção A: antebraço, antebraço e pulso; Seção B: pescoço, tronco e pernas). A pontuação é calculada usando três tabelas. As duas primeiras tabelas fornecem as pontuações de postura dos segmentos corporais. Cada uma dessas pontuações são corrigidas de acordo com a frequência das operações e carga de força nos membros. A terceira tabela leva como entrada as pontuações anteriores e retorna com uma grande pontuação. Com relação à pontuação geral, uma lista de nível de ação indica a intervenção necessária para reduzir os riscos de lesão do operador. As pontuações são da seguinte forma:

- Grande pontuação 1-2: a postura é aceitável se não for mantida ou repetida por longos períodos;
- Grande pontuação 3-4: mais investigação é necessária, podem ser necessárias alterações;
- Grande pontuação 5-6: investigação e mudanças são necessárias em breve;
- 7 pontos principais: investigação e mudanças são necessárias imediatamente.

2.3.10 A FERRAMENTA K2RULA

Os autores (MANGHISI et. al, 2020) descrevem também que a ferramenta foi implementada utilizando a linguagem de programação C#, bibliotecas do Windows Presentation Foundation (.NET framework) e Microsoft Kinect para Windows SDK 2.0. A versão gratuita deste software, the K2RULA, está disponível no site: <https://www.dmmm.poliba.it/index.php/en/download>. A ferramenta permite:

- Selecionar o stream de vídeo a ser visualizado (profundidade ou infravermelho);
- Realizar análise off-line em um arquivo previamente gravado graças aos botões de controle de reprodução;
- Executar uma avaliação instantânea da postura atual emoldurado pelo sensor Kinect V2.

Essas funcionalidades permitem realizar um monitoramento confiável de alto nível de EPR, sem prejudicar as tarefas dos operadores, conforme exigido na fase de projeto. Na verdade, a ferramenta ErgoSentinel pode acessar continuamente um arquivo gravado no formato padrão da Microsoft (.xef). Este *software* calcula a pontuação geral RULA para cada um dos quadros e gera um relatório, exportável em um arquivo de valores separados por vírgula, enquanto visualiza um gráfico de linha do tempo de forma interativa (Figura 13). Ao clicar em um ponto gráfico do gráfico, um rótulo pop-up exibe a pontuação geral RULA para aquele instante para o lado esquerdo e direito do corpo. No que diz respeito à análise de condições críticas, a ferramenta permite realizar uma investigação detalhada para cada postura adquirida pelo sensor. Ao clicar no botão de interface adequado (Figura 13 “Botão de Análise do Quadro Atual”), a ferramenta avalia a pontuação RULA detalhada para a postura atual e visualiza na “janela RULA” dedicada (Figura 12). Esta janela fornece as pontuações de cada seção do corpo para ambos os lados do corpo (esquerdo e direito), os ângulos calculados e a pontuação geral. O nível de ação é visualizado com um fundo codificado por cores variando de verde (pontuação geral 1 e 2) a vermelho (pontuação geral 7).

2.3.11 A FERRAMENTA ERGO SENTINEL

Conforme Manghisi et. al (2020), as funcionalidades da ferramenta K2RULA, segundo os estudos, atendem a todos os quesitos de sistemas, exceto o último. Sendo assim, essa ferramenta Ergo Sentinel tem funcionalidades melhoradas que permitem cumprir também o último requisito. De fato, foi explorada a programação *multithread* para permitir que a ferramenta monitore os operadores em tempo real e também sirva como sistema de alerta da postura dos colaboradores quanto a treinamento. A

funcionalidade de monitoramento em tempo real retorna dois comentários visuais. O primeiro, consiste em um gráfico no painel inferior mostrando a interface (Figura 14 com a área de visualização da análise em tempo real). Ele visualiza em tempo real um gráfico da tendência temporal das grandes pontuações do RULA que são atualizadas para ambos os lados do corpo. O segundo, consiste em duas caixas de texto relatando as grandes pontuações do RULA que são atualizadas em tempo real juntamente com um fundo codificado por cores de acordo com o nível de ação correspondente (Figura 14 – Feedback visual em tempo real com utilização da ferramenta). Como os operadores não precisam olhar as interfaces da ferramenta durante seu turno de trabalho, foram adicionadas outras funcionalidades, como um aviso acústico. É controlado pelo grande score mais alto entre os dois lados do corpo e é acionado se esse valor for igual ou maior que o 5, por exemplo. Já o feedback visual é útil se o sistema for usado como ferramenta de treinamento postural. Na verdade, permite que os operadores observem criticamente como risco postural muda de acordo com a postura que assumem. O aviso acústico serve de suporte aos operadores para evitar a repetição de posturas inadequadas durante o turno de trabalho. Isso ajuda a aumentar a conscientização sobre o EPR aos quais, os operadores são expostos durante a realização da tarefa.

Assim, a ferramenta ErgoSentinel funciona como uma ferramenta de treinamento no trabalho. A realização da análise off-line em vídeos gravados anteriormente é muito exigente em termos de memória de armazenamento – até 8 GB por minuto gravado. Na verdade, um arquivo padrão da Microsoft inclui vários fluxos, como infravermelho, profundidade, telemetria do sensor, cor não compactada e estrutura corporal. Assim, se adquiridos com o formato suportado pelo sensor Kinect (.xef), os vídeos são muito maiores do que os adquiridos com uma câmera RGB padrão. Este problema pode dificultar a viabilidade do software ErgoSentinel como ferramenta de análise off-line, portanto foi adicionado uma funcionalidade de alto nível utilizado em tempo real de análise. Que consiste em, selecionar o botão “coletar amostras” na interface do usuário (Figura 14 – feedback visual em tempo real), é possível coletar as grandes pontuações do RULA para o monitoramento desta sessão e salvá-los ao mesmo tempo. Ao realizar este processo, é possível substituir a gravação de uma seção de monitoramento com uma aquisição de vídeo padrão, portanto este processo economiza recursos de memória. Se as condições de riscos forem evidenciadas é

possível então executar uma investigação visual detalhada no vídeo (MANGHISI et. al, 2020).

Figura 14 - Janela do aplicativo RULA nos mostrando uma análise detalhada da postura do operador.



Fonte: Automatic Ergonomic Postural Risk Monitoring on The Factory Shopfloor – The Ergosentinel Tool

3 METODOLOGIA

3.1 MÉTODO

O estudo de caso é um trabalho de caráter empírico que investiga um dado fenômeno dentro de um contexto real contemporâneo por meio de análise aprofundada de um ou mais objetos de análises (casos). Essa análise possibilita amplo e detalhado conhecimento sobre o fenômeno, possibilitando, inclusive, a geração da teoria. Uma preocupação da engenharia e gestão de operações no Brasil (BERT e NAKANO, 1998; 2000; CAUCHICK MIGUEL, 2004) refere-se às abordagens metodológicas de pesquisas utilizadas no desenvolvimento dos trabalhos científicos na área. Sendo o estudo de caso uma das abordagens mais frequentemente adotadas no Brasil.

Geralmente considerado que as fronteiras entre o fenômeno e o contexto onde se insere não são claramente definidas (YIN, 2001). E, na verdade, uma espécie de histórico do fenômeno, extraído de múltiplas fontes de evidências onde qualquer fato relevante à corrente de eventos que descrevem o fenômeno é um dado potencial para o estudo de caso, pois o contexto é importante (LEONARD-BARTON, 1990). Diversos trabalhos específicos em estudo de caso podem ser encontrados na literatura, sejam trabalhos teóricos, sejam de aplicação (EISENHARDT, 1989; LEONARD-BARTON, 1990; VAN DE VEM e HUBER, 1990; MCCUTCHEON e MEREDITH, 1993; JAYANTI e SINHA, 1998; LEWIS, 1998; HILL et al., 1999; SOUSA e VOSS, 2001; YIN, 2001; VOSS et al., 2002; SOUSA, 2003).

