



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM



CASSIANO EMÍLIO DA SILVA

USO DE DISPOSITIVOS VESTÍVEIS TECNOLÓGICOS NA MINERAÇÃO

**Ouro Preto
2022**



CASSIANO EMÍLIO DA SILVA
(04/2022)

USO DE DISPOSITIVOS VESTÍVEIS TECNOLÓGICOS NA MINERAÇÃO

Área de concentração: LAVRA DE MINAS

Linha de Pesquisa: LAVRA A CÉU ABERTO E SUBTERRÂNEA

Projeto de Pesquisa: OPERAÇÕES DE LAVRA E ÍNDICES DE EFICIÊNCIA NA
MINERAÇÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao PPGEM
como parte integrante dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mineral.

Orientador: JOSÉ MARGARIDA DA SILVA

OURO PRETO
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586u Silva, Cassiano Emilio da.

Uso de dispositivos vestíveis tecnológicos na mineração. [manuscrito] / Cassiano Emilio da Silva. - 2022.

114 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Lavra de Minas.

1. Mineração a céu aberto. 2. Lavra subterrânea. 3. Minas e mineração - Inovações tecnológicas. 4. Tecnologias vestíveis. I. Silva, José Margarida da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.27:004.946

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Cassiano Emílio da Silva

Uso de Dispositivos Vestíveis Tecnológicos na Mineração

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre

Aprovada em 06 de maio de 2022

Membros da banca

Dr. José Margarida da Silva - Orientador- Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Ralf Luis de Moura- Instituto Tecnológico da Vale
Dr. Saul Emanuel Delabrida Silva- Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz- Universidade Federal de Ouro Preto

José Margarida da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 04/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Jose Margarida da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/11/2022, às 11:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0422213** e o código CRC **B076F739**.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais Antenor Celso da Silva e Rosane Aparecida Conceição da Silva, e minha namorada Nidelcia Rissi que sempre me apoiarem nessa etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me favorecer a dar esse passo na área educacional.

Gratidão aos meus Pais Antenor Celso da Silva e Rosane Aparecida Conceição da Silva pelo apoio e incentivo pela continuação dos estudos.

Agradeço a minha namorada Nidélcia Rissi por estar ao meu lado nesse momento.

Sou grato pela confiança do meu orientador Prof. Dr. José Margarida da Silva que dedicou inúmeras horas para sanar as dúvidas e apontar os caminhos para a concretização dessa dissertação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pilares tecnológicos da Indústria 4.0.	14
Figura 2 - Exemplos de alguns pontos que podem estar os acessórios vestíveis com tecnologia de monitoramento ambiental e fisiológico	16
Figura 3 - Dispositivos vestíveis de Steve Mann.....	19
Figura 4 - Estrutura do protocolo de revisão de literatura	25
Figura 5 - Relógio inteligente e pulseira de monitoramento.	29
Figura 6 - Funções de sensoriamento e detecção que se pode realizar nos dispositivos de pulso	30
Figura 7 - Capacete <i>Smart Helmet Clip</i> e detalhes dos seus sensores	38
Figura 8 - Capacete da Guardhat.	38
Figura 9 - Exemplos de dispositivos de visão para Realidade Virtual e Aumentada	40
Figura 10 - Simulador máquinas da Komatsu com a utilização de óculos de R.V.....	43
Figura 11 - Exemplos de miniaturas de sensores que podem ser usados em drone.....	45
Figura 12 -VANT operado em conjunto com óculos R.A	45
Figura 13 - Drone industrial com armadura para inspeções em espaços confinados	46
Figura 14 - Laser de monitoramento de cavidades	47
Figura 15 - Comparação de um mesmo realce medido com o método tradicional de CMS e o escaneamento com sensor montado no drone.....	48
Figura 16 - Dispositivo vestível de medição de qualidade do ar em minas subterrâneas	49
Figura 17 - Colete multifunção da Elokon para uso em áreas de galpões logísticos	50
Figura 18 - Pequenos dispositivos de GPS que pode ser carregado junto a roupa, cinto ou capacete	51
Figura 19 - Fone de ouvido inteligente composto por microfones internos e externos	52

Figura 20 - Gráfico com a Quantidade de artigos e data de publicação	77
Figura 21 – Tipologia dos operadores 4.0.....	75

RESUMO

Os vestíveis tecnológicos estão sendo implementados em muitos domínios como no monitoramento da saúde, práticas esportivas, vida cotidiana e também na indústria. As novas proposições de organização e planejamento da industrial estão ficando mais complexas e integradas de tal forma que já se pronuncia o limiar de uma nova revolução industrial, denominada Indústria 4.0. A mineração também está em consonância com o progresso e implantação dessas novas tecnologias. A diversidade de dispositivos vestíveis como óculos virtuais, pulseiras, capacetes e outros dispositivos de formas e tamanhos variados quando dotados de tecnologia permitem alcançar novos patamares de interação homem-máquina e processos produtivos. Este estudo se concentra na aplicação de vestíveis tecnológicos aplicados no contexto da mineração, foi buscado uma ampla literatura para entender os diversos aspectos e implicações que dos vestíveis tecnológicos na mineração através da matriz *SWOT* (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças). A pesquisa indica que os vestíveis tecnológicos já estão em desenvolvimento para o setor mineral. O monitoramento fisiológico mostra-se uma oportunidade interessante de melhoria no ambiente de trabalho especialmente para área e ventilação subterrânea, que se for combinado com a localização que pode auxiliar na tomada de decisão. As ameaças e fraquezas para a implantação dos vestíveis estão no contexto de riscos a privacidade, fraca precisão e número alto de falsos positivos.

Palavras-chave: vestíveis tecnológicos; computação vestível; mineração 4.0; mineração inteligente.

ABSTRACT

Wearables computing are being implemented in many domains like health monitoring, sports practices, everyday life and also in industry. The new proposals for industrial organization and planning are becoming more complex and integrated in such a way that the threshold of a new industrial revolution, called Industry 4.0, is already pronounced. Mining is also in line with the progress and deployment of these new technologies. The diversity of wearable devices such as virtual glasses, bracelets, helmets and other devices of different shapes and sizes when equipped with technology allow reaching new levels of human-machine interaction and production processes. This study focuses on the application of wearables applied in the context of mining, a broad literature was sought to understand the various aspects and implications of wearables in mining through the SWOT matrix (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats). The research indicates that wearables are already under development for the mineral sector. Physiological monitoring is an interesting opportunity to improve the work environment, especially for area and underground ventilation, which, if combined with the location, can assist in decision making. Threats and weaknesses for the deployment of wearables are in the context of privacy risks, poor accuracy and high number of false positives.

Keywords: technological wearables; wearable computing; mining 4.0; smart mining.

