

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATEUS BARBIAN URIO

**EXOESQUELETOS APLICADOS À INDÚSTRIA: UMA REVISÃO DA
LITERATURA**

CURITIBA

2019

MATEUS BARBIAN URIO

**EXOESQUELETOS APLICADOS À INDÚSTRIA: UMA REVISÃO DA
LITERATURA**

Artigo apresentado como requisito parcial à conclusão do Curso de Especialização em Engenharia de Produção, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Gechele Cleto

CURITIBA

2019

Exoesqueletos aplicados à indústria: Uma revisão da literatura

Mateus Barbian Urio

RESUMO

Exoesqueletos vem sendo empregados em diversas atividades, dentre elas industriais, com a finalidade de reduzir esforços e prevenir lesões. Além disto, a integração com a Indústria 4.0 tem levado estes dispositivos a outros patamares juntamente com o conceito de operador 4.0. Esses indivíduos que apresentam elevado nível de capacitação são apoiados por sistemas, robôs e exoesqueletos que integram suas habilidades às habilidades do operador garantindo maior eficiência e segurança nas operações industriais. Desta forma, o presente trabalho teve por objetivo reunir e analisar dados e informações acerca da utilização de exoesqueletos na indústria, evidenciando os avanços obtidos até o presente momento e as perspectivas para o setor. Como conclusões, pode-se afirmar que a utilização de exoesqueletos no setor industrial já é uma realidade e apresenta grande potencial para os próximos anos. No entanto, alguns fatores relacionados a usabilidade e aceitabilidade precisam ser testados e aprimorados, bem como regulados através de certificações e padronizações.

Palavras-chave: Revolução Industrial. Engenharias. Ergonomia. Segurança Ocupacional.

1 INTRODUÇÃO

Dentre as principais causas de lesões ocupacionais não fatais encontram-se os distúrbios ósseos e musculares relacionados ao trabalho, afetando grande parcela dos trabalhadores das linhas de produção dos mais diversos setores (BOSCH et al. 2016). Algumas lesões de menor proporção, como dores musculares, melhoram em curtos intervalos de tempo, no entanto, outras lesões, como as lombalgias, podem persistir por mais tempo, sendo normalmente associadas a trabalhos que envolvem levantamentos repetitivos (ALEMI et al. 2019).

Segundo De Looze et al. (2016), utilizando-se os avanços da computação e engenharia, os problemas ocupacionais poderiam ser solucionados com a completa automatização dos processos industriais. Não obstante, em ambientes dinâmicos,

como os de produção e armazenamento, a sensibilidade e a capacidade de tomada de decisão inviabilizam ou tornam extremamente onerosa essa alternativa.

Frente a isso, uma infinidade de ferramentas, auxílios ergonômicos e boas práticas foram projetados e esquematizados, visando a redução do estresse físico nas indústrias, e mesmo com esse avanço tecnológico, as taxas de distúrbios osteomusculares permaneceram elevadas na última década. Como forma de solucionar traumas, auxiliar os movimentos humanos, proporcionando a redução de esforços e ganho de potência física surgem as pesquisas e tecnologias relacionadas a utilização de exoesqueletos (HUYSAMEN et al. 2018).

Os avanços relacionados a utilização de exoesqueletos vêm sendo alavancada pela possibilidade de utilização desses equipamentos nos mais diversos campos, como no controle remoto de robôs, reabilitação de traumas físicos e assistência de atividades de trabalho (BOGUE, 2009; HANSEN et al. 2018). Apesar de promissor, o mercado de exoesqueletos ainda se encontra em início de expansão apresentando diversos desafios.

Nas linhas de produção, esses equipamentos precisam se adequar as forças, velocidades e acelerações requeridas pela função desempenhada. Da mesma forma, os exoesqueletos precisam se ajustar anatomicamente ao usuário, proporcionando amplitude de movimentos e compatibilidade cinemática, o que é dificultado ao passo que cada usuário apresenta características distintas (HANSEN et al. 2018).

De modo a contextualizar o atual cenário, o presente trabalho reuniu, com base em literatura, informações relacionadas as classificações, propriedades e aplicações de exoesqueletos na indústria, discutindo quais foram os últimos avanços relacionados aos equipamentos e quais são as futuras perspectivas para esse setor.

2 EXOESQUELETOS: CONTEXTUALIZAÇÃO

Exoesqueleto pode ser definido como um equipamento ou dispositivo biônico, normalmente capacitado de atuadores passivos ou ativos que agem nas articulações humanas, integrando muitas vezes a inteligência humana aos sensores de um computador (TSUKAHARA et al. 2010; QUINTERO et al. 2012; CHEN et al. 2016).

Segundo relatado em trabalho de Bogue (2009), os exoesqueletos capazes de aumentar substancialmente a força humana, servindo de prótese para membros amputados saíram dos livros e telas do cinema para virar realidade a partir da década de 60. Nessa época, com financiamento do Departamento de Defesa Americano, a empresa General Electric desenvolveu um dos primeiros protótipos de exoesqueleto, cujo objetivo era permitir que o indivíduo que o portasse levantasse até 1500 libras. O projeto não apresentou os resultados esperados.

Na década de 80, em um laboratório de Los Alamos, desenvolveu-se um traje de fortalecimento de força que tinha a capacidade de ler sinais do cérebro através de sensores em um capacete, no entanto, o projeto também foi arquivado pelos diversos empecilhos relacionados a baixa velocidade que os computadores apresentavam na época e os suprimentos de energia, como as baterias que não eram compactas e de grande autonomia como as de hoje.

Na mesma década, um dispositivo foi patenteado com o intuito de ser um assistente de corrida. Apresentava um arco de molas que atuava de forma paralela com as pernas, possibilitando incremento de eficiência na corrida e saltos com resultados que demonstraram eficiência (RUIZ-OLAYA et al. 2019).