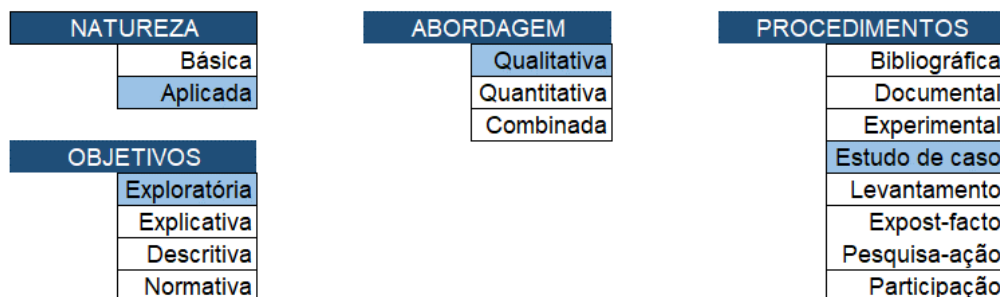
Dentre os benefícios principais da condução de um estudo estão a possibilidade do desenvolvimento de novas teorias e de aumentar o entendimento sobre eventos reais e contemporâneos. No entanto, metodologicamente, a condução adequada de um estudo de caso não é uma tarefa trivial e, frequentemente, os trabalhos são sujeitos a críticas em função de limitações metodológicas na escolha do (s) caso (s), coleta e análise dos dados, apresentação dos resultados e geração de conclusões suportadas pelas evidências.

A pesquisa tem natureza aplicada utilizando uma abordagem qualitativa que é usada quando se observa e interpreta a realidade com o objetivo de desenvolver uma teoria que vai explicar o que foi experimentado (NEWMAN, 1998; MIGUEL, 2012), através de uma pesquisa exploratória que tem como objetivo em detectar informações, hipóteses e percepções a fim de tornar explícito os problemas ao qual se procura uma solução, ou ainda, descobrir novas ideias e relações baseando-se em levantamentos bibliográficos (GIL, 2002). A pesquisa aplicada objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos (GERHARDT, 2009), tendo como objetivo permitir que o pesquisador mapeie e avalie o território intelectual existente, e especifique uma questão de pesquisa para desenvolver ainda mais o corpo de conhecimento existente (TRANFIELD et. al, 2003).

Foram selecionados, baseado na leitura dos artigos os estudos de (LAUDANTE et. al, 2017; MASONI et. al, 2017; BANCES et. al, 2020 e MANGHISI et. al, 2020).

Embora não seja uma prática comum em estudo de caso, é sempre importante a condução de um teste-piloto pelo pesquisador, antes de partir para a coleta de dados.

Neste item do estudo detalha-se algumas das suas etapas de condução, bem como sugere algumas recomendações. O processo de investigação científica deve ser idealizado e composto a partir da escolha de métodos e técnicas ajustados e coerentes com o objetivo e a questão da pesquisa (BERTO e NAKANO, 2014). A Figura 16 apresenta o esquema metodológico deste estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Metodologia aplicada no estudo.

A pesquisa tem natureza aplicada utilizando uma abordagem qualitativa, através de uma pesquisa exploratória baseada em uma revisão de literatura. A pesquisa aplicada objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos (GERHARDT, 2009).

Esta pesquisa tem como objetivo responder à questão principal de quais benefícios são gerados na implantação de um exoesqueleto.

Partindo da ideia principal quanto ao uso de exoesqueletos em indústrias 4.0, sua implantação quanto aos benefícios, além da prevenção de doenças ocupacionais, surgiu a ideia de aprofundar um estudo que aponte essas consequências na implantação de exoesqueletos de uma forma que seja viável tanto para os operadores/trabalhadores/colaboradores, quanto para a empresa.

A metodologia deste estudo de caso é a indutiva, feita por coleta de dados particulares. O nível de pesquisa é exploratório e descritivo, visto que, nesse estudo respectivamente foi feito pesquisa de hipótese (por meio de entrevista com questionário) e formalmente descritas.

O estudo de caso contempla uma entrevista com 32 questões abordadas pelo autor junto ao CEO de uma Empresa Brasileira XY que é fabricante de exoesqueletos passivos, os esqueletos passivos são exoesqueletos sem estruturas robóticas e

apenas auxilia o colaborador a manter a postura correta durante a realização de sua atividade.

3.2 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi realizado com a Empresa Brasileira XY que fabrica exoesqueletos e tem a missão de trazer aos usuários condições para que consigam se mobilizar ou realizar suas atividades com segurança, tranquilidade e confiança. O Exoesqueleto A é um equipamento mecânico, vestível, que não necessita de baterias ou eletricidade para funcionar, e que reduz o esforço de seus usuários em até 30% diminuindo o risco de afastamento.

A entrevista realizada através do questionário com as questões abordadas foi realizada em 26/04/2021 via online utilizando o Microsoft Teams. O questionário da pesquisa encontra-se no Apêndice A. As respostas aos blocos de perguntas foram compiladas e representam os benefícios e dificuldades encontradas nas implantações de sucesso. A Figura 17 ilustra o modelo abordado quanto ao planejamento da pesquisa realizada.

Elemento conceitual	Modularidade do estudo	Modularidade de produção	Fornecimento dos módulos
Fonte de evidência			
Contato inicial	O contato inicial partiu-se no envio de um e-mail para o CEO da Empresa XY	Solicitou-se uma data de apresentação para o estudo de caso	O autor deste trabalho, baseado na literatura, criou um levantamento sobre os benefícios e dificuldades no processo de implantação do exoesqueleto
22/04/2021			
Reunião de apresentação	A reunião de apresentação foi realizada com o objetivo de apresentar o estudo proposto e solicitar auxílio de informações se poderiam contemplar no estudo	Apresentado ao CEO da Empresa XY o estudo elaborado pelo autor	
23/04/2021			
Entrevista aplicando a pesquisa	A entrevista realizada foi baseada em visão do CEO e feedbacks recebidos dos clientes	Levantamento de questões abordadas como benefícios na implantação do exoesqueleto A ou B	Apresentação das questões ao CEO da Empresa XY
26/04/2021			
Entrevista aplicando a pesquisa	A entrevista realizada foi baseada na visão do CEO e feedbacks dos clientes quanto as dificuldades na implantação do exoesqueleto	Levantamento de questões abordadas como dificuldades na implantação do exoesqueleto A ou B	Apresentação das questões ao CEO da Empresa XY
30/04/2021			
Visita a empresa	Não foi possível realizar visita ao centro de pesquisa da Empresa XY devido pandemia no país		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 – Exemplo ilustrativo dos dados coletados.

3.3 COLETA DOS DADOS

Após a realização do teste-piloto e eventuais correções e melhorias no protocolo de pesquisa, a etapa seguinte é a coleta de dados. Primeiramente, os casos devem ser contatados considerando os principais informantes que estão cientes da pesquisa. Um contato inicial deve ser um executivo sênior, que não somente tenha condições de autorizar a condução da coleta de dados da pesquisa, que indique quais são os informantes ou respondentes principais que devem ser entrevistados, mas também seja capaz de “abrir as portas”, permitindo acesso e resolvendo impasses, caso ocorram. De qualquer modo, é importante que os informantes tenham clareza do objetivo e da importância da pesquisa, e o pesquisador assuma o caráter de confidencialidade dos dados coletados. Porém, antes de sair a campo, ou iniciar a pesquisa é necessário ter uma estimativa mais clara do tempo a ser despendido e dos recursos a serem consumidos e esses indicadores devem ser estimados. Feitos os contatos, os dados devem ser coletados utilizando os instrumentos definidos no planejamento, neste estudo, foi utilizado uma planilha simples em Excel contemplando as questões elaboradas.

As habilidades de entrevistas devem ser consideradas a partir dos seguintes fatores (YIN, 2001): ter capacidade de fazer questões adequadas aos objetivos do trabalho e interpretar as respostas; ser um bom ouvinte e não trazer nenhum tipo de preconceito; estar muito bem embasado (teoricamente) no tema que está sendo investigado; ser receptivo e sensível a evidências contraditórias; ser adaptável e flexível às situações novas e/ou não previstas e vê-las como oportunidades e não como ameaças.