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Apresentação das palavras-chaves da pesquisa sobre vestíveis tecnológicos	27
Quadro 2 – Dispositivos pesquisados e suas possíveis utilidades na mineração	56
Quadro 3 - Matriz <i>SWOT</i> sobre o uso de vestíveis tecnológicos na mineração	59
Tabela 1: Relação entre artigos de mineração e quantidade de artigos	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.1 CARACTERÍSTICAS DA INDÚSTRIA E MINERAÇÃO 4.0	11
1.2 OPERADOR AUMENTADO	14
2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....	17
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2.3. JUSTIFICATIVAS.....	18
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
4. METODOLOGIA	24
5. RESULTADOS	29
5.1 DISPOSITIVOS DE PULSO.....	29
5.2. CAPACETES INTELIGENTES.....	34
5.3 DISPOSITIVOS DE VISÃO	39
5.4. OUTROS TIPOS DE DISPOSITIVOS	48
6. DISCUSSÃO	54
6.1. ANÁLISE COM A MATRIZ <i>SWOT</i>	56
6.2 FORÇAS.....	58
6.2.1 MONITORAMENTO AMBIENTAL.....	58
6.2.2 RASTREAMENTO E LOCALIZAÇÃO	59
6.2.3 PLATAFORMA MULTISENSOR EM UM ÚNICO DISPOSITIVO	59
6.2.4 ENTREGA DE CONTEÚDO.....	59
6.2.5 ENVOLVIMENTO DA EXPERIÊNCIA HUMANA	60

6.3 FRAQUEZAS	61
6.3.1 QUESTÕES DE PRIVACIDADE	61
6.3.2 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO	62
6.3.3 CUSTO E MANUTENÇÃO.....	63
6.3.4 FRAGILIDADE ELETRÔNICA.....	63
6.3.5 DESCONFORTO E PROBLEMAS DE DESIGN	63
6.4. OPORTUNIDADES	64
6.4.1 MONITORAMENTO FISIOLÓGICO	64
6.4.2 INTEGRAÇÃO COM OUTROS EQUIPAMENTOS.....	67
6.4.3 PREVENÇÃO DE COLISÃO.....	67
6.4.4 APOIO NA TOMADA DE DECISÃO	67
6.5 AMEAÇAS.....	68
6.5.1 FRACA PRECISÃO DE DETECÇÃO.....	68
6.5.2 NÚMERO ALTO DE FALSOS POSITIVOS.....	69
6.5.3 MATURIDADE DAS EMPRESAS	69
6.5.5 NEGOCIAÇÃO DOS CENÁRIOS	70
6.5.6 MOTIVAÇÕES INESPECÍFICAS DAS EMPRESAS	70
6.5.7 ATENDIMENTO A TODAS AS FAIXAS ETÁRIAS	71
6.5.8 DESAFIO DA ANÁLISE DOS DADOS.....	71
6.5.9 COMPETIÇÃO COM APARELHOS PORTÁTEIS.....	72
6.6 PRINCIPAIS CONCLUSÕES DA ANÁLISE <i>SWOT</i>	72
6.7. RESULTADOS DA ANÁLISE DE LITERATURA.....	73
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
7.1 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A BUSCA DE LITERATURA	77

7.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS DISPOSITIVOS VESTÍVEIS	78
7.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MONITORAMENTO FISIOLÓGICO	81
7.4. MINERAÇÃO 4.0. E OS VESTÍVEIS TECNOLÓGICOS INDUSTRIAIS.....	83
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
APÊNDICE A - LITERATURA DOS ARTIGOS SOBRE MINERAÇÃO E VESTÍVEIS TECNOLÓGICOS.....	93
APÊNDICE B. – ARTIGOS COM ESTUDOS ABRANGENTES SOBRE O ESTADO DA ARTE EM VESTÍVEIS TECNOLÓGICOS.....	106

1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1 CARACTERÍSTICAS DA INDÚSTRIA E MINERAÇÃO 4.0

Até o início deste século as tecnologias digitais ainda não haviam exibido totalmente seu potencial. As economias avançadas sofriam com a diminuição do peso relativo da indústria com migração de parques industriais para países asiáticos (ARBIX *et al.* 2017). A iniciativa privada alemã, em reação a esse movimento de desindustrialização, primeiro observou a transferência de indústrias básicas e depois um aumento da sofisticação industrial na Ásia. Eles então se mobilizaram e lançaram programas e estratégias para manter a liderança no desenvolvimento de sistemas integrados para manufaturas. Então em 2006 foi lançado o programa “Estratégia Alta Tecnologia” e depois reafirmado em 2010 no “Plano de Ação da Estratégia Alta Tecnologia 2020”.

O termo Indústria 4.0 surgiu publicamente em 2011 na feira de Hannover de Tecnologias Industriais para designar fábricas com processos de produção integrados e hiper conectados digitalmente com a aplicação de automação, sensores e técnicas de inteligência artificial que permitem alcançar um novo patamar de produção. A plataforma passou a ocupar lugar central na atual política tecnológica da Alemanha e seu enfoque temático busca o desenvolvimento de tecnologias de manufatura avançada potencialmente disruptivas que não se fixam em processos de curta duração, mas aponta fundamentalmente para o médio e longo prazo.

O uso do termo Indústria 4.0 remete à história dos outros períodos vividos em que ocorreram revoluções industriais. A primeira revolução ocorreu na Inglaterra no final do século XVIII sendo caracterizada pela passagem progressiva dos métodos de produção artesanal para meios industriais com o uso da energia a vapor. A segunda revolução industrial teve início por volta de 1870 com avanços em química e física que permitiram a criação do aço e surgimento de ferrovias, barcos movidos a diesel e telégrafos que possibilitaram um fluxo maior de informações, pessoas e produtos, produção em massa fica constituída. A

terceira revolução industrial ocorreu após 1970 e foi tomando forma à medida que o emprego da eletrônica evoluiu para o uso de semicondutores, automação e informática.

A quarta revolução industrial não está plenamente desenvolvida e estabelecida em seus pilares. O entendimento amplo é que a nova plataforma industrial é fundamentada no uso de uma grande quantidade de tecnologias digitais hiper conectadas com sensores para criarem sistemas cyber físicos.

Os sistemas cyber físicos são o resultado da combinação do mundo físico real com o mundo virtual, por meio das tecnologias de informações e processamento de dados, que permitem criar cópias virtuais da realidade que são capazes de interagir de forma quase sempre autônoma e para se auto-corrigirem com a comunicação padronizada entre máquinas.

Embora se tenha muita produção científica sobre a Indústria 4.0, é possível fazer analogias e comparações sobre o que essas novas tecnologias podem trazer de ganhos para o setor da mineração.

A economia em escala com equipamentos cada vez maiores e avanços mecânicos e eletrônicos permitiram por décadas que as minas conseguissem reduzir os custos de movimentação de material, entretanto esses ganhos parecem estar cada vez mais próximos do seu limite de desenvolvimento (BARTOS, 2007). Os custos com automação e robótica vem caindo e ficando mais acessível e, os custos de um robô industrial caíram 50% desde 1990 (DURRANT-WHYTE *et al.*, 2015).