Com o passar do tempo, esses problemas tecnológicos foram, em parte, solucionados, ampliando novamente as possibilidades de utilização desses equipamentos em diversas situações. O emprego dos exoesqueletos ocorre em três principais categorias: no aumento de eficiência de indivíduos saudáveis, assistência em atividades; e reabilitação de traumas. Quando destinados para o incremento de força humana podem aumentar a resistência durante a locomoção do indivíduo, além de permitir que este realize tarefas que antes não conseguiria executar sozinho. Podem ser utilizados também por soldados e bombeiros em desastres, permitindo que transportem cargas, alimentos, equipamentos, suprimentos e armamentos (CHEN et al. 2016). O incremento nas possibilidades de utilização desses sistemas se deu pelo rápido desenvolvimento das ciências voltadas a biomedicina, engenharia eletrônica, engenharia mecânica e inteligência artificial (SPADA et al. 2018).

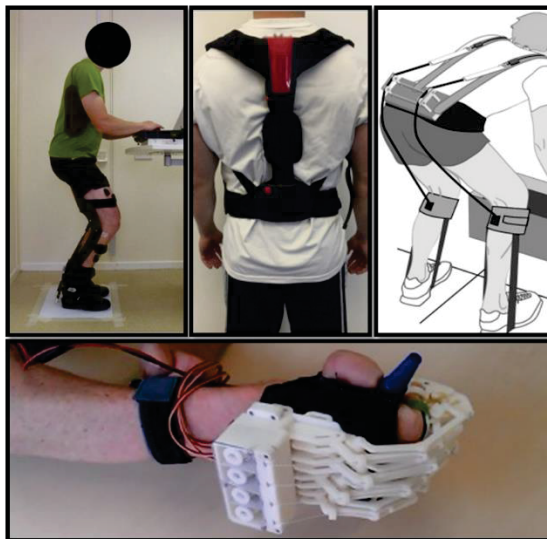
Atualmente, o mercado global de exoesqueletos conta com mais de cinquenta fabricantes (BOSTELMAN e HONG, 2018). A utilização de exoesqueletos voltados ao aumento de força humana também se enquadra dentro de um novo conceito chamado de Indústria 4.0, definida como quarta revolução do setor

manufatureiro, englobando inovações relacionadas a automação, controle e tecnologia de informação, novas formas de interação homem/máquina, entre outros. A indústria 4.0, em sua essência, busca um ambiente de trabalho onde as máquinas e computadores podem melhorar não apenas os processos produtivos, mas os de planejamento, logística e desenvolvimento de produtos (LORENZA, 2018; KAASINEN et al. 2019).

3 CLASSIFICAÇÃO DE EXOESQUELETOS

Os exoesqueletos podem ser classificados quanto a sua construção como passivos (utilizando contrapesos e molas visando reduzir o esforço e ajudar no movimento) ou ativos (utilizando sistemas motorizados de atuadores). Podem ser classificados como exoesqueletos de corpo inteiro, de membros inferiores e de membros superiores. Além dessas classificações, estes ainda podem ser categorizados de acordo com a sua forma de atuação, como cadeiras ajustáveis, estabilizadores de tronco e joelho, luvas motorizadas, ferramentas para indústria automotiva, trajes corporais e até membros extras (BRIDGER et al. 2018). Na Figura 1 pode-se visualizar alguns exemplos e modelos de exoesqueletos.

FIGURA 1 – DIFERENTES TIPOS DE EXOESQUELETOS



FONTE: (Esquerda superior) Exoesqueleto para membros inferiores para auxiliar na sustentação e agachamento (Fonte: BRIDGER et al. 2018); (Central superior) Exoesqueleto para membros superiores para assistência postural e redução na carga da coluna (Fonte: PICCHIOTTI et al. 2019); (Direita Superior) Exoesqueleto de corpo completo para assistência de elevação repetitiva (Fonte: LOTZ et al. 2009); (Inferior) Exoesqueleto para auxiliar pacientes que perderam a mobilidade da mão (BIANCHI et al. 2018).

3.1 SISTEMAS PASSIVOS

Sistemas passivos de compensação gravitacional já existem e são empregados há muito tempo (LU et al. 2011). Exoesqueletos passivos não utilizam, em geral, sistemas atuadores complexos ou computadorizados, mas sim, molas e amortecedores que apresentam elevada capacidade de captar e armazenar energia dos movimentos humanos e utilizá-la no suporte de movimentos ou posições (DE LOOZE et al. 2016).

Os dispositivos passivos são em geral mais baratos e mais leves que os exoesqueletos ativos. Além disso, já são difundidos no mercado e consideravelmente empregados em aplicações ocupacionais (ALABDULKARIM et al. 2019). Vários sistemas finalizados e prontos para uso são descritos na literatura, incluindo Dispositivos Auxiliares de Levantamento Pessoal e o Sistema *Bending Non-Demand Return*. Os dois sistemas citados têm por finalidade o armazenamento de energia elástica quando o corpo é inclinado para frente, ajudando o indivíduo a prolongar sua postura de trabalho, ou ajudar a levantar objetos pesados (BOSCH et al. 2016). Em agachamentos, a energia potencial é armazenada nas molas ou amortecedores durante o agachamento ou flexão do quadril, sendo liberada na fase de ascensão do corpo (ABDOLI-ERAMAKI et al. 2006).

Articulações passivas geralmente são empregadas também no tornozelo, por ser essa articulação responsável pela sustentação e propulsão do corpo. Os sistemas passivos são relativamente mais baratos, e nesta articulação atua de forma semelhante a um par de muletas (FORNER-CORDEIRO et al. 2008; CHEN et al. 2016; LOVRENOVIC e DOUMIT, 2019).

3.2 SISTEMAS ATIVOS

Sistemas ativos foram pesquisados e desenvolvidos inicialmente com o propósito de ajudar no processo de reabilitação de pessoas que sofreram traumas ou são incapacitadas. Apenas pesquisas recentes estão sendo desenvolvidas com o intuito de utilizar esses exoesqueletos com finalidades ergométricas na indústria (LUO e YU, 2013; BOSCH et al. 2016; DE LOOZE et al. 2016), de modo que se evitem lesões, preservando a versatilidade do ser humano no processo de produção (KOOPTMAN et al. 2019).