Quanto ao registro dos dados, foram feitos de duas formas. Inicialmente em entrevista agendada, via online e registrada também em gravador cedido pelo entrevistado. Porém, o uso de gravador pode ser “intrusivo” no sentido de inibir o entrevistado, além de a transcrição ser dispendiosa em termos de tempo. Mesmo com essas limitações, é extremamente recomendável sua utilização. A sequência dos eventos deve ser planejada (no protocolo) sempre considerando um período de tempo estimado, como anteriormente citado. O pesquisador também deve buscar convergência e divergência no conjunto de dados e, sempre que necessário, buscar esclarecimento sobre as situações. Se alguma fonte de evidência não foi planejada e é importante, ela deve

ser considerada na coleta dos dados. Finalmente, deve-se tentar limitar os efeitos do próprio pesquisador, que deve sempre ter em mente que é um elemento estranho no contexto analisado. Em termos de efeitos do pesquisador no caso, ele pode influenciar os respondentes (SOUSA, 2005). O inverso também é verdadeiro, ou seja, o caso pode influenciar o pesquisador porque pode ser induzido pela ingenuidade, ter tendência de sempre concordar com a situação e fazer inferências não decorrentes necessariamente das evidências apresentadas. A coleta de dados deve ser dada como concluída quando se atingir a “saturação teórica”, ou seja, quando a coleta de dados adicionais não acrescenta nova informação relevante e se considera que os dados são suficientes para endereçar a questão da pesquisa. Obviamente, outros aspectos devem ser considerados, como a premência de tempo em função do término de prazos. Porém, este último aspecto não pode influenciar negativamente o rigor metodológico.

A análise dos dados ocorreu de forma qualitativa, a qual subsidiou a validação do questionário e obtenção dos dados prévios sobre o assunto abordado. Para responder as questões, elaborou-se um questionário com 32 perguntas divididos em blocos:

- Sobre área de trabalho;
- Sobre Ergonomia;
- Saúde do colaborador;
- Segurança do colaborador;
- Produtividade;
- Implantação do exoesqueleto;
- Redução de custos;
- Melhoria nas atividades, produção e qualidade;
- Melhorias no design do exoesqueleto;
- Análise ergonômica;
- Redução de esforço;
- Melhorias no processo;
- Redução de dores causadas pelo trabalho;
- Análise da alta direção e investimento.

3.4 PERFIL DO ENTREVISTADO

A entrevista formal somente foi possível ser realizada junto ao CEO da Empresa Brasileira XY que fabricam os exoesqueletos e através do *feedback* de implantação dado pelos seus clientes e também um teste realizado em laboratório parceiro da empresa.

Por meio de entrevistas com o *Chief Executive Officer* (CEO) da Empresa XY, o questionário foi apresentado, o qual se caracterizou como pesquisa as características apresentadas em tópicos abordados na visão do autor na implantação de um exoesqueleto na indústria 4.0. Este questionário elaborado pelo autor teve por finalidade analisar os *feedbacks* e vivência de implantação dos exoesqueletos apresentados pelos clientes da Empresa XY, podendo ser feito por meio de análise quantitativa para obter as conclusões correspondentes dos dados coletados. Também foi compartilhado para com este estudo testes realizados em laboratórios junto a parceiro, quando a utilização do exoesqueleto foi verificada através de uma amostra em processos de abdução e flexão de ombros à 90° sendo então realizadas uma análise quantitativa para obter as conclusões correspondentes aos dados coletados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS

Os principais desafios permanecem sendo os altos níveis de investimentos necessários para adaptação do país para essa alta tecnologia, infraestrutura, capacitação e modelos de negócios. Além da falta de habilidades suficientes para atender essa demanda. No campo de pesquisa do uso de exoesqueletos isso se torna explícito, pois ainda há um número baixo de publicações científicas que retratam sua implantação no contexto da Indústria 4.0.

Posto isso, é necessário analisar quais são os benefícios na implantação de um exoesqueleto, em busca de hipóteses e soluções de cenários que sejam positivos e eficientes demandando menor custo na correção de um posto de trabalho.

Portanto, este tipo de informação é essencial para o contexto Indústria 4.0 e Ergonomia, em como podem reagir, como poderá ser implantado na prática, e o que se pode esperar do uso de um exoesqueleto e benefícios na saúde do trabalhador.

O autor realizou uma entrevista com o CEO da Empresa XY que compartilhou sua experiência na implantação do Exoesqueleto A e B de forma qualitativa e também quantitativa realizada em laboratório junto à parceiros.

A Empresa XY produz atualmente dois tipos de exoesqueletos no Brasil, o modelo A e B, que são exoesqueletos passivos, vestíveis, que não necessitam de baterias ou eletricidade e que reduzem o esforço no trabalho. A Figura 18 ilustra o modelo do Exoesqueleto A, já o Exoesqueleto B ainda está em fase de testes.



Fonte: Empresa XY

Figura 18 – Modelo ilustrativo do Exoesqueleto A.

4.2 BENEFÍCIOS NA IMPLANTAÇÃO DO EXOESQUELETO

Independente da implantação do exoesqueleto, os postos de trabalho precisam ter os ajustes ergonômicos máximos possíveis implementados e adaptado ao colaborador. Para o processo de implantação se faz necessário uma análise ergonômica do posto de trabalho que irá se implantar o exoesqueleto e mesmo assim, depois da implantação do exoesqueleto, outras mudanças podem ou não ser necessárias no posto de trabalho. Sendo altamente recomendada a análise ergonômica para implantação do exoesqueleto pois uma das questões mais abordadas no momento de

implantação é em reduzir o risco de acidente ou reduzir a fadiga do colaborador na realização de suas atividades.

Foi observado que não se faz necessário treinamento específicos em Normas Regulamentadoras, pois se o colaborador já realizava a atividade anteriormente, ele continuará realizando-a, mesmo com o exoesqueleto. Quanto a trabalhos realizados em altura, que se queira implantar a utilização do Exoesqueleto, foi informado que, este tipo de atividade que exige o uso de um Equipamento de Proteção Individual (EPI), utiliza-o primeiro e por cima, veste-se o Exoesqueleto. Porém, o treinamento específico que a Empresa XY realiza na implantação assistida do Exoesqueleto A ou B é importante seguir exatamente como o protocolo de implementação específica. O colaborador é um ativo determinante quanto aos seus aspectos físicos na utilização do Exoesqueleto, sendo necessário ter no mínimo 1,67 m de estatura e peso específico, não sendo recomendado que o exoesqueleto seja vestido de forma “frouxa” no colaborador. As questões comportamentais também podem influenciar diretamente no uso do Exoesqueleto, notou-se devido aos colaboradores que apresentaram resistências na simples utilização de um EPI (Equipamento de Proteção Individual), esse comportamento pode refletir também na implantação do Exoesqueleto, normalmente este perfil tem resistências às mudanças.

Quanto à ergonomia, as reduções de esforços do colaborador na realização de suas atividades são nítidas, podendo ainda como consequência reduzir números de afastamento e ganho de produtividade para as empresas. Porém, essa somente é uma consequência diretamente ligada na implantação correta do Exoesqueleto bem como, a redução de ações trabalhistas, afastamentos, índices de absenteísmo, que geram determinados custos para a empresa.

A mudança da imagem da empresa que investe neste tipo de tecnologia é também positiva, pois traz uma atmosfera de cuidado e preocupação com a saúde do colaborador em senso de equipe também.

A implantação do exoesqueleto está diretamente ligada ao maior objetivo da ergonomia, contribuindo diretamente como uma solução proposta de melhor realização do trabalho.

Foi observado também que a motivação que leva a busca da solução de implantação do exoesqueleto pode vir de um problema financeiro, jurídico, dificuldade de contratação de pessoas que não tem habilidade para a atividade, ou também quando

não há interesse pelos colaboradores em realizar a atividade, pode ser também por um motivo de produtividade, que precisa existir um grande aumento e a empresa não o consegue realizar. A implantação, tão raro surge da área de EHS/SSMA (Meio Ambiente, Higiene Ocupacional, Segurança do Trabalho) e áreas correlatas até o momento pouco envolvem a área específica para contribuir de forma positiva com a implantação dessa tecnologia. Inserir a área especializada é de extrema importância para o sucesso de implantação do Exoesqueleto.

Em atividades que envolvem rodízios do colaborador, a Empresa XY recomenda a implantação do Exoesqueleto por equipe, porém não irá eliminar o rodízio, podendo ter mais de um colaborador utilizando o mesmo Exoesqueleto no mesmo período de trabalho. Isso também depende do planejamento da empresa que irá implantar o Exoesqueleto. Algumas já realizaram a implantação como projeto de Equipamentos de Proteção Individual (EPI), quando cada colaborador era responsável pelo seu equipamento, ou, Equipamento de Proteção Coletiva (EPC).