Os investimentos para automatizar operações de mineração são de escala considerável e fatores incertos que permeiam a mineração como quantidade e teor das reservas, questões de oferta e demanda entre outros fatores que tornam difícil a adoção de automação das minas de forma mais rápida e ampla.

Mesquita *et al.* (2016) destacam que os desafios e mudanças na economia mundial impõem claramente estratégias de inovação e implantação de novas tecnologias para ganhos de eficiência operacional, promoção da sustentabilidade socioambiental em toda a cadeia de mineração e metais.

A tendência que pode ser observada em países desenvolvidos e com grande destaque e tradição no setor da mineração como Canadá, Austrália, Finlândia e Suécia é incentivar

tecnologias de mineração não tripulada para a área de mineração subterrânea (LI e ZHAN, 2018).

Grandes grupos de mineração têm adotado cada vez mais veículos autônomos em suas operações. Entre as grandes frotas em operação pode-se citar a *Fortescue Metals Group*, que é o terceiro maior produtor de minério de ferro da Austrália, com um total de 128 caminhões autônomos nas minas do grupo (JANG e TOPAL, 2020)

Para um cenário de curto prazo e com o intuito de aumento de produtividade e para contornar problemas de minas com teores mais baixos e exigências com maior segurança no trabalho encontram-se soluções como a transformação digital dos processos produtivos. Litvinenko e Sergeev (2019) informam que a principal diferença entre transformação digital e automação é um aumento na eficiência e na qualidade da tomada de decisões.

A transformação digital é apoiada em ferramentas e tecnologias como internet das coisas (IoT), *big data*, aprendizado de máquinas e computação em nuvem. Mesmo que um incremento de automação não seja possível ou de difícil realização por mineradoras médias e pequenas, a transformação digital deveria estar no seu radar de execução de melhorias.

Cesário Neto (2019) resume que a quarta revolução industrial é mais do que apenas a indústria em rede e alimentada por dados. Subjacente a ela o terreno está sendo preparado para obter uma maior potência por meio de novos paradigmas técnico-econômicos.

Por enquanto não existe um consenso claro sobre a caracterização da revolução industrial 4.0. Há várias tentativas de configurar a quarta revolução em termos de tecnologias que serão adotadas. A figura 1 representa 9 pilares (*clusters*) tecnológicos de uma plataforma de indústria 4.0, cabendo ressaltar que alguns outros programas de plataforma industrial como o americano incluem também biotecnologia e novos materiais. Já outros países também embutem as questões sobre energia.

Figura 1- Pilares tecnológicos da Indústria 4.0.



Fonte: Boston Consulting

1.2 OPERADOR AUMENTADO

Dentro desse novo contexto com operações altamente digitalizadas e com sistemas automatizados, é preciso debater como melhorar e potencializar a interação que pode ocorrer entre humanos, máquinas e processo produtivo. Assim, segundo Longo *et al.* (2017), as fábricas inteligentes são caracterizadas por uma integração perfeita de recursos avançados de fabricação com infraestruturas digitais capazes de capturar, gerar e disseminar inteligência por meio de monitoramento, análise, modelagem e simulação aprimorados.

Krupitzer *et al* (2020) expõem que o trabalhador não pode mais ser considerado distanciado de sistemas produtivos com o grande emprego de automação. Segundo ele devem-se potencializar os pontos fortes dos humanos como reagir a situações não previstas, enxergar pontos de melhoria e fazer alocações dinâmicas em ambientes incertos para exceder o trivial papel da automação e controle de processar informações e reagir de formas de formas pré-programadas.

À medida que a Indústria 4.0 toma forma, de fato, os operadores humanos experimentam uma maior complexidade de suas tarefas diárias: eles precisam ser altamente flexíveis e demonstrar capacidades de adaptação em um ambiente de trabalho muito dinâmico (LONGO *et al.*, 2017). Com intuito de reposicionar e munir o trabalhador para atuar nesse contexto de digitalização e automatizado encontram-se pesquisas com o uso de dispositivos vestíveis tecnológicos, do inglês *wearables*.

O conceito de dispositivos vestível tecnológico usado neste trabalho é um agrupamento dos conceitos propostos por Kamisalic *et al.* (2018) e Duque (2018): *wearables* podem ser entendidos como a junção de roupas ou acessórios com tecnologias eletrônicas e digitais sobre o corpo humano que visam o monitoramento fisiológico, do ambiente e detecção de atividades e fazem um resumo, registro e documentação do cotidiano.

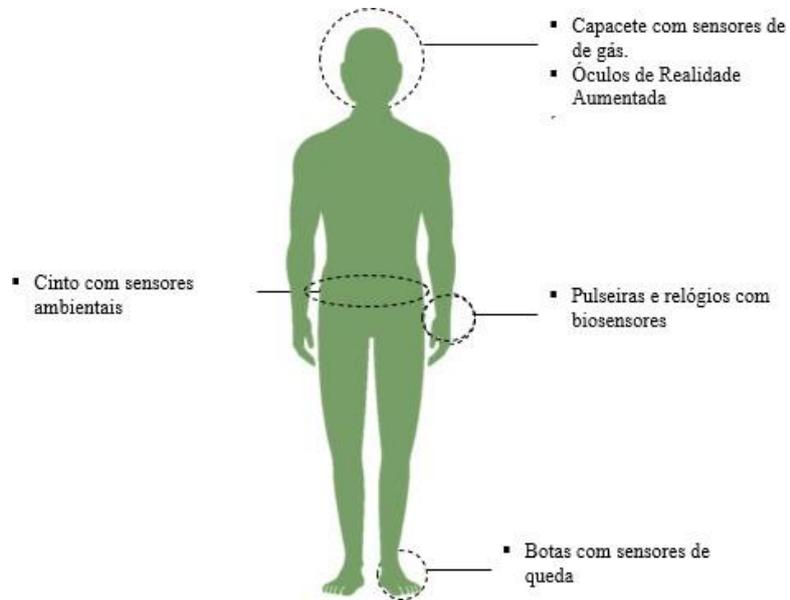
O uso de aparatos tecnológicos vestíveis permite ampliar os sistemas de interação humano-computador onde o *design* e a engenharia de sistemas de trabalho usam robótica colaborativa, navegação e automação adaptativa para melhorar o conhecimento e as capacidades de operadores (Romero *et al.*, 2016).

Dentro do contexto industrial a aplicação de vestíveis tecnológicos se daria com o uso de equipamentos de proteção individual (EPI) dotados de sensores fisiológicos e ambientais, dessa forma capacetes, pulseiras, coletes, botas e óculos inteligentes permitiriam se ter um operador aumentado ou ampliado (do inglês *Augmented operator*). Outra terminologia comumente usada é operador inteligente (*smart operator*) ou ainda operador 4.0 (vide exemplo na figura 2).