Exoesqueletos ativos a força do indivíduo que utiliza o equipamento é aprimorada através de atuadores altamente tecnológicos, como motores elétricos, hidráulicos ou pneumáticos (GOPURA e KIGUCHI, 2009). Diferente dos sistemas passivos que tem seus padrões de suporte determinados como parte de seu projeto construtivo, exoesqueletos ativos são controlados de forma assistida através de sensores, convertendo as informações do equipamento e do usuário em comandos para o sistema e mecanismos atuadores (KOOPMAN et al. 2019).

Apesar de apresentarem regulagens finais e proporcionarem maior conforto ao usuário, em geral apresentam elevado valor e peso, devido ao grande aparato tecnológico empregado (ALABDULKARIM et al. 2019).

3.3 EXOESQUELETOS PARA MEMBROS INFERIORES

Segundo Bridger et al. (2018), exoesqueletos de membros inferiores apresentam diversas aplicações potenciais. Foram desenvolvidos com finalidade de ajudar auxiliar na recuperação de paraplégicos, complementar o treino de esquiadores e, posteriormente empregados no auxílio de posições de semi-agachamento em processos produtivos industriais (RUIZ-OLAYA et al. 2019). Outra interessante área em que esses sistemas ergométricos podem ser empregados é o de usuários de embarcações de alta velocidade onde os indivíduos precisam ficar por longos períodos em pé.

O primeiro exoesqueleto que apresentava a função de auxiliar no transporte de cargas foi o BLEEX. Cada perna do protótipo apresenta sete graus de liberdade de para movimento, dentre elas a flexão do quadril, extensão e abdução, joelho e dorsal do tornozelo e flexão plantar (ZOSS, 2006). A Tabela 1 traz diversos trabalhos que pesquisaram a utilização de exoesqueletos para membros inferiores.

TABELA 1 – PESQUISAS RELACIONADAS A APLICAÇÃO DE EXOESQUELETOS PARA MEMBROS INFERIORES

Autores	Sistema	Funcionalidade	Resultados obtidos
Low et al. (2005)	Ativo	Aprimoramento de caminhada carregando peso.	Testes com elevada estabilidade de caminhada e emprego de cargas úteis.

Aphiratsakun e Parnichkun (2009)	Ativo	Algoritmo testado em exoesqueleto para as pernas voltado a reabilitação de pacientes paraplégicos	Apresentou capacidade de manter equilíbrio e estabilidade sem permitir que o indivíduo caia em postura de agachamento.
Sankai et al. (2010)	Ativo	Reabilitação de pacientes paraplégicos	Grande potencial a nível de pesquisas. Ainda não foi testado em humanos.
Neuhaus et al. (2011)	Ativo	Reabilitação de pacientes paraplégicos	Em poucas horas de treinamento e prática, paraplégicos conseguem se mover a 0,20 m/s. Requer pouco esforço cognitivo, permitindo que o usuário converse e mantenha contato visual enquanto caminha.
Choi et al. (2017)	Ativo	Controle de balanço e de giro das pernas.	Experimentos conduzidos no protótipo apresentaram resultados promissores que funcionam bem mesmo na ausência do modelo dinâmico.
Bridger et al. (2018)	Passivo	Suporte e sustentação para atividade de agachamento.	O exoesqueleto reduziu as exigências físicas, apesar de não reduzir o déficit cognitivo.
Lovrenovic e Doumit (2019)	Passivo	Aumento de mobilidade durante a postura e caminhada.	Força de apoio entre 9,41% e 26,18% do peso corporal para seis níveis de rigidez da mola testada.
Luger et al. (2019)	Passivo	Controle e aumento do conforto postural.	Alta posição sentada no exoesqueleto diminuiu a atividade eretor, mas aumentou a flexão do tronco não-neutra.

FONTE: O autor (2019).

Como citado, boa parte dos exoesqueletos de membros inferiores tem por finalidade atuar na redução de impacto e estabilização das articulações inferiores em atividades de agachamento e carregamento de pesos amplificando a potência do corpo (RUIZ et al. 2008). Apesar de serem utilizados nos membros inferiores do corpo, diversos sistemas, tanto ativos quanto passivos proporcionam ainda estabilidade e alívio da coluna, facilitando atividades desenvolvidas com os membros superiores do corpo.

Em movimentos industriais repetitivos como aqueles que requerem uma grande quantidade de agachamentos em curto período de tempo a manifestação de fadiga muscular é reduzida drasticamente (LOTZ et al. 2009). Apesar da eficiência

comprovada na maioria dos casos, a adaptação do equipamento ao usuário, em relação ao tamanho do equipamento, peso e encaixe é de fundamental importância para que traumas decorrentes do mal uso do equipamento não aconteçam.

3.4 EXOESQUELETOS PARA MEMBROS SUPERIORES

Os exoesqueletos inferiores vieram para substituir o uso de práticas de mudança de posição durante trabalhos, kits especiais como palmilhas ortopédicas e tapetes anti-fadiga. Outra linha de pesquisas neste ramo visa reduzir a carga, aumentar o conforto e evitar lesões nos membros superiores, principalmente nos ombros e lombar (LUGER et al. 2019). A partir da Tabela 2, pode-se visualizar trabalhos que pesquisaram a utilização de exoesqueletos para membros superiores.

Pesquisas relacionadas a produção de exoesqueletos para membros superiores são recentes e ainda avançam a nível de pesquisa. Normalmente demandam apuro tecnológico mais elaborado se comparado com sistemas para membros inferiores.

Esses aparatos são produzidos principalmente para dar suporte a coluna, apoiar e estabilizar as articulações dos ombros, cotovelos e punhos em atividades de relacionadas a manipulação (RUIZ et al. 2008). Sistemas mais robustos vêm sendo desenvolvidos para auxiliar também no aumento da firmeza e precisão de atividades refinadas, como perfurações e remoção de pequenas peças, principalmente quando os membros superiores não podem ser apoiados.