De acordo com a Empresa XY foi observado que dependendo da região de localização no Brasil, estatura dos colaboradores, porte físico, além das atividades diferentes que são desenvolvidas por setores que realizaram a implantação do Exoesqueleto, nem sempre o mesmo modelo do Exoesqueleto que foi perfeito para determinado colaborador serviu para um outro. Sendo assim, os modelos são customizáveis e apresentam melhorias contínuas e assim vai se criando também as evoluções nos Exoesqueletos conforme a demanda do cliente.

Quanto ao aspecto de análise e gerenciamento de dados emitidos durante o uso do Exoesqueleto, a Empresa XY possui também o modelo conectado. Nessa versão, o Exoesqueleto possui sensores que irão coletar, por exemplo, quantas vezes o operador realiza determinada atividade, ou, determinado movimento, ou ainda, todas as vezes que este colaborador precisa levantar o braço, qual ângulo, por exemplo, isso é realizado e quanto tempo houve a elevação do mesmo. Este modelo é altamente eficaz e extremamente recomendável sendo de grande importância, pois muitas vezes em uma análise ergonômica foi verificado algumas situações, podendo não verificar todas. A utilização por uma escala de tempo maior poderá apresentar informações mais ricas e detalhadas para cada situação. O tempo mínimo de utilização é dependente de um ciclo completo de trabalho para uma boa análise.

Comprovado por clientes que a utilização do Exoesqueleto contribuiu na redução de distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho. Estes Exoesqueletos também colaboram com atividades para atividades que exijam movimentos de levantamento, transporte e atividades realizadas em nível acima da cabeça, os Exoesqueleto atua diretamente na redução de possíveis fadigas que podem ser ocasionadas e também prevê possíveis lesões para estas atividades. Quanto a atividades que exijam puxão ou empurrão, o uso do Exoesqueleto não atrapalha e nem auxilia, sendo ativo de forma neutra.

Quanto às tarefas que podem ser realizadas em áreas de logísticas, como coleta ou colocação de objetos de uma gaiola para um palete, por exemplo, neste caso a Empresa XY recomenda o uso do Exoesqueleto B, que é um modelo específico para a lombar do colaborador.

Já as dificuldades observadas conforme dados qualitativos, um deles pode ser as limitações físicas, que devem ser analisadas em conjunto com o médico do trabalho da empresa. Um colaborador lesionado, pode ter uma limitação física, mas por este motivo, ele pode ser indicado na utilização do Exoesqueleto para realizar a tarefa e contribuir na redução do esforço. Quanto às limitações cognitivas, semelhantes ao uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) ou Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC) podem existir resistência do colaborador às mudanças ou uso de novos equipamentos.

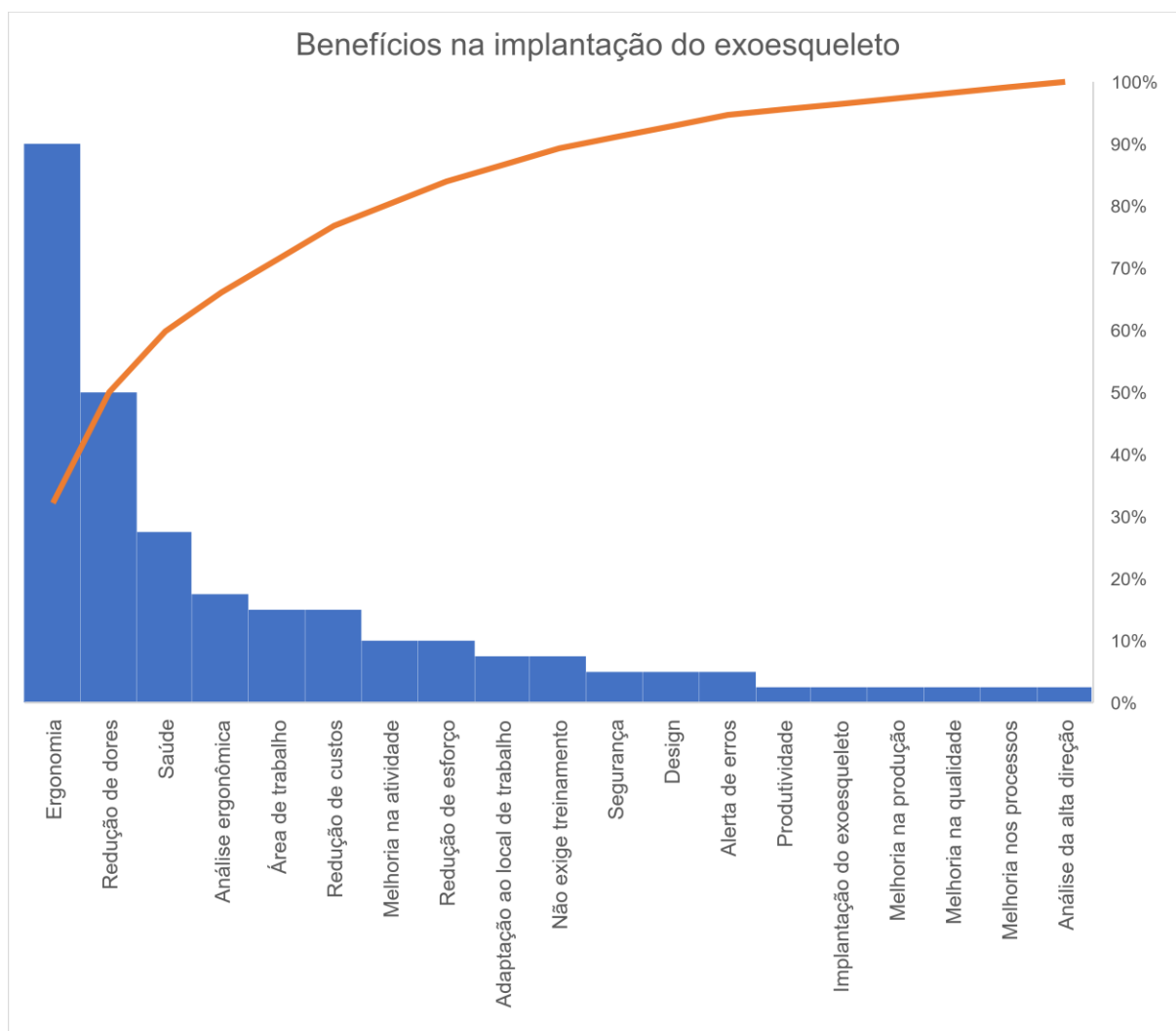
Os Exoesqueletos podem ser utilizados em qualquer ambiente. Porém, há situações que não é orientado o uso, sendo proibitivo, é por exemplo, atividades que sejam realizadas em áreas confinadas, ou áreas que, por si só, a atividade já tem um grau de risco elevado. Pois a Empresa XY entende, porque vai se inserir mais um risco em uma atividade. Portanto, visto isso, se faz necessário também realizar a análise de risco da atividade antes de implementar o uso do exoesqueleto.

Quanto as manutenções preditivas ou preventivas que devem ser realizadas no Exoesqueleto, normalmente a Empresa XY realiza ela do tipo “balcão”, quando o cliente deve enviar o equipamento para a manutenção, sendo necessária realiza-la anualmente, ou a empresa que está implantando o Exoesqueleto também pode adquirir um pacote de manutenção que é quando a Empresa XY vai até o cliente realizar a manutenção adequada. A maior preocupação apresentada quanto a este cenário vem principalmente de clientes que não estão localizados no Brasil.

A prioridade da utilização do Exoesqueleto é sempre de tornar a atividade do colaborador mais confortável, as empresas que implantam este equipamento devem realizar pesquisa qualitativa junto à equipe para avaliar se o uso contribui de forma positiva na atividade.

A tomada de decisão na implantação da utilização do Exoesqueleto quando não se envolve a área especializada pode ocorrer insucesso, caracterizando como um conflito de objetivos pela área diferenciando pelo propósito de cada uma, uma vez que o Exoesqueleto traz como prioridade benefícios para a saúde do colaborador como ilustra a figura do Gráfico 1 apresentando um crescimento exponencial quanto aos benefícios ligados à saúde do colaborador.

Gráfico 1 - Benefícios observados pelas informações da pesquisa realizada pelo autor.



Fonte: resposta ao questionário elaborado pelo autor

4.3 TESTES REALIZADOS EM LABORATÓRIO

Outro teste realizado em laboratório e também compartilhado com o autor, foi realizado através da coleta de dados de um eletro miógrafo (EMG). Neste teste foi observado um comparativo entre a atividade realizada com o uso do exoesqueleto e sem o uso do exoesqueleto.