Kong *et al.* (2018 e 2019) ressaltam também a importância da tecnologia vestível, para enfrentar o progresso da contínua complexidade e com novos requisitos crescentes em relação à eficiência de custos, adaptabilidade e sustentabilidade. Os mesmos autores reconhecem que as aplicações de vestíveis no ambiente industrial são raras, mas o desenvolvimento delas vai permitir suporte em tempo real, interação confiável e dinâmica aprimorada entre o sistema cibernético, o mundo físico e os humanos.

O operador ampliado possui um conhecimento superior do ambiente do trabalho, com ampliação das percepções humanas trazendo novas formas de visualizar informações, intervir e simular cenários, que trazem mais segurança no ambiente de trabalho com o uso de biosensores e com a vigilância dos perigos que o cerca.

Figura 2 - Exemplos de alguns pontos que podem estar os acessórios vestíveis com tecnologia de monitoramento ambiental e fisiológico.



Fonte: Próprio Autor (2022).

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta dissertação é a partir da crescente digitalização dos sistemas e com a grande automatização dos processos produtivos identificar como os dispositivos vestíveis tecnológicos seriam empregados no setor mineral, e fazer uma análise do seu potencial de uso por meio de uma matriz *SWOT*. Uma matriz *SWOT* é uma das ferramentas usadas em técnicas de planejamento estratégico para um produto, cenário ou organização. Suas iniciais formam um anacrônico em inglês para as palavras Forças (*Strengths*), Fraquezas (*Weaknesses*), Oportunidades (*Opportunities*) e Ameaças (*Threats*).

Os atributos de força são aqueles que são os diferenciais que geram vantagens frente às outras alternativas, já as fraquezas retratam as desvantagens. As oportunidades mostram os fatores que podem fazer o produto prosperar ocupando espaços frente aos seus concorrentes, as ameaças representam obstáculos a serem enfrentados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos específicos que permitem alcançar o objetivo geral podem-se listar os seguintes:

- Fazer o levantamento da bibliografia sobre dispositivos vestíveis tecnológicos principalmente no âmbito industrial.
- Abordar as implicações que uso dos dispositivos vestíveis tecnológicos trazem para o setor industrial e da mineração sobre diversos pontos de vistas.
- Trazer exemplos de dispositivos vestíveis tecnológicos em uso nos diversos setores industriais e na mineração.

2.3. JUSTIFICATIVAS

Partindo-se do tema mineração 4.0, com aplicação de novas tecnologias e da crescente automação foi escolhido tratar do subtema sobre os dispositivos vestíveis tecnológicos. Devido ao desenvolvimento da tecnologia da informação no século XXI, o papel da automação e das tecnologias inteligentes em vários aspectos da vida humana está aumentando e mostrando sua eficácia. A área da mineração é umas das áreas onde se faz necessário o emprego de novas tecnologias para aumento da segurança e eficiência operacional para lidar com teores cada vez mais marginais.

Existe um hiato de publicações em língua portuguesa sobre o uso de dispositivos vestíveis tecnológicos de uma forma geral e mais ainda dentro do setor da mineração. A mineração precisa buscar a inovação e estudar implantações de novas tecnologias para poder enfrentar os desafios como minérios de baixo teor, margens mais estreitas de lucro, aprofundamento das minas, condicionantes mais rígidas em relação ao meio ambiente. Além disso o setor de mineração possui um nível elevado de risco ocupacional. O uso de dispositivos vestíveis tecnológicos permitiria ao trabalhador ter uma percepção ampliada do ambiente que o cerca e com isso tomar ações preventivas e adaptações para trabalhar de forma mais segura e confortável.

Os estudos sobre dispositivos vestíveis tecnológicos industriais estão em estágios iniciais, entretanto é importante compilar os estudos existentes, entender os benefícios potenciais e trazer o debate também para o setor extrativo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A ideia de se ter um computador vestível foi cunhada e trabalhada de forma pioneira por Steve Mann, professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade de Toronto em 1995, onde testou-se a ideia de que aparatos tecnológicos poderiam ser integrados ao cotidiano do usuário de computador permitindo enviar e executar comandos enquanto realizava outras atividades. O mesmo chegou a criar alguns dispositivos de uso corporal na década de 80 (vide figura 3), de forma experimental e conceitual.

Figura 3 - Dispositivos vestíveis de Steve Mann.



Fonte: <http://wearcam.org/>

As ideias iniciais de Steve Mann estavam ligadas as características como mobilidade, o que permitiria o usuário se tornar multitarefas realizando tarefas simultâneas como caminhar e responder mensagens. Os dispositivos vestíveis tecnológicos também devem ser projetados para terem um nível de autonomia em relação ao usuário para realizar capturas ambientais e corporais sem demandar atenção demasiada com os comandos.

Os primeiros objetos ligados à computação vestível possuíam aspecto de ciborgue, semelhante a robôs de ficção científica, o que se tornou um obstáculo para aceitação e difusão de dispositivos. Atualmente com o desenvolvimento dos *chips*, baterias e novos materiais permitiram que os dispositivos vestíveis sejam projetados com uma aparência menos

grosseira, e assim passam a se assemelhar mais com acessórios convencionais (DUQUE, 2018).

Os vestíveis tecnológicos estão em pleno estágio de desenvolvimento e a expansão tem sido facilitada por muitas inovações recentes na tecnologia de sensores, comunicação, baterias menores e duráveis e processamento de dados.

Awolusi *et al.* (2018) destacam as seguintes tecnologias que permitiram criar um sistema de monitoramento corporal: identificação por radiofrequência (RFID), banda ultra larga (UWB), ultrassônico, sonar, Bluetooth, Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), eletrocardiograma (ECG) e eletromiografia (EMG), sensores como resposta galvânica da pele (GSR), acelerômetros, giroscópios e magnetômetros. Particularmente, a RFID e a tecnologia TTE (*Trough the Earth*) têm sido estudadas para melhorar a comunicação em minas subterrâneas, entre outras.

O potencial para tecnologias vestíveis é vasto e é capaz de fornecer informações de detecção de atividades, informações fisiológicas sobre o usuário e do ambiente que o cerca (LING *et al.*, 2020). O desenvolvimento de dispositivos vestíveis tecnológicos em termos de interesse de mercado pode ser segmentados em: consumidores de eletrônicos (possuem interesses diversos como saúde, praticidade, moda ou entretenimento), clínico, industrial e militar.

Na área clínica os vestíveis tecnológicos estão sendo aplicados para diagnóstico, tratamento, reabilitação de doenças e monitoramento. Atualmente, a aplicação de dispositivos vestíveis tecnológico em ambientes clínicos ainda é muito limitada. Deve-se notar que as funções e aplicações potenciais desses dispositivos são baseadas mais em pesquisas acadêmicas do que em contextos clínicos reais. Portanto, o uso de vestíveis tecnológicos em campos clínicos ainda está em estágio muito inicial (XUE, 2019).