TABELA 2 – PESQUISAS RELACIONADAS A APLICAÇÃO DE EXOESQUELETOS PARA MEMBROS SUPERIORES

Autores	Sistema	Funcionalidade	Resultados obtidos
Lee et al. (2014)	Ativo	Auxílio no levantamento de objetos pesados.	Sistema controlador foi considerado apropriado no auxílio do levantamento de objetos pesados.
Whitfield et al. (2014)	Passivo	Holding estático	Redução de 8,4% na atividade eletromiográfica em movimentos de descida e 14% na atividade de elevação.

Kim et al. (2018)	Passivo	Auxiliar em tarefas que requerem elevação dos braços	Redução no tempo de perfurações em 20%, constatando-se redução na precisão.
Bianchi et al. (2018)	Ativo	Auxílio na função da mão para pacientes que perderam ou prejudicaram suas habilidades manuais.	Testes a nível de projeto proporcionaram resultados afirmando que materiais testados suportam as condições de operação.
Moyon et al. (2018)	Passivo	Auxílio em operações manuais de lixamento	Impacto positivo da assistência na carga de trabalho física, principalmente em relação ao balanço cardíaco.
Qingcong et al. (2018)	Ativo	Reabilitação para fornecer assistência ao movimento do braço humano.	A eficácia é validada por rastreamento de trajetória e testes de resposta de frequência.
Yu et al. (2018)	Ativo	Auxílio em operações de construção refratária em fornos.	O sistema pode lidar com um refratário de até 50 kg, gerando não apenas alta resistência, mas também vários movimentos tridimensionais com a carga.
Huysamen et al. (2018)	Passivo	Um exoesqueleto passivo da parte superior do corpo para tarefas aéreas estáticas.	A atividade muscular foi reduzida para o Biceps Brachi em 49% e o Media Deltoid em 62%. Não houve efeitos negativos significativos nas variáveis tronco e corpo inferior estudadas.
Spada et al. (2018)	Passivo	Auxiliar em diversas tarefas estáticas e dinâmicas	Aumento no tempo de resistência; aumenta na capacidade de manter posturas exigentes com braços erguidos portando ferramentas; maior resistência, precisão e tempo de execução em tarefas de precisão.
Alabdulkarim et al. (2019)	Passivo	Auxílio em atividades de perfurações aéreas	Bons resultados de alívio nos músculos dos ombros foram obtidos com os exoesqueletos testados, no entanto, a qualidade e precisão das perfurações foram prejudicadas.

Alemi et al. (2019)	Passivo	Auxílio em operações de elevações repetitivas aliviando os músculos das costas.	Redução do pico e a atividade média dos músculos das costas (IL e LT) em 31,5% e 29,3%, respectivamente, para os elevadores simétricos e em 28,2% e 29,5%, respectivamente para elevadores assimétricos.
Picchiotti et al. (2019)	Passivo	Assistência postural e levantamento de cargas.	Nenhum exoesqueleto passivo reduziu a carga na coluna lombar durante o levantamento. Apresentaram baixo benefício na redução do risco de lesões lombares.

FONTE: O autor (2019).

3.5 EXOESQUELETOS DE CORPO COMPLETO

Poucos trabalhos relatam o uso de exoesqueletos de corpo completo, e quando pesquisados e produzidos, normalmente são destinados para finalidades terapêuticas e de reabilitação de indivíduos que sofreram fortes traumas, como paralisia parcial ou completa. Sistemas projetados para essa finalidade são extremamente complexos, caros e não apresentam muitas aplicações comerciais.

Sistemas mais simples voltados ao desempenho de funções industriais se relacionam a redução da fadiga muscular em atividades de agachamento. Esses equipamentos são conhecidos como PLAD (*Personal Lift Assist Device*). Pesquisa de Lotz et al. (2009) avaliou um dispositivo de assistência de elevação de corpo dessa categoria, O qual garantiu grandes benefícios na minimização de esforços musculares, principalmente das costas.

Exoesqueleto de modelo muscoesquelético de corpo inteiro também foi estudado por Ulrey e Fathallah (2013) para prever cargas nos tecidos passivos das costas e das articulações das pernas. Com os resultados da pesquisa, constatou-se redução de 13 e 12% nas forças de compressão e cisalhamento, respectivamente, no nível L5-S1 quando realizada operação de postura inclinada. As cargas internas nas articulações das pernas também foram reduzidas entre 10 e 31%.

4 ERGONOMIA COGNITIVA

A ergonomia cognitiva é o ramo que estuda processos mentais que afetam diretamente as percepções dos humanos com outros elementos de um sistema, como a memória, raciocínio e reflexos. Através dos estudos realizados por essa ciência, pode-se investigar e determinar alguns aspectos que permeiam o desenvolvimento e aplicação de exoesqueletos industriais. Dentre esses aspectos cita-se: a usabilidade, a aceitabilidade e avaliação de esforço dos sistemas (LORENZA, 2018).

A usabilidade se refere ao conjunto de vários fatores acerca de um produto ou serviço, tal como o tempo de execução, desempenho, satisfação e facilidade de aprendizado pelo usuário (BRAN et al. 2003). A aceitabilidade se relaciona em como o usuário procura de forma voluntária a utilização do produto ou serviço com base em sua satisfação (LORENZA, 2018). E as avaliações de esforço, principalmente no ramo da ergonomia industrial se relacionam a garantia de conforto, redução de riscos à saúde, qualidade no ambiente de trabalho e eficiência nas atividades propostas (LONGEN et al. 2018).

Entre as articulações humanas e as de um exoesqueleto faz-se necessário que haja certa correspondência. A conformidade entre as duas partes é fundamental para que se obtenham interfaces ergonômicas e eficientes entre sistema e operador (RUIZ et al. 2008). Como já citado anteriormente, a adaptação do exoesqueleto, independentemente do nível tecnológico empregado é direta e exclusiva para cada operador. A falta de adaptação e o uso incorreto dos equipamentos podem decorrer em estresses superiores quando comparados a não utilização desses.