Como processo inicial, o participante recebeu a devida orientação e limpeza da pele para aplicação dos eletrodos. Após este processo, os eletrodos foram fixados nos ombros do participante, simulando uma atividade realizada quando o operador necessita ficar por exemplo, com os ombros à 90°. No teste de abdução dos ombros (ABD) os eletrodos foram fixados nas partes da Deltóide Médio Direito e Trapézio Superior Direito. Estes eletrodos foram inseridos entre distâncias de 2 cm entre os pólos e fixados no sentido das fibras, e mais um eletrodo referência fixado sobre o processo estilóide de ulna direita).

Após a fixação dos eletrodos foi realizada a calibração do aparelho por um avaliador fisioterapeuta. As coletas de dados foram realizadas no movimento de abdução dos ombros a 90°, também foram utilizadas caneleiras de 1kg nos punhos, na determinação do melhor cenário real específico para a atividade, e mantida por 30 segundos. Este processo foi repetido por 3 vezes com intervalos médios de 2 minutos para cada medição. O exoesqueleto foi também inserido neste processo com intervalos de descanso de 3 minutos. E a coleta dos dados no movimento de Abdução do Ombro a 90° com caneleira de 1kg nos punhos, usando o exoesqueleto, foi mantida por 30 segundos e repetida por 3 vezes com intervalo médio entre as repetições. A figura da Tabela 2 apresenta os dados das medições realizadas.

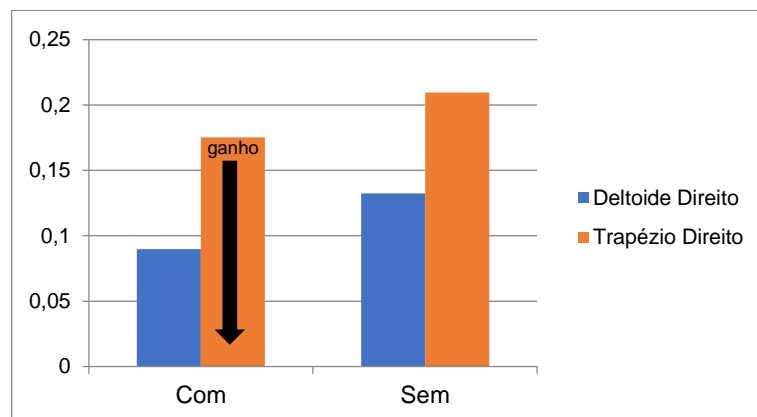
Tabela 2 - Teste de abdução de 90° com e sem o exoesqueleto adaptado pelo autor

ABD (RMS)	Com exoesqueleto	Sem exoesqueleto	Diferença	Percentual de ganho
Deltoide Direito	0,0899	0,1325	0,0426	32,15%
Trapézio Direito	0,1752	0,2095	0,0343	16,37%

Fonte: Projeto em laboratório apresentado em entrevista realizada pelo autor

Já a figura do Gráfico 2 apresenta um comparativo com e sem o uso de exoesqueleto entre as ações do ombro no teste de abdução de 90° (ABD).

Gráfico 2 - Comparativo com e sem o uso do exoesqueleto e a percepção de esforço adaptado pela autora.



Fonte: Projeto em laboratório apresentado em entrevista realizada pelo autor

Nos testes realizados, ficou nítido que, o uso do exoesqueleto apresenta uma redução no esforço para desenvolver a atividade. Porém este teste foi realizado apenas com um indivíduo, não podendo ser extrapolado para uma população maior. Sendo válido realizar os testes com um número maior de indivíduos para as inferências de correlação amostral.

O teste de flexão de ombro a 90° (flex) também foi realizado através de um comparativo entre com e sem o uso do exoesqueleto. Neste teste foi observado um comparativo entre a atividade realizada com o uso do exoesqueleto e sem o uso do exoesqueleto.

No processo inicial, o participante também recebeu a devida orientação e limpeza da pele para aplicação dos eletrodos. Após este processo, os eletrodos foram fixados nos ombros do participante, simulando uma atividade realizada quando o operador necessita ficar por exemplo, com os ombros flexionados à 90°. Os eletrodos foram fixados na região da Deltóide Anterior Direito e Trapezio Superior Direito entre distâncias de 2 cm entre os pólos, fixados no sentido das fibras e um eletrodo de referência fixado sobre o processo estilóide da ulna direita. Em seguida, foi realizada a calibração do aparelho. A coleta dos dados em flexão dos ombros a 90° com caneleira de 1 kg nos punhos, foi mantida por 30 segundos e repetida por 3 vezes com intervalo médio de 2 minutos entre as medições. Após isso, foi inserido o Exoesqueleto na atividade com intervalo de descanso de 3 minutos entre as

atividades, em sequência foi realizada novamente a coleta dos dados com o ombro flexionado a 90° com caneleira de 1 kg nos punhos, mantida por 30 segundos e repetido novamente por 3 vezes com intervalos médio de 2 minutos entre as medições. A figura da Tabela 3 apresenta os dados das medições realizadas.

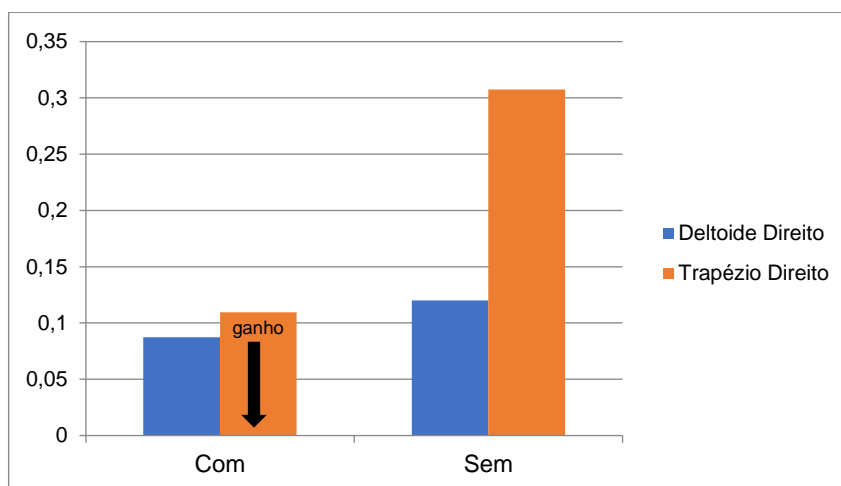
Tabela 3 - Teste de flexão de ombros a 90° com e sem o exoesqueleto adaptado pelo autor

Flex (RMS)	Com exoesqueleto	Sem exoesqueleto	Diferença	Percentual de ganho
Deltoide Direito	0,0874	0,1199	0,0325	27,11%
Trapézio Direito	0,1094	0,3075	0,1981	64,42%

Fonte: Projeto em laboratório apresentado em entrevista realizada pelo autor

Já a figura do Gráfico 3 apresenta um comparativo com e sem o uso de Exoesqueleto entre as ações do ombro no teste de flexão de 90°.

Gráfico 3 - Comparativo com e sem o uso do exoesqueleto e a percepção de esforço adaptado pelo autor



Fonte: Projeto em laboratório apresentado em entrevista realizada pelo autor

Nesse teste ficou nítida a evidência que o uso do Exoesqueleto proporcionou redução de 27,1% de esforço pelo músculo Deltóide Anterior Direito e uma diminuição de

64,4% de esforço pelo Trapézio Superior Direito. Podendo afirmar que a força de contração muscular é reduzida com o uso Exoesqueleto. Porém, estes são referentes a apenas uma amostra, não feitos para demais populações, devendo ser realizado mais testes com um número maior de amostras.