Os altos custos médicos somados a maior longevidade estão criando maior interesse e conscientização sobre os benefícios de monitorar os parâmetros fisiológicos no cotidiano e o seu progresso ao longo do tempo tem tornado os vestíveis tecnológicos mais populares. Segundo IDC (*International Data Corporation*) no ano de 2020 foram vendidas somente no Brasil um total de 1.394.857 pulseiras e relógios inteligentes, e para o primeiro trimestre de 2021 foram vendidas 651.721 unidades.

A disponibilidade de dados está criando importantes discussões na medicina, desde a forma de detectar doenças, com a compreensão das alterações ao longo do tempo, de forma a se criar diagnósticos e intervenções centrados no paciente de maneira mais personalizada.

A inserção de dispositivos vestíveis tecnológicos na área de esportes está criando uma nova forma de treinar. Os sensores aplicados no corpo permitem medir e estimar o desempenho ou eficiência dos movimentos. Usando essas técnicas, os praticantes obtêm retornos sobre tempo, postura e força para orientar no alcance da melhor precisão e desempenho mais consistente (DIAN *et al.* 2020).

Nos aspectos de monitoramento e segurança, os dispositivos vestíveis tecnológicos estão sendo inseridos para vigiar estados de fadiga e sonolência, detectar quedas e alertar sobre condições ambientais. Essas funções de segurança são especialmente úteis para o ambiente de trabalho em locais de trabalho perigosos e para pessoas idosas.

As técnicas de detecção de sonolência e fadiga, segundo Choudhary *et al.* (2016) podem ser agrupadas em cinco categorias de funcionamento: processamento de imagem, medição por eletroencefalograma (EEG), baseado em rede neural artificial, baseado em sensores do veículo e medidas subjetivas. As medições por EEG podem ser feitas com o uso de sensores nos capacetes e são as mais eficientes segundo o mesmo autor.

Para maior eficiência dos estados de fadiga e sonolência é mais assertivo no resultado quando se combina as técnicas de detecção. Os dispositivos vestíveis tecnológicos por meio da medição de parâmetros fisiológicos podem se somar a outros sinais indiretos e a partir disso realizar diagnósticos mais precisos.

A detecção de quedas utiliza-se de sensores inerciais como o giroscópio ou acelerômetro. Medições bruscas na postura corporal, velocidade da queda e velocidade angular detectam quedas e acionam de forma automática o resgate para o auxílio mandando uma mensagem pré-programada para um conhecido e sua localização.

No aspecto de mudanças ambientais, muitas delas podem ocorrer de forma rápida ou imperceptível. Os parâmetros possíveis de serem medidos pelos dispositivos vestíveis tecnológicos podem incluir temperatura, exposição a raios ultravioletas (UV) e a gases tóxicos. Ao fazer as medições e gerar alertas os usuários podem tomar ações e se salvar de danos à saúde. Dentro de um contexto temporal maior, as análises dos dados

ambientais podem sugerir ao usuário menor exposição ao sol, reforço do protetor solar e lembretes da hidratação.

O uso dos dispositivos vestíveis tecnológicos no meio militar visa abordar aspectos de realidade simulada e uso de exoesqueletos, além do aumento da segurança e monitoramento em ambientes perigosos, rastreamento, assistência, entrega de conteúdo. O uso de simulações 3D imersivas visa transportar o soldado para um ambiente controlado para treiná-lo sem, contudo, estar exposto aos riscos do campo de batalha. O uso de exoesqueletos está sendo desenvolvido com a finalidade de gerar uma força extra para carregar mais peso ou se deslocar mais rápido. Fora do meio militar o desenvolvimento de exoesqueleto visa reabilitar pacientes com lesões e fraturas.

Kong *et al.* (2018) utilizam-se do termo Sistema Vestível Industrial (IWS) e o definem como tecnologia de capacitação humana que se adapta às necessidades cognitivas e físicas dos operadores, enquanto melhora as capacidades físicas, sensoriais e cognitivas humanas usando a nova geração de informática industriais como tecnologias de micro sensores, tecnologia de comunicação sem fio e tecnologia de interfaces inteligentes homem-máquina. Tais sistemas podem criar nova conectividade e interação entre peças (produtos inteligentes), máquinas (máquinas inteligentes) e humanos que tornam os sistemas de produção mais enxutos, ágeis, rastreáveis e adaptáveis.

Os dispositivos vestíveis industriais possuem dois fluxos principais segundo Kong *et al.* (2019): dispositivo de coleta de dados e o dispositivo de interação humana que podem ser integrados ou não em um único dispositivo. A coleta de dados é realizada por meio de sensores e a interação humana vai se dar por meio de alertas sonoro, visuais ou de vibração do aparelho. Em algumas situações é importante que o dispositivo conheça a intenção humana de forma natural e para isso são utilizados recursos de inteligência artificial (IA) na interpretação de gestos ou desvios de olhares.

O dispositivo vestível industrial deve cumprir alguns requisitos como: garantir mãos livres dos operadores e não perturbar suas operações de forma desnecessária, devendo-se adaptar a diversos cenários de aplicação (KONG *et al.* 2019).

Os dispositivos, que são considerados como vestíveis industriais podem ser agrupados em cinco categorias dependendo da sua funcionalidade: monitoramento (fisiológico e ambiental), assistência (exoesqueletos), ampliação da visão (realidade virtual e aumentada),

rastreamento (localização) e entrega de conteúdo (informações de assistência). Os dispositivos podem estar em mais de uma categoria dependendo das combinações de funcionalidades (SVERTOKA, 2020).

4 METODOLOGIA

A pesquisa apresentada neste trabalho se caracteriza por um estudo de revisão bibliográfico descritivo e estruturado. Esta forma de pesquisa, segundo Sampaio e Mancini (2007), utiliza como fonte de dados a literatura sobre um determinado tema. Esse tipo de investigação disponibiliza um resumo das evidências relacionadas a uma estratégia de intervenção específica, mediante a aplicação de métodos explícitos e sistematizados de busca, apreciação crítica e síntese da informação selecionada.