Algumas pesquisas relataram problemas ergométricos de exoesqueletos relacionados a ineficiência de sua aplicação prática (PICCHIOTTI et al. 2019), redução da precisão relacionada a atividade fim (ALABDULKARIM et al. 2019), efeitos negativos em outros músculos e articulações (LUGER et al. 2019), além de problemas relacionados a autonomia energética dos equipamentos (RUIZ-OLAYA et al. 2009).

5 DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO

O grande impasse para o incremento e otimização de novos exoesqueletos com capacidades ainda mais refinadas está relacionado ao desenvolvimento tecnológico. Equipamentos pequenos e portáteis que sejam energeticamente eficientes, portados de sensores e atuadores são necessários em diversos setores, principalmente nos de reabilitação de pacientes. RUIZ-OLAYA et al. (2019) classificam as demandas tecnológicas a serem desenvolvidas em três principais: sensores e controladores; transmissão de energia; e características mecânicas.

Controladores ou interfaces físicas são os suportes, chaves e presilhas que respondem pela transmissão da força assistida dos atuadores anexados também ao corpo do usuário. Em diversos casos, o poder do exoesqueleto pode ser perdido devido a problemas relacionados a dinâmica dessa interface física, nas tensões de cisalhamento e compressões ao longo do corpo por possíveis desalinhamentos. Isso ocorre porque os tecidos biológicos e a interface mecânica do exoesqueleto se deslocam ou se deformam em pequena ou grande escala, absorvendo parte da energia e tornando necessária a utilização de cintas e mangas. Esses fatores comprometem a aceitação dos equipamentos por gerar grande desconforto nos usuários (ZANOTTO et al. 2015; YANDELL et al. 2017; SPOSITO et al. 2018).

Outro fator que deve ser levado em consideração quando se analisa a relação entre exoesqueleto/usuário é a utilização para finalidades terapêuticas frente a industrial, onde os robôs empregados precisam trabalhar com músculos debilitados gerando mais torque, ou com músculos saudáveis que variam substancialmente sua rigidez e força conforme os movimentos (SPOSITO et al. 2018). Essa dinâmica necessária na previsão de movimentos e torque requer uma interface de previsão e suporte extremamente eficiente e tecnológica.

6 EXOESQUELETOS E A INDUSTRIA 4.0

As tecnologias voltadas a comunicação e transmissão de informações vêm se desenvolvendo em escala exponencial, principalmente quando se relacionam a computação em nuvem, conceito de internet das coisas e inteligência artificial. Esses conceitos vêm se aproximando da indústria a cada dia, tornando-as mais eficientes e

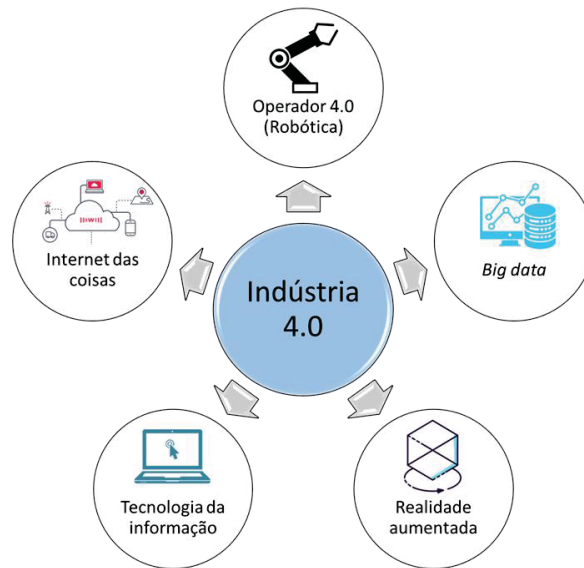
inteligentes com produtos de mais qualidade (RITTINGHOUSE E RANSOME, 2016; ZHENG et al. 2018).

A indústria 4.0 teve seu termo utilizado pela primeira vez no ano de 2011, oriundo de um projeto estratégico governamental alemão (SAKURAI e ZUCHI, 2018), e deste ano até o início de 2015, a quantidade de publicações científicas indexadas na base de dados *Scopus* subiu cerca de 207%, levando-se em consideração apenas as áreas voltadas a engenharia (RODRIGUES et al. 2016). Essa nova revolução traz consigo tecnologias em sinergia que podem garantir diversos benefícios as áreas industriais tradicionais, não sendo apenas um novo conceito (CARVALHO e DUARTE FILHO, 2018).

Segundo Zheng et al. (2018), dentro da gama de aplicações que vão desde a concepção do produto à logística, destaca-se a mecatrônica aplicada a projetos de sistemas para fabricação, produtos inteligentes baseados em conceitos personalizados, sistemas de manutenção preditiva e prognósticos de vida útil de equipamentos, implementação de gestão de energia de forma autônoma e sistemas aprimorados de logística (Figura 2).

Juntamente com a evolução da indústria, ocorreu também a evolução dos indivíduos que nela trabalham. Na primeira geração, o operador 1.0 era o indivíduo que realizava todas as atividades de forma manual com auxílio de algumas ferramentas mecânicas. O operador 2.0 realizava atividades assistidas com suporte de ferramentas de informática, sistemas operacionais e de informação. O operador 3.0 representa uma geração que desenvolve um trabalho cooperativo utilizando robôs, máquinas e ferramentas. Em torno desse desenvolvimento de indústria autônoma e tecnológica surge também o conceito de Operador 4.0. Esses operadores, altamente qualificados são apoiados de sistemas automáticos que garantem alívio ao estresse sofrido pelo corpo e pela mente, além de aumentar sua eficiência produtiva (ROMERO et al. 2016a). Os exoesqueletos são incorporados a esse conceito 4.0, auxiliando no levantamento de peso, estabilização de articulações, aumento de precisão e redução de estresses causados por atividades repetitivas (ROMERO et al. 2016a; KAASINEN et al. 2019).