5 CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi atingido. O principal item de grande benefício na implantação do exoesqueleto é referente a ergonomia de um posto de trabalho e a atividade sendo realizada de forma correta. O Exoesqueleto dá esse suporte aos movimentos corporais. Apesar de avanços existentes e recentes no desenvolvimento de exoesqueletos para aplicações industriais, esses ainda não foram adotados amplamente pela indústria. Até o momento o autor não identificou protocolo padrão criado especificamente para avaliação da eficiência ou eficácia do exoesqueleto em atividades e a maioria dos testes ocorreram em laboratórios ou ambiente totalmente controlados. A implantação do Exoesqueleto é altamente benéfica para o colaborador, porém as considerações dos mesmos devem ser avaliadas por meio de pesquisa qualitativa em periodicidade, a maioria dos testes também foram realizados em pequeno espaço de tempo, após um período de uso mais prolongado os resultados podem ser diferentes e isso também deve-se considerar tendo sido verificado que não foi possível realizar o teste ou observação da atividade realizada com o Exoesqueleto e com um número maior de amostras para análise dos dados quanto a implantação do Exoesqueleto.

Com relação a ergonomia, os Exoesqueletos são totalmente colaborativos com o layout da I4.0, pois essa tecnologia auxilia conforme os dados apresentados, na melhoria ergonômica das atividades, podendo direcionar então esse benefício essa colaboração.

Porém, a autora, não se aprofundou quanto ao assunto quando se esbarra na Norma Regulamentadora 12 – NR12, pois estes robôs colaborativos são proibidos em relação a essa Norma, inclusive a questão de colaboração pode esbarrar em questões legais no Brasil.

A interação homem-máquina é uma inovação no mercado de trabalho, e há muitos questionamentos referentes ao seu impacto, sendo necessário cautela, e acompanhar

todos os passos de implantação, onde a inovação tecnológica impacta diretamente no homem e no ambiente de trabalho, destacando aqui a importância de potencializar sim o uso dessas novas tecnologias e sua abordagem dentro do ambiente de trabalho, pois seu impacto, em suma, é positivo para as questões envolvendo saúde, segurança e produtividade.

Postos de trabalho não avaliados ergonomicamente podem trazer, e sempre trazem, diversos prejuízos monetários (desde o desenvolvimento de MSD à baixa produtividade) para as empresas de modelo 4.0 ou não.

Porém, é preciso entender a caminhada até uma I4.0 como um processo evolutivo, sendo que as experiências e tecnologias básicas deverão ser adaptadas aos requisitos específicos de cada área.

REFERÊNCIAS

(GRANDJEAN, 1986; WILSON e CORLLET, 1995; SANDERS e McCORMICK, 1993; CHAPANIS, 1999; SALVENDY, 1997; VICENTE, 2004; STANTON et al. 2004).

(LEVY, NUNES SOBRINHO e SOUZA) SOARES, M. M. **Atualidades da ergonomia no Brasil e no mundo: uma visão geral**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ERGONOMIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENEAC, 1., 2007, Recife. Anais... Recife: ABERGO, 2007

A.E. Uva, M. Fiorentino, M. Gattullo, M. Colaprico, M.F. De Ruvo, F. Marino, G.F. Trotta, V.M. Manghisi, A. Boccaccio, V. Bevilacqua, G. Monno, **Design of a projective AR workbench for manual working stations**, in: Lect. Notes Comput. Sci. (Including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics); 2016. doi:10.1007/978-3-319-40621-3_25.

A.E. Uva, M. Fiorentino, V.M. Manghisi, A. Boccaccio, S. Debernardis, M. Gattullo, G. Monno, **A User-Centered Framework for Designing Midair Gesture Interfaces**, IEEE Trans. Human-Machine Syst.; 2019.

A.E. Uva, M. Gattullo, V.M. Manghisi, D. Spagnulo, G.L. Cascella, M. Fiorentino, **Evaluating the effectiveness of spatial augmented reality in smart manufacturing: a solution for manual working stations**, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 94; 2018. pp 509–521.

Aazam,M.,Zeadally,S.,&Harras,K.A.,2018. **Deploying fog computing in industrial internet of things and industry 4.0**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14(10), 4674-4682

ABERGO. **Definição de Ergonomia**. Disponível em: <http://www.abergo.org.br>. Acesso em: 27 nov. 2020.

Adolphs,Peter,e tal.,2015. **Status Report Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0)**. VDI-Verein in Deutscher Ingenieurverband ZVEI-German Electrical and Electronic Manufacturers Association, Tech. Rep.

Anxo, D. , Franz, C., & K"ummerling, A. ,2013. **Working time and work life balance in a life course perspective: are port based on the fifth European Working Conditions Survey**. Eurofound.

Aziz, F.A., Ghazalli, Z., Mohamed, N.M.Z., & Isfar, A., 2017. **Investigation on musculoskeletal discomfort and ergonomics risk factors among production team members at na automotive componente as ssembly plant**. In IOP conference series: materials Science and engineering, 257(1), 012040.

BERTO, R.M.V.S.; NAKANO, D. N. Métodos de pesquisa na engenharia de produção. Niterói: CD ROM do XVIII Enegep. 1998. _____. A produção científica nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção: **um levantamento de métodos e tipos de pesquisa**. Produção, v. 9, n. 2, p. 65-76, 2000.

Bandini Buti L., (2008). **Ergonomia olistica**, Franco Angeli Editore (loosely translated by the author).

Bartosiak, Dave., 2017. **“Exoskeleton unveiled at Ford manufacturing plant”**.The Drive[Internet].[cited2019.05.20].Availablefrom:<http://www.thedrive.com/sheetmetal/15921/exoskeletons-unveiled-at-ford-manufacturing-plant>

Bauernhansl,T., TenHompel,M., & Vogel Heuser,B.,2014. **Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung Technologien Migration**. Wiesbaden: Springer Vieweg. 1-648.

BERTO, R. M. V.; NAKANO, D. **Revisitando a produção científica nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Production, v. 24, n. 1, p. 225-232, 2014.

Bonomi,F., Milito,R., Natarajan,P.,&Zhu,J.,2014. **Fog computing: A platform for internet of things and analytics**. In **Big data and internet of things: A road map for smart environments**. Springer,Cham,169-186

Brolin,A., Thorvald,P., &Case,K.,2017. **Experimental study of cognitive aspects affecting human performance in manual assembly**. Production & Manufacturing Research,5(1),141-163.

Brolin,A.,Case,K.,&Thorvald,P.,2016. **Cognitive aspects affecting human performance in manual assembly**. In **Advances in Manufacturing Technology XXX: Proceedings of the 14th International Conference on Manufacturing Research, Incorporating the 31st National Conference on Manufacturing**,IOSPress,3,231. Research,September6–8,2016,LoughboroughUniversity,UK.

Brolin,A.,Thorvald,P.,&Case,K.,2017. **Experimental study of cognitive aspects affecting human performance in manual assembly**. Production&ManufacturingResearch,5(1),141-163.

Burke, R., Mussomeli, A., Laaper, S., Hartigan, M., & Sniderman, B., 2017.**The smart factory: Responsive, adaptive, connected manufacturing**. De-loitte Insights,31.

Casoni G. & Fanzini D., (2011) **I luoghi dell'innovazione. Complessità management progetto**, Di, Maggioli Editore (loosely translated by the author).

Cauchick Miguel, P.A. **An investigation of qualitative research in an industrial engineeringpost graduate program**. Anais do XI Simpep (Simpósio de Engenharia de Produção) Bauru, 2004. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. Produção, v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007.

CHAPANIS, A. **The chapanis chronicles: 50 years of human factors research, education, and designer**. Santa Barbara: Aegean, 1999.

D. Lobo, P. Anuarbe, J.M. López-Higuera, J. Viera, N. Castillo, R. Megía, **Estimation of surgeons' ergonomic dynamics with a structured light system during endoscopic surgery**, Int. Forum Allergy Rhinol.; 2019. doi:10.1002/alr.22353.

D. Roman-Liu, **Comparison of concepts in easy-to-use methods for MSD risk assessment**, Appl. Ergon. 45; 2014. p. 420–427.

De Looze, M.P., Bosch,T., Krause,F., Stadler,K.S., &O'Sullivan,L.W., 2016. **Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load**. Ergonomics,59(5),671-681.

De Looze, M.P., Bosch,T., Krause,F., Stadler,K.S., & O'Sullivan,L.W., 2016. **Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical workload**. Ergonomics, 59 (5), 671-681.

Drahoš,P., Kučera,E., Haffner,O., &Klím,I.,2018. **Trends in industrial communication and OPCUA**. In 2018 Cybernetics & Informatics (K&I). IEEE,1-5.

Eisenhardt, K. M. **Building theories from case study research**. Academy of Management Review, v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989.