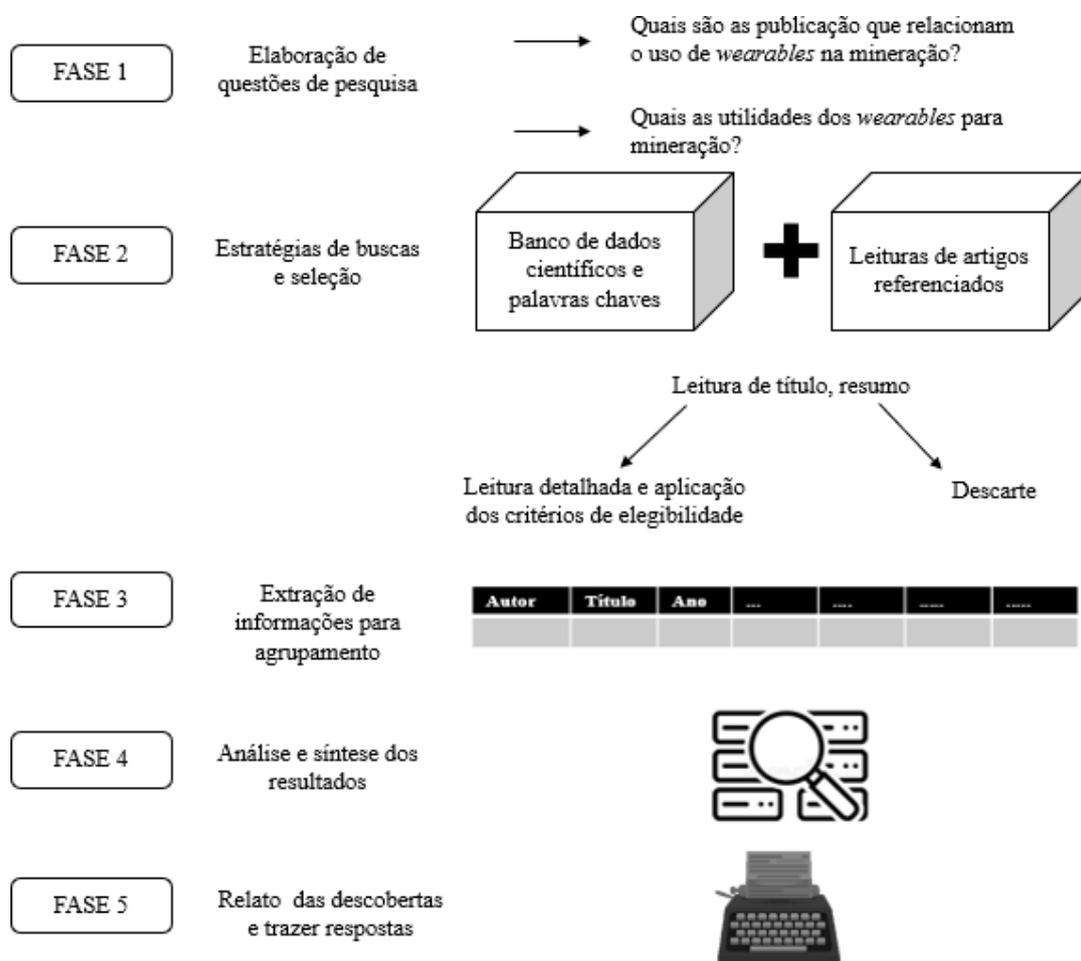
Segundo Kitchenham e Charters (2007) é preciso considerar ao menos três etapas em estudos de revisão: definir o objetivo da revisão, identificar a literatura e selecionar os estudos possíveis de serem incluídos. A elaboração de questões de pesquisas visa dar um direcionamento para conduzir a pesquisa de forma mais objetiva e prática. Para esta dissertação foram elaboradas as seguintes questões de pesquisas:

Q1 - Qual seria a utilidade dos vestíveis tecnológicos para a mineração?

Q2 – Quais são as publicações que relacionam o uso de vestíveis tecnológicos na mineração?

O protocolo de revisão de literatura seguido pode ser visto na figura 4 e foi baseado nos protocolos de revisão sugeridos por Sampaio e Mancini (2007). Buscou-se revisar o estado atual de conhecimento e desenvolvimento de dispositivos tecnológicos vestíveis para uso industrial por meio de buscas de palavras chaves e posteriormente por meio de artigos relacionados e por fim estreitar o foco para o setor da mineração.

Figura 4 - Estrutura do protocolo de revisão de literatura.



Fonte: próprio autor (2022).

Como plataforma de busca foram usados os seguintes bancos de dados de artigos científicos: Google Acadêmico na língua inglesa e portuguesa e o Portal de periódicos da Capes, somente na língua portuguesa. O Google Acadêmico é um banco de dados de grande abrangência multidisciplinar com grande capacidade de indexação de textos acadêmicos e atende às necessidades de pesquisa proposta.

Foi fixada uma delimitação de data para artigos a partir de 2016. Os lançamentos de relógios, pulseiras e óculos por parte das grandes empresas de tecnologia (Samsung, Apple e Google) se deram entre 2014 e 2015 e a partir daí atraíram o interesse de outras empresas para pesquisa para a área de vestíveis tecnológicos.

Os resultados de algumas palavras-chaves às vezes remetiam a enormes quantidades de resultados, então por exemplo no Google Acadêmico a busca pela combinação das palavras: *wearables and “mining industry”* resulta em mais de 1.000 ocorrências o que torna inviável se fazer uma análise e os resultados perdem o foco proposto depois de um certo número de resultados. Desta forma para uma análise mais assertiva, foi estabelecido um limite de inspeção e seleção dos 150 primeiros resultados de pesquisa com base no título e resumo para saber se atendiam ou não ao tema proposto mesmo que de forma suplementar. Em caso afirmativo o artigo foi lido em detalhes e se estivesse de acordo com o propósito da temática, seria cadastrado em planilha eletrônica. Foram analisados também os 30 primeiros resultados com base no ano de publicação do mais recente para o mais antigo para diminuir o efeito de relevância que os artigos poderiam alcançar ao longo dos anos.

Para ampliar a amostra de literatura e amenizar as deficiências que da busca por palavras-chaves em apenas dois buscadores, foi feita uma análise das referências relacionadas das publicações selecionadas. Estas não teriam cortes por ano. O quadro 01 traz as informações das palavras chaves usadas para a busca em banco de dados científico. Os usos de palavras-chaves em língua portuguesa não retomavam a resultados relevantes muitas das vezes ou outras vezes apontavam para artigos das áreas de saúde e educação física que estão fora do objetivo proposto.

A escolha de palavras-chaves partiu de uma temática ampla sobre dispositivos vestíveis industriais e depois foram verificadas publicações sobre cada dispositivo combinado com a área da mineração. As palavras-chaves e estrutura de consulta foram organizadas em função de regras exigidas dentro da plataforma selecionada.

Os seguintes critérios de elegibilidade para seleção dos artigos foram adotados:

- 1) artigos revisado por pares,
- 2) ano de publicação a partir de 2016 para pesquisa direta nos bancos de dados,
- 3) artigos que fizeram revisão ampla sobre vestíveis tecnológicos com diversos enfoques,
- 4) artigos experimentais com vestíveis tecnológicos para o setor industrial e mineral.

Quadro 01 – Apresentação das palavras-chave da pesquisa sobre vestíveis tecnológicos.