FIGURA 2 – ORGANOGRAMA DO CONCEITO DE INDÚSTRIA 4.0 COM AS TECNOLOGIAS QUE A ENGLOBALAM



FONTE: Baseado em Zheng et al. (2018).

Além dos exoesqueletos, robôs podem realizar de forma integrada outras atividades, como atividades monótonas que não demandem operador, adaptação de estações de trabalho, adaptações de alertas levando-se em conta as limitações visuais e auditivas do operador e monitoramento automático de dados (KLEINDIENST et al. 2016; BRAGANÇA et al. 2019).

Dentro do contexto de utilização de exoesqueletos surge também a possibilidade do emprego da tecnologia de realidade aumentada. Essa tecnologia é capaz de proporcionar ao usuário informações digitais em tempo real, melhorando o acesso a informações do mundo digital para o mundo físico. Por assessorar o operador inteligente em tempo real, é capaz de prever erros humanos, reduzir a dependência de instruções impressas e auxiliar na tomada imediata de decisões (ROMERO et al. 2016b).

Por ser muito recente e se enquadrar em um novo contexto tecnológico, a indústria 4.0 ainda é carente com relação a informações e padronizações. Novas tecnologias necessitam de um correto direcionamento sobre suas diretrizes de utilização e aplicação prática, fazendo-se também necessário que os profissionais se atualizarem a esse novo contexto industrial (SCHEPMAN et al. 2012; GILCHRIST, 2016; RAUCH et al. 2019). Definições técnicas, padronizações, certificações e declarações de conformidade ainda são desafios a serem vencidos pelos grandes mercados mundiais em emergência (WISSENSFORUM, 2015).

No que tange as preocupações referentes a substituição dos seres humanos por maquinários e robôs, Robla-Gomez et al. (2017) afirmam que isso dificilmente ocorrerá, uma vez que a nova transformação industrial permitirá que robôs desenvolvam atividades que vão além das tarefas convencionais, não sendo restritos ao carregamento de objetos ou tarefas repetitivas, mas sim que permitam combinar suas habilidades com as habilidades humanas de forma colaborativa.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o desenvolvimento de uma nova geração da indústria surgem também novas tecnologias relacionadas a otimização dos processos através da utilização de sistemas de informação, inteligência artificial e engenharia eletrônica. Dentro desse novo conceito de integração dinâmica dos operadores a indústria se desenvolvem diversas pesquisas no mercado da robótica para o desenvolvimento de exoesqueletos capazes de auxiliar e substituir atividades repetitivas e/ou com riscos, garantindo ergonomia a atividade, segurança ao operário e integração deste com o sistema produtivo automatizado.

Os exoesqueletos apresentam grande potencial de produção e comercialização para o futuro, no entanto, alguns parâmetros técnicos relacionados a usabilidade e aceitabilidade precisam ser testados e aprimorados, bem como regulados através de certificações e padronizações para sua utilização.

O contínuo desenvolvimento tecnológico no setor garantirá não a substituição da mão de obra humana no campo industrial, mas sim a integração das habilidades entre homem e robôs.

REFERÊNCIAS

ABDOLI-ERAMAKI, M.; AGNEW, M.J.; STEVENSON, J.M. Um Dispositivo de Aumento Pessoal para Levantamento no Corpo (PLAD) Reduz a Amplitude EMG do Ereter do Spinae durante as Tarefas de Levantamento. **Clinical Biomechanics**, v.21, n.5, p.456-465, 2006.

ALABDULKARIM, S.; KIM, S.; NUSSBAUM, M.A. Effects of exoskeleton design and precision requirements on physical demands and quality in a simulated overhead drilling task. **Applied Ergonomics**, v.80, p.136-145, 2019.

ALEMI, M.M.; GEISSINGER, J.; SIMON, A.A.; CHANG, S.E.; ASBECK, A.T. A passive exoskeleton reduces peak and mean EMG during symmetric and asymmetric lifting. **Journal of Electromyography and Kinesiology**, v.47, p.25-34, 2019.

APHIRATSAKUN, N.; PARNICHKUN, M. Balancing Control of AIT Leg Exoskeleton Using ZMP based FLC. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v.6, n.4, p.319-328, 2009.

BIANCHI, M.; CEMPINI, M.; CONTI, R.; MELI, E.; RIDOLFI, A.; VITIELLO, N.; ALLOTTA, B. Design of a Series Elastic Transmission for hand exoskeletons. **Mechatronics**, v.51, p.8-18, 2018.

BOGUE, R. Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments. **Industrial Robot: An International Journal**, v.36, n.5, p.421-427, 2009.

BOSCH, T.; VAN ECK, J.; KNITEL, K.; LOOZE, M. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. **Applied Ergonomics**, v.54, p.212-217, 2016.

BOSTELMAN, R.; HONG, T. **Test Methods for Exoskeletons—Lessons Learned from Industrial and Response Robotics**. Institution of Engineering Technology, 2018; 22p.

BRAGANÇA, S.; COSTA, E.; CASTELLUCCI, I.; AREZES, P.M. A Brief Overview of the Use of Collaborative Robots in Industry 4.0: Human Role and Safety. **Occupational and Environmental Safety and Health**, v.1, p.641-650, 2019.

BRAN, A.; KHELIFI, A.; SURYN, W. Usability Meanings and Interpretations in ISO Standards. **Software Quality Journal**, v.11, p.325–338, 2003

BRIDGER, R.S.; ASHFORD, A.I.; WATTIE, S.; DOBSON, K.; FISHER, I.; PISULA, P.J. Sustained attention when squatting with and without an exoskeleton for the lower limbs. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v.66, p.230-239, 2018.

CARVALHO, E.S.S.; DUARTE FILHO, N.F. Proposta de um sistema de aprendizagem móvel com foco nas características e aplicações práticas da indústria 4.0. **Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação**, v.27, p.36-51, 2018.