Enrique Bances, Urs Schneider, Jorg Siegert, Thomas Bauernhansl. **Exoskeletons Towards Industrie 4.0: Benefits and Challenges of the IoT Communication Architecture**, 2020.

ERGONOMIA: Projeto e produção (livro eletrônico)/ Itiro Iida, Lia Buarque de Macedo Guimarães. – 3. Ed – São Paulo: Blucher, 2018. 864 p.; PDF.

Eurofound, **First findings: Sixth European Working Conditions Survey**; 2015. doi:10.2806/59106. European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions, 2015. First findings: Sixth European working conditions survey: Résumé. Publications Office.

Eurostat, **Population structure and ageing**; 2019. http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Population_structure_and_ageing.

F. Boenzi, S. Digiesi, G. Mossa, G. Mummolo, V.A. Romano, **Modelling workforce aging in job rotation problems**, IFAC-PapersOnLine. 28; 201. pp. 604–609. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.148.

F. Boenzi, S. Digiesi, G. Mossa, G. Mummolo, V.A. Romano, **Modelling workforce aging in job rotation problems**, IFAC-PapersOnLine. 28; 201. pp. 604–609. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.148.

F. Ferrise, G. Caruso, M. Bordegoni. **Multimodal training and tele-assistance systems for the maintenance of industrial products**. Virtual and Physical Prototyping 8, 2 (2013), pp.113-126.

G. Borg, Borg's perceived exertion and pain scales., **Human kinetics**; 1998.

Garofalakis,M., Gehrke,J.,&Rastogi, R., 2016. **Data Stream Management: Processing High-Speed Data Streams**. Springer.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa**. Plageder, 2009.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo, v. 5, n. 61, p. 16-17, 2002.

GRANDJEAN, E. **Fitting the task to the man**. London: Taylor & Francis, 1986.

H. Regenbrecht, G. Baratoff, W. Wilke. **Augmented reality projects in the automotive and aerospace industries**. Computer Graphics and Applications, IEEE 25, 6 (2005), pp. 48-56.

Henning, K., 2013. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future Of German Manufacturing Industry**; Final report of the Industrie 4.0 Working Group. For Schungs Union.

HILL, T.; NICHOLSON, A.; WESTBROOK, R. **Closing the gap: a polemic on plant based research in operations management**. International Journal of Operations and Production Management, v. 19, n. 2, p. 139-156, 1999.

Hitch,J.,2018.”**Exostrategy: Preventing pain points with exoskeletons**”.NED[Internet].[cited2019.05.20].Availablefrom:<https://www.newequipment.com/industry-trends/exo-strategy-preventing-pain-points-exoskeletons>

Hunkeler,U., Truong,H.L., and Stanford-Clark,A.2008. **MQTT-S—A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks**. In 2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middle-ware and Workshops (COMSWARE'08). IEEE,791-798.

JAYANTI, S.; SINHA, K. **Innovation implementation in high technology manufacturing: a longitudinal field study**. Journal of Operations Management, v. 16, n. 4, p. 471-494, 1998.

J.A. Diego-Mas, J. Alcaide-Marzal, **Using Kinect™ sensor in observational methods for assessing postures at work**, Appl. Ergon. 45; 2014. pp. 976–985.

K. Kowalski, R. Rhodes, P.-J. Naylor, H. Tuokko, S. MacDonald, **Direct and indirect measurement of physical activity in older adults: a systematic review of the literature**, Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act. 9; 2012 1.

KARWOWSKI, W. **Ergonomics and human factors: the paradigms for science, engineering, design, technology, and management of human**. Compatible systems. Ergonomics, v. 48, n. 5, p. 436-463, 2005.

L. McAtamney, E. Nigel Corlett, **RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders**, Applied Ergonomics. 24; 1993. pp 91–99. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000368709390080S>.

Landau, K., Rademacher, H., Meschke, H., Winter, G., Schaub, K., Grasmueck, M., & Schulze, J., 2008. **Musculoskeletal disorders in assembly Jobs in the automotive industry with special reference to age management aspects**. International Journal of Industrial Ergonomics, 38 (7-8), 561-576.

LAUDANTE, 2017. **Industry 4.0, Innovation and Design. A new approach for ergonomic analysis in manufacturing system**.

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A., 2015. **A cyberphysical systems architecture for industry 4.0 – based manufacturing systems**. Manufacturing letters, 3, 18-23.

Leonard-Barton, D. **A dual methodology for case studies: synergistic use of longitudinal single site with replicated multiple sites**. Organization Science, v. 1, n. 3, p. 248-266, 1990.

LEWIS, M. W. **Iterative triangulation; a theory development process using existing case studies**. Journal of Operations Management, v. 16, p. 455-469, 1998.

Lupacchini A., (2008). **Ergonomia e Design**, Carocci Editore (loosely translated by the author).

M. Bordegoni, F. Ferrise, E. Carrabba, M. Di Donato, M. Fiorentino, A. E. Uva. **An application based on Augmented Reality and mobile technology to support remote maintenance**. In Conference and Exhibition of the European Association of Virtual and Augmented Reality, pp. 131-135. (2014).

M. Fiorentino, A. E. Uva, M. Gattullo, S. Debernardis, G. Monno. **Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions**. Computers in Industry, 65(2), 270-278 (2014).

McCutcheon, D.; Meredith, J. **Conducting case study research in operations management**. Journal of Operations Management, v. 11, p. 239-256, 1993.

M. C. Schall, R. F. Sesek, L. A. Cavuoto, **Barriers to the Adoption of Wearable Sensors in the Workplace: A Survey of Occupational Safety and Health Professionals**, Hum. Factors. 60; 2018. pp. 351–362. doi:10.1177/0018720817753907.

Magone A. & Mazali T., (2016). **Industria 4.0 – Uomini e macchine nella fabbrica digitale**, Guerini e Associati (loosely translated by the author).

Masoni R., et al (2017). **Supporting remote maintenance in industry 4.0 through augmented reality**.

MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa para engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

MORAES, A.; MONT'ALVÃO, C. **Ergonomia: conceitos e aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro: Editora 2AB, 2003.

Morganti F. & Riva G., (2006). **Conoscenza, Comunicazione e Tecnologia**, Edizioni Universitarie di Lettere Economia Diritto (loosely translated by the author).

NEWMAN, Isadore; BENZ, Carolyn R.; RIDENOUR, Carolyn S. **Qualitative-quantitative research methodology: Exploring the interactive continuum**. SIU Press, 1998.

Poli G., Martini M. & Petronio L., (2014) **Smart Factory: La nuova Rivoluzione nel modo di produrre**, Rapporto di ricerca Accenture Strategy (loosely translated by the author).

Q. Wang, G. Kurillo, F. Ofli, R. Bajcsy, **Evaluation of pose tracking accuracy in the first and second generations of microsoft kinect**, in: Healthc. Informatics (ICHI), 2015 Int. Conf., 2015: pp. 380–389.

R. Radkowski, J. Herrema, and J. Oliver, **Augmented reality-based manual assembly support with visual features for different degrees of difficulty**, International Journal of Human-Computer Interaction, vol. 31, no. 5, pp. 337–349, (2015).

R. T. Azuma. **A survey of augmented reality**. PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4), pp.355–385 (1997).

R. T. Azuma. **The Most Important Challenge Facing Augmented Reality**. PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments, 25(3), pp.234-238 (2016).

S. Digiesi, F. Facchini, G. Mossa, G. Mummolo, **Minimizing and balancing ergonomic risk of workers of an assembly line by job rotation: A MINLP Model**, Int. J. Ind. Eng. Manag. 9; 2018. pp. 129–138. doi:10.24867/IJIE-2018-3-129.

S. Feiner, B. Macintyre, D. Seligmann. **Knowledge-based augmented reality**. Communications of the ACM 36, 7 (1993), pp.53–62.

S. Webel, U. Bockholt, T. Engelke, N. Gavish, M. Olbrich, C. Preusche. **An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills**. Robotics and Autonomous Systems, 61(4), pp.398-403 (2013).

S. Zennaro, M. Munaro, S. Milani, P. Zanuttigh, A. Bernardi, S. Ghidoni, E. Menegatti, **Performance evaluation of the 1st and 2nd generation Kinect for multimedia applications**, in: Multimed. Expo (ICME), 2015 IEEE Int. Conf.; 2015: pp. 1–6.