Palavras-chave amplas sobre o setor industrial e mineral	("wearables industrial"); (industrial wearables); (wearables and manufacturing); (wearables "mining industry") (Smart PPE); ("smart vest" industry)	(Vestíveis industriais); ("vestíveis tecnológicos" mineração); ("vestíveis tecnológicos" construção civil); (equipamentos de proteção individual inteligentes)
Palavras chave sobre dispositivos de pulso	("wrist wearables"industry"); ("wrist-wearable" manufacturing); ("wems wearables")	("dispositivos de pulso" indústria 4.0); ("pulseiras e relógios inteligentes")
Palavras chave sobre óculos de realidade virtual	("smart eyewear" industry 4.0); ("smart glass industry"); (smart glasses augmented reality industry)	("dispositivos de visão" indústria 4.0); ("óculos de realidade virtual" indústria); ("realidade aumentada" indústria); ("realidade virtual e mineração);
Palavras chave sobre capacetes inteligentes	("smart helmet" industry) ("smart helmet" mining)	("capacetes inteligentes" indústria); ("capacete tecnológico" indústria)

Fonte: próprio autor (2022).

No final da fase de levantamento bibliográfico foram gerados dois quadros anexos com a extração das informações obtidas dos artigos com todos os artigos lidos e relacionados com o tema dos dispositivos vestíveis tecnológicos na indústria e que também compõem as referências bibliográficas desta pesquisa.

O apêndice A, refere-se ao assunto mineração e vestíveis tecnológicos possui 5 campos, autor, ano, breve comentário, classificação em artigo experimental ou de revisão, tipo de dispositivo abordado e palavras-chaves.

O apêndice B, refere-se aos artigos encontrados que descrevem o estado da arte sobre dispositivos vestíveis tecnológicos de diversas formas e possui 5 campos, autor, ano, breve comentário, assunto que trata na descrição do estado da arte e palavras-chaves. Buscou-se identificar a esfera em que o artigo se encontra, se fora problema industrial ou dentro da área industrial. Caso tivesse dentro da esfera industrial foi observado se era possível identificar o tipo específico de área. Foi tentado extrair também a informação do tipo de dispositivo de que o artigo trata, se são dispositivos vestíveis tecnológicos de forma ampla ou de forma restrita

com a descrição do tipo de dispositivos como pulseiras, capacetes inteligentes, óculos de realidade virtual, colete, botas ou máscara.

Foram aplicados os seguintes critérios de exclusão:

- 1) Vestíveis industriais do tipo tecido. Não serão abrangidos por estarem ainda pouco desenvolvidos para experimentação industrial. Os tecidos precisam ser maleáveis, dobrados e lavados e para um sensor ter uma leitura confiável é necessário que esteja próximo ao corpo do usuário, de forma que a tecnologia ainda não consegue cumprir corretamente todas as necessidades de forma satisfatória.
- 2) Vestíveis para assistência corporal na forma de exoesqueleto robótico que ajudem os trabalhadores a controlar a postura para prevenir lesões ou para levantar objetos pesados.
- 3) Estudos não disponíveis em formato eletrônico não foram analisados.
- 4) Artigos com algumas restrições de acesso digital (ou seja, que não puderam ser recuperados digitalmente) não foram considerados.

5 RESULTADOS

Este tópico apresenta os resultados da análise dos artigos coletados e selecionados. Os subtópicos estão organizados por tipos de dispositivos industriais e complementa a revisão bibliográfica.

5.1 DISPOSITIVOS DE PULSO

Na área de pulseiras e relógios inteligentes a pesquisa de literatura apresenta apenas uma visão ampla sem se adentrar muito nas especificidades das aplicações industriais. Foram encontrados 2 artigos sobre o estado da arte: Al-Eidan *et al.* (2018) e Kamsalic *et al.* (2018), que oferecem uma ampla visão e boa introdução para entendimento desse dispositivo. Foi encontrado um artigo que trata especificamente sobre mineração e dispositivo de pulso: Sarkar *et al.* (2020).

Os dispositivos de pulso podem ser do tipo relógio ou pulseira e diferem pelas quantidades de funções e tamanho de tela, como na figura 5. Ambos possuem sensores de rastreamento passivo de atividades biomecânicas e biosensores. Os relógios inteligentes do tipo *smartwatch*, possuem boa aceitação e grande mercado junto aos esportistas e praticantes de atividades físicas que buscam registrar sua performance e realizar treinos baseado em métricas como zonas de batimento cardíaco ou marcação do trajeto e distância percorrida por exemplo para potencializar o desempenho almejado.

Figura 5 - Relógio inteligente e pulseira de monitoramento.



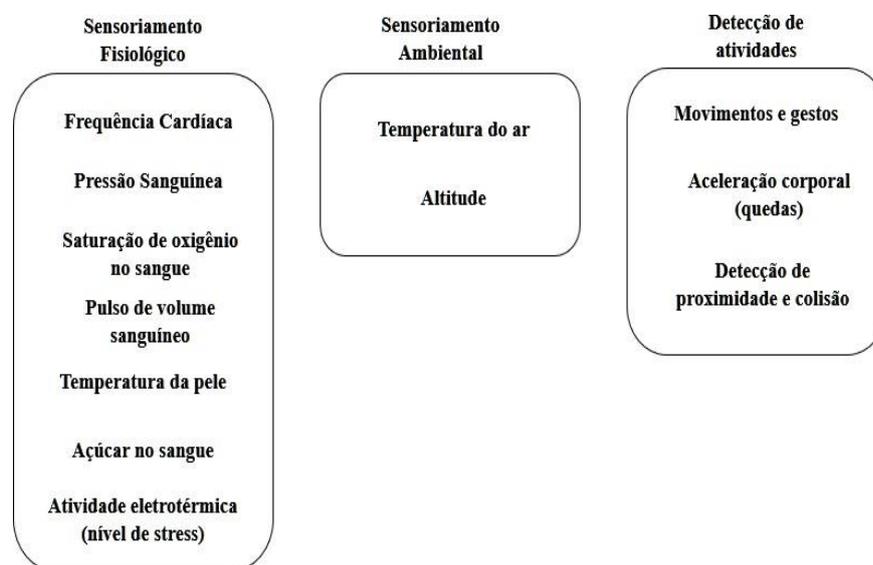
Fonte: <https://xiaomi-mi.com/>

Ambos os dispositivos têm alcançado a popularidade junto aos consumidores devido ao monitoramento contínuo automático de comportamentos como número de passos dados e, auxílio na ergonomia emitindo alertas de tempo sentado e com o monitoramento do sono. A exibição desses parâmetros permitiria ao usuário tentar melhorar os seus indicadores e também combater o sedentarismo já que se tem medição constante deles ao longo do tempo.

Outro ponto que contribuiu para a difusão do uso de pulseiras e relógios seria segundo Seneviratne *et al.* (2017), a substituição do relógio tradicional com a vantagem de se ter uma extensão do telefone celular permitindo realizar funções básicas como recebimento de notificações de aplicativos e mudar a música durante outra atividade sem precisar retirar o celular do bolso.

A versatilidade do dispositivo no pulso consiste na sua facilidade de agregar vários sensores de forma compacta para monitorar o indivíduo, o ambiente que o cerca e na detecção de atividade e ter uma tela de exibição de resultados. A figura 6 foi baseada em Kamsalic *et al.* (2018) e sintetiza os parâmetros que podem ser monitorados com um dispositivo preso ao pulso.