CHEN, B.; MA, H.; QIN, L-Y.; GAO, F.; CHAN, K-M.; LAW, S-W.; QIN, L.; LIAO, W-H. Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons. **Journal of Orthopaedic Translation**, v.5, p.26-37, 2016.

CHOI, J.; NA, B.; JUNG, P-G.; RHA, D-W.; KONG, K. WalkON Suit: A Medalist in the Powered Exoskeleton Race of Cybathlon 2016. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, v.24, n.4, p.75-86, 2017.

DAHMEN, C.; WOLLECKE, F.; CONSTANTINESCU, C. Challenges and Possible Solutions for Enhancing the Workplaces of the Future by Integrating Smart and Adaptive Exoskeletons. **Procedia CIRP**, v.67, p.268-273, 2018.

DE LOOZE, M.P.; BOSCH, T.; KRAUSE, F.; STADLER, K.S.; O'SULLIVAN, L.W. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. **Ergonomics**, v.59, n.5, p. 671-681, 2016.

FORNER-CORDERO, A.; PONS, J.L.; TUROWSKA, E.A.; SCHIELE, A.; BERTOMEU, J.M.B.; GARRIDO, D.; MOLLÁ, F.; BELDA LOIS, J.M.; POVEDA, R.; BARBEDÁ, R.; ROCON, E. Kinematics and Dynamics of Wearable Robots. In: **Wearable robots: biomechatronic exoskeletons**, Wiley, Hoboken, NJ, USA, p.47-85, 2008.

GILCHRIST, A. Introducing industry 4.0. In: **Industry 4.0**. New York: apress, p.195-215, 2016.

GOPURA, R.; KIGUCHI, K. Mechanical designs of active upper-limb exoskeleton robots: state-of-the-art and design difficulties. **IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics**, 2009.

HANSEN, C.; GOSSELIN, F.; MANSOUR, K.B.; DEVOS, P.; MARIN, F. Design-validation of a hand exoskeleton using musculoskeletal modeling. **Applied Ergonomics**, v.68, p.283-288, 2018.

HUYSAMEN, K.; PODER, V.; O'SULLIVAN, L. Elongation of the surface of the spine during lifting and lowering, and implications for design of an upper body industrial exoskeleton. **Applied Ergonomics**, v.72, p.10-16, 2018.

KAASINEN, E.; SCHMALFU, F.; OZTURK, C.; AROMAA, S.; BOUBEKEUR, M.; et al. Empowering and engaging industrial workers with Operator 4.0 solutions. **Computers & Industrial Engineering**, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.052>.

KIM, S.; NUSSBAUM, M.A.; ESFAHANI, M.I.M.; ALEMI, M.M.; JIA, B.; RASHEDI, E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part II – “Unexpected” effects on shoulder motion, balance, and spine loading. **Applied Ergonomics**, v.70, p.323-330, 2018.

KLEINDIENST, M.; WOLF, M.; RAMSAUER, C. What workers in Industry 4.0 need and what ICT can give—an analysis. **Human Computer Interaction Perspectives on Industry**, v.4, p.1-6, 2016.

KOOPMAN, A.S.; TOXIRI, S.; POWER, V.; KINGMA, I.; VAN DIEEN, J.H.; ORTIZ, J.; DE LOOZE, M.P. The effect of control strategies for an active back-support exoskeleton on spine loading and kinematics during lifting. **Journal of Biomechanics**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.04.044>.

LEE, H-D.; LEE, B-K.; KIM, W-S.; HAN, J-S.; SHIN, K-S.; HAN, C-S. Human–robot cooperation control based on a dynamic model of an upper limb exoskeleton for human power amplification. **Mechatronics**, v.24, n.2, p.168-176, 2014.

LONGEN, W.C.; BARCELOS, L.P.; KARKLE, K.K.; SCHUTZ, F.S.; VALVASSORI, S.S.; VICTOR, E.G.; ROHR, P.; MADEIRA, K. Avaliação da incapacidade e qualidade de vida de trabalhadores da produção de indústrias cerâmicas. **Revista Brasileira de Medicina do Trabalho**, v.16, n.1, p.10-18, 2018.

LORENZA, O. **Industry 4.0 and process ergonomics: Exoskeletons application in Automotive**. 2018. 110p. Dissertação (Master of Science in Automotive Engineering, Politechnic of Turin).

LOTZ, C.A.; AGNEW, M.J.; GODWIN, A.A.; STEVENSON, J.M. The effect of an on-body personal lift assist device (PLAD) on fatigue during a repetitive lifting task. **Journal of Electromyography and Kinesiology**, v.19, n.2, p.331-340, 2009.

LOW, K.H.; LIU, X.; GOH, C.H.; YU, H. Locomotive Control of a Wearable Lower Exoskeleton for Walking Enhancement. **Journal of Vibration and Control**, v.12, n.12, p.1311-1336, 2006.

LOVRENOVIC, Z.; DOUMIT, M. Development and testing of a passive Walking Assist Exoskeleton. **Biocybernetics and Biomedical Engineering**, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.bbe.2019.01.002>.

LU, Q.; ORTEGA, C.; MA, O. Passive gravity compensation mechanisms: technologies and applications. **Recent Patent Eng.**, v.5, p.32–44, 2011.
LUGER, T.; SEIBT, R.; COBB, T.J.; RIEGER, M.A.; STEINHILBER, B. Influence of a passive lower-limb exoskeleton during simulated industrial work tasks on physical load, upper body posture, postural control and discomfort. **Applied Ergonomics**, v.80, p.152-160, 2019.

LUO, Z.; YU, Y. Wearable stooping-assist device in reducing risk of low back disorders during stooped work. **IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom.**, p.230-236, 2013.

MOYON, A.; POIRSON, E.; PETIOT, J-F. Experimental study of the physical impact of a passive exoskeleton on manual sanding operations. **Procedia CIRP**, v.70, p.284-289, 2018.