S.G. Hart, **NASA-task load index (NASA-TLX)**; 20 years later, in: Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.; 2006: p. 904–908. <http://pro.sagepub.com/content/50/9/904.short>.

SALVENDY, G. **Handbook of human factors and ergonomics** . 2 ed. New York: Wiley, 1997.

SANDERS, M. M.; MCCORMICK, E. J. **Human factors in engineering and design**. 7 ed. New York: Mcgraw-Hill, 1993.

SOARES, M. M. **Ergonomics in Latin America: background, trends and challenges**. Applied Ergonomics, n. 37, p. 555-561, 2006.

SOUSA, R. **Quality management practice: universal or context dependent? An empirical investigation**. Unpublished PhD Thesis. Londres: London Business School, 2000. Linking quality management to manufacturing strategy: an empirical investigation of customer focus practices. Journal of Operations Management, v. 21, n. 1, p. 1-18, 2003.

SOUSA, R. **Case research in operations management**. EDEN Doctoral Seminar on Research Methodology in Operations Management. Bruxelles, 2005.

STANTON, N. et al. **Handbook of human factors and ergonomics methods**. Boca Raton: CRC Press, 2004.

T. Haritos, N. Macchiarella. **A mobile application of augmented reality for aerospace maintenance training**. In Digital Avionics Systems Conference, 2005. DASC 2005. The 24th (2005), vol. 1. 2.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P.; **Towards a methodology for developing evidence informed management knowledge by means of systematic review**. British journal of management, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003.

Tsardoulis, Emmanouil, and Pericles Mitkas, 2017. **"Robotic frame-works, architectures and middleware comparison."** arXiv preprint arXiv:1711.06842.

Van de Ven, A.; Huber, G. **Longitudinal field research methods for studying process of organizational change**. Organization Science, v. 1, n. 3, p. 213-219, 1990.

V.M. Manghisi, A.E. Uva, M. Fiorentino, M. Gattullo, A. Boccaccio, G. Monno, **Enhancing user engagement through the user centric design of a mid air gesture based interface for the navigation of virtual-tours in cultural heritage expositions**, J. Cult. Herit.; 2018. doi:10.1016/j.culher.2018.02.014.

V.M. Manghisi, A.E. Uva, M. Fiorentino, V. Bevilacqua, G.F. Trotta, G. Monno, **Real time RULA assessment using Kinect v2 sensor**, Appl. Ergon. 65; 2017. doi:10.1016/j.apergo.2017.02.015.

V.M. Manghisi, M. Fiorentino, M. Gattullo, A. Boccaccio, V. Bevilacqua, G.L. Cascella, M. Dassisti, A.E. Uva, **Experiencing the Sights, Smells, Sounds, and Climate of Southern Italy in VR**, IEEE Comput. Graph. Appl. 37; 2017. doi:10.1109/MCG.2017.4031064.

Viale R., (2008). **La cultura dell'innovazione, comportamenti e ambienti innovativi**, Il Sole 24 ore (loosely translated by the author).

VICENTE, K. J. **The human factors**. New York: Routledge, 2004.

Vittoria E., (1999). **Le convergenze fattuali del design tra ventaglio e compasso in "Design: modificazioni di un mestiere"**, Quaderni di ITACA, numero monografico, vol. 3, Gangemi Editore, Roma (loosely translated by the author).

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. **Case research in operations management**. International Journal of Operations and Production Management, v. 22, n. 2, p. 195-219, 2002.

W.H.O. WHO, others, Protecting Workers' Health Series no. 5, **Preventing musculoskeletal disorders in the workplace**; 2003.

Wesslén, J., 2018 **Exoskeletons Exploration: Research, development, and applicability of industrial exoskeletons in the automotive industry** [Internet] [Dissertation]. Available from: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hj:diva-40093>

WILLIAM, D. J. Conceptualization of risk. In: KARWOWSKY, W. (Org.). **International encyclopedia of ergonomics and human factors**. 2 ed. New York: Taylor & Francis, 2006. (CD-ROM)

WILSON, J. R.; CORLLET, E. N. **Evaluation of human work: a practical ergonomics methodology**. 2 ed. London: Taylor & Francis, 1995.

YIN, R.K. **Estudo de caso – planejamento e método**. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2001.

X. Xu, R.W. McGorry, L.-S. Chou, J. Lin, C. Chang, **Accuracy of the Microsoft Kinect™ for measuring gait parameters during treadmill walking**, Gait Posture. 42; 2015. pp. 145–151. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.05.002>. (a)

X. Xu, R.W. McGorry, **The validity of the first and second generation Microsoft Kinect™ for identifying joint center locations during static postures**, Appl. Ergon. 49; 2015. pp. 47–54. (b)

Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T., 2017. **Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review**. Engineering, 3(5), 616- 630.

Zikopoulos, P., & Eaton, C., 2011. **Understanding big data: Analytics for enterprise class hadoop and streaming data**. McGraw-Hill Osborne Media.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DA PESQUISA

Benefícios na Implantação de um Exoesqueleto

1. Com a implantação do Exoesqueleto A e B, foi relatado pelos usuários que com a implantação do exoesqueleto as frentes de trabalho foram alteradas? Necessariamente precisou fazer uma adaptação na frente de trabalho?
2. A Empresa XY, ao processo de implantação do exoesqueleto, solicita a análise ergonômica do trabalho no posto de trabalho?
3. É necessário uma habilidade ou treinamento exclusivo para o operador utilizar o Exoesqueleto A ou B?
4. Quais os benefícios quanto à ergonomia física?
5. Quais os benefícios quanto à ergonomia cognitiva?
6. Quais os benefícios quanto à ergonomia organizacional?
7. Quais os benefícios quanto ao aumento da produção?
8. O exoesqueleto A ou B contribui diretamente como solução de proposta de realizar um melhor trabalho, sendo o objetivo maior da ergonomia?
9. Os motivos de implantação do exoesqueleto A ou B sempre foram relacionados a problemas ergonômicos do posto de trabalho?
10. Dependendo da atividade o exoesqueleto poderá ser adaptado somente a uma pessoa ou a uma equipe para a tarefa?
11. Benefícios quanto à identificar melhores soluções e adaptabilidade no design do exoesqueleto fabricado pela Empresa XY
12. Como benefícios o uso do exoesqueleto A ou B ao se aplicar na função é possível apresentar informações ergonômicas da atividade?
13. O exoesqueleto A ou B exige que o colaborador tenha treinamento em NR12, 11, 10, 35?
14. O modelo não emite som de alerta caso exista algum movimento realizado de forma errada?
15. O exoesqueleto A ou B contribui de forma positiva na redução de distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho?
16. Quanto as atividades que incluem movimentos de levantamento, transporte, empurrão, puxões e posições de tarefas que são realizadas em nível acima da cabeça, há redução de esforço?
17. O uso do Exoesqueleto A ou B traz como benefício a análise de dados gerados em tempo real de uso do operador?
18. O uso do Exoesqueleto A ou B é apresentado como uma resolução de ergonomia para as tarefas em posições aéreas, que conduzem uma alta probabilidade de dor no ombro e braços podendo reduzir os distúrbios musculoesqueléticos (MSD)?
19. O uso do exoesqueleto A também reduziu por exemplo as dores nos braços e costas?
20. Quanto às tarefas realizadas em áreas de logísticas, como o levantamento ou transporte de componentes pesados embalados em caixas na altura do quadril?
21. Quanto às tarefas realizadas em áreas de logísticas, como a coleta ou colocação de objetos de uma gaiola para um palete?
22. Quanto ao desempenho de uma linha de produção?

23. Possíveis dificuldades que podem ser encontradas na implantação do exoesqueleto, ou, possíveis dificuldades que podem causar o uso do exoesqueleto. E um deles, poderia ser uma possível ocorrência de acidente na linha de produção quando implantado o exoesqueleto?
24. Quanto às limitações físicas?
25. Quanto às limitações cognitivas?
26. Quanto às limitações culturais?
27. Quanto ao protocolo de implantação do Exoesqueleto?
28. Foram observadas resistências observadas na implantação do Exoesqueleto?
29. E as manutenções preventivas e preditivas, como funcionam, são necessárias?
30. Foi observado sensação de apreensão nos colaboradores quanto à pressão de realizar a atividade com o Exoesqueleto?
31. O Exoesqueleto é resistente as intempéries?
32. Como é realizada a análise dos dados emitidos pelo Exoesqueleto?