Figura 6 - Funções de sensoriamento e detecção que se pode realizar nos dispositivos de pulso.



Fonte: de Kamsalic *et al.* (2018).

Os mesmos autores fazem também uma classificação dos níveis de funcionalidades dos dispositivos de pulso que poderá ser estendida para outros dispositivos vestíveis tecnológicos:

Nível 1: Rastreia, captura e registra dados brutos sem compartilhar as informações com o usuário.

Nível 2: Além das funções do nível 1 exibe a saída do dado bruto por meio de uma tela ou comunica por meio de sons, luzes, vibração quando alcança um patamar desejado ou indesejado.

Nível 3: Gera informações inteligentes que foram processadas e derivadas das entradas que podem ser feitas por meio de formulação matemática, análise estatística ou mesmo modelos de aprendizado de máquina.

O sucesso e avanço na área de monitoramento fisiológico impulsiona pesquisas e desenvolvimento de novos produtos e sensores para uso no âmbito pessoal, já na seara do uso industrial não está clara ainda a utilidade e necessidade de fazer o monitoramento fisiológico de forma constante de um funcionário pois fica limitado por questões de privacidade, uso e segurança dos dados.

O monitoramento fisiológico do trabalho traz oportunidades com aspectos positivos e negativos que serão expostos em detalhes na seção da análise *SWOT*. Kamisalic *et al.* (2018) destacam que todos os dispositivos de pulso disponíveis dão atenção especial para o monitoramento contínuo da frequência cardíaca que pode levar a inúmeras análises de doenças e estresses.

No espectro de monitoramento fisiológico, Sarkar *et al.* (2020) desenvolveram e testaram no ambiente subterrâneo de uma mina de carvão um relógio inteligente que faz o monitoramento cardiorrespiratório e análise bioquímica do suor para observar indicadores de desempenho e estresse dos mineiros. O equipamento foi testado em diversos pontos e condições de trabalho, até mesmo em frentes de trabalho com excesso de umidade e poeira. Um dos resultados observados foi a sugestão de reduzir a jornada dos trabalhadores especializados, operadores de máquinas, de 8 para 6 horas. Após 6 horas de trabalho foi notado um aumento nos índices cardiorrespiratórios, ou seja, maior estresse e cansaço.

Os fabricantes continuam a desenvolver sensores e algoritmos com o intuito de gerar mais informação para os usuários, embora a velocidade de desenvolvimento esteja ligada com

a disposição, necessidade e interesse de adquirir produtos mais avançados e mais caros. Dentre as possibilidades de desenvolvimento de novas funções encontra-se o monitoramento da qualidade do ar. Esta função é especialmente interessante para a medicina e segurança do trabalho e teria grande utilidade para a mineração subterrânea no auxílio do monitoramento da qualidade do ar.

A qualidade do ar pode afetar a saúde humana, gera desconforto e reduz a produtividade. Entre os gases mais prejudiciais para a saúde humana pode-se citar a exposição a concentrações anormais de CO, CO₂, NO_x, SO_x que podem gerar e agravar doenças respiratórias. Os artigos que tratam de dispositivos de pulso quando abordam a questão do monitoramento da qualidade de ar estão concentrados na área de poluição no ambiente urbano. Quando há menção da questão industrial é feita de forma secundária.

Maag *et al.* (2018) frisam que os dispositivos vestíveis que ficam presos junto ao corpo precisam de ser filtrados das possíveis interferências que o corpo humano vai emitir como respiração, óleos naturais da pele e uso de cosméticos. Desta forma, os sensores de gás que necessitam ficar muito próximo ao corpo precisam ser mais seletivos o que pode interferir no preço com a instalação de sensores mais caros ou precisam passar por calibração de forma constante, o que os tornaria com baixo custo-benefício para usuário.

Segundo Forsyth *et al.* (2012) existem formas de associar a medição de saturação sanguínea de oxigênio com a contaminação de monóxido de carbono. Os sintomas iniciais de intoxicação por monóxido de carbono, como dor de cabeça, fadiga e dores musculares, podem ser facilmente descartados como sintomas da jornada de trabalho e não como indicadores do início da intoxicação.

Já existem alguns dispositivos no mercado que medem a saturação sanguínea no pulso. Quando se leva em conta o ambiente de trabalho não seria possível confiar na medição de um dispositivo de pulso. De acordo com Forsyth *et al.* (2012) a estrutura óssea do pulso é complexa, o que torna o local pouco estável para a retrodifusão da luz do sensor. Então segundo os autores um local mais adequado e confiável para a medição de saturação sanguínea de oxigênio poderia ser na testa com o dispositivo de medição na cinta de ajuste do capacete.

Os dispositivos de pulso para medir a qualidade do ar não estão suficientes maduros e testados para o mercado comum embora haja tentativas de protótipos em teste que estão

compilados pelos autores Al Mamun e Yuce (2019) que levantaram o estado da arte de dispositivos vestíveis para a área de qualidade de ar. Para uso dentro da área industrial seria exigido do equipamento ainda mais em termos de robustez e precisão para atender às regulamentações da medicina do trabalho.

Morawska *et al.* (2018) resumem bem a proposta do desenvolvimento de dispositivos vestíveis para o monitoramento da qualidade do ar de forma individualizada: o monitoramento do nível de exposição individual é importante para avaliar os impactos na saúde, estudos epidemiológicos e ciência cidadã para fazer ajustes em escala fina dos dados ambientais coletados por monitores fixos. O acompanhamento da qualidade do ar poderia ajudar o usuário a reduzir ou evitar alguns tipos de ambientes caso note que sua alergia ou problemas respiratórios foram agravados e relacionar este fato com os outros parâmetros medidos pelo dispositivo.

Os autores Al Mamun e Yuce (2019) e Morawska *et al.* (2018) abordam o monitoramento da qualidade do ar com vestíveis, mas não abordam de forma direta a questão industrial.

Outra dificuldade para o desenvolvimento de dispositivos de pulso no quesito de qualidade de ar para o ambiente industrial é o fato de se ter soluções mais simples, baratas e confiáveis para medição da qualidade do ar individualizada com a instalação de dispositivos no capacete ou na cintura.

O artigo de Choy *et al.* (2017) se encontra dentro da área industrial e investiga a intenção de adoção de pulseiras e coletes tecnológicos para o monitoramento fisiológico e localização dos trabalhadores de construção civil por meio dos aspectos de utilidade percebida, influência social e risco percebido de privacidade. Os autores destacam que os vestíveis tecnológicos apresentam muitos potenciais, mas é preciso que o trabalhador reconheça o valor do uso como algo que traga benefício para si também.

Alguns dos resultados apontados pelos citados autores: os trabalhadores apresentam uma resistência quanto ao acesso constante a sua localização já que seria um método indireto de inferir a sua ociosidade