PICCHIOTTI, M.T.; WESTON, E.B.; KNAPIK, G.G.; DUFOUR, J.S.; MARRAS, W.S. Impact of two postural assist exoskeletons on biomechanical loading of the lumbar spine. **Applied Ergonomics**, v.75, p.1-7, 2019.

QINGCONG, W.; XINGSONG, W.; BAI, C.; HONGTAO, W. Development of an RBFN-based neural-fuzzy adaptive control strategy for an upper limb rehabilitation exoskeleton. **Mechatronics**, v.53, p.85-94, 2018.

QUINTERO, H.A.; FARRIS, R.J.; GOLDFARB, M. A method for the autonomous control of a lower limb exoskeleton for persons with paraplegia. **Journal of Medical Devices** v.6, p.1-6, 2012.

RAUCH, E.; LINDER, C.; DALLASEGA, P. Anthropocentric perspective of production before and within Industry 4.0. **Computers & Industrial Engineering**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.018>

RITTINGHOUSE, J.W.; RANSOME, J.F. **Cloud Computing: Implementation, Management, and Security**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

ROBLA-GOMEZ, S.; BECERRA, V.M.; LLATA, J.R.; GONZALEZ-SARABIA, E.; TORRE-FERRERO, C.; PEREZ-ORIA, J. Working together: a review on safe human-robot collaboration in industrial environments. **IEEE Access.**, v.5, p.26754–26773, 2017.

RODRIGUES, L.F.; DE JESUS, R.A.; SCHUTZER, K. Industrie 4.0 – A Literature Review. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v.19, n.38, p.33-45, 2016.

ROMERO, D.; BERNUS, P.; NORAN, O.; STAHERE, J.; FAST-BERGLUN, A. The operator 4.0: human cyber-physical systems & adaptive automation towards human-automation symbiosis work systems. In: **IFIP international conference on advances in production management systems**. Springer, Cham, 2016. p. 677-686a.

ROMERO, D.; STAHERE, J.; WUEST, T.; NORAN, O.; BERNUS, P.; FAST-BERGLUND, A.; GORECKY, D. Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. In: **International conference on computers and industrial engineering (CIE46) proceedings**, 2016, p.1-11b.

RUIZ, A.F.; ROCON, E.; RAYA, R.; PONS, J.L. Coupled control of human-exoskeleton systems: An adaptative process. In: **2008 Conference on Human System Interactions**. IEEE, p.242-246, 2008.

RUIZ-OLAYA, A.F.; LOPEZ-DELIS, A.; DA ROCHA, A.F. Chapter Eight - Upper and Lower Extremity Exoskeletons. **Handbook of Biomechatronics**, p.283-317, 2019.

SAKURAI, R.; ZUCHI, J.D. As revoluções industriais até a indústria 4.0. **Interface Tecnológica**, v.15, n.2, p.480-491, 2018.

SANKAI, Y. HAL: Hybrid Assistive Limb Based on Cybernetics. *Robotics Research*, v.66, p.25–34, 2010.

SCHEPMAN, A.; RODWAY, P.; BEATTIE, C.; LAMBERT, J. An observational study of undergraduate students adoption of (mobile) note-taking software. *Computers in human behavior*, v.28, n.2, p.308–317, 2012.

SPADA, S.; GHIBAUDO, L.; CARNAZZO, C.; GASTALDI, L.; CAVATORTA, M.P. Passive Upper Limb Exoskeletons: An Experimental Campaign with Workers. **Congress of the International Ergonomics Association**, 2018, pp.230–239.

- SPOSITO, M.; TOXIRI, S.; CALDWELL, D.G.; ORTIZ, J.; MOMI, E. Towards Design Guidelines for Physical Interfaces on Industrial Exoskeletons: Overview on Evaluation Metrics. **Wearable Robotics: Challenges and Trends**, p.170-174, 2018.
- TSUKAHARA, A.; KAWANISHI, R.; HASEGAWA, Y.; SANKAI, Y. Sit-to-stand and stand-to-sit transfer support for complete paraplegic patients with robot suit HAL. **Adv Robot**, v.24, p.1615-1638, 2010.
- ULREY, B.; FATHALLAH, F.A. Subject-specific, whole-body models of the stooped posture with a personal weight transfer device. **Journal of Electromyography and Kinesiology**, v.23, n.1, p.206-215, 2013.
- WHITFIELD, B.H.; COSTIGAN, P.A.; STEVENSON, J.M.; SMALLMAN, C.L. Effect of an on-body ergonomic aid on oxygen consumption during a repetitive lifting task. *International Journal of Industrial Ergonomics*, v.44, n.1, p.39-44, 2014
- WISSENSFORUM, V.D.I. Assistenzroboter in der Produktion 2015 - Mensch-Roboter-Kollaboration im Industrielltag - Mensch Roboter & Sicherheit: Wie Industrieroboter gefahrlos mit dem Menschen kollaborieren. **VDI-Wissensforum**, v.2, p.1-4, 2015.
- YANDELL, M.B.; QUINLIVAN, B.T.; POPOV, D.; WALSH, C.; ZELIK, K.E. Physical interface dynamics alter how robotic exosuits augment human movement: implications for optimizing wearable assistive devices. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, v.14, n.40, p.1-11, 2017.
- YU, H.; CHOI, S.; HAN, K-L.; CHOI, J.Y.; CHUNG, G.; SUH, J. Development of a upper-limb exoskeleton robot for refractory construction. **Control Engineering Practice**, v.72, p.104-113, 2018.
- ZANOTTO, D.; AKIYAMA, Y.; STEGALL, P.; AGRAWAL, S.K. Knee Joint Misalignment in Exoskeletons for the Lower Extremities: Effects on User's Gait. **IEEE Transactions on Robotics**, v.31, p.978-87, 2015.
- ZHENG, P.; WANG, H.; SANG, Z.; ZHONG, Y.; LIU, Y.; LIU, C.; MUBAROK, K.; YU, S.; XU, X. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v.13, n.2, p.137-150, 2018.
- ZOSS, A.B.; KAZEROONI, H.; CHU, A. Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v.11, n.2, p.128-138, 2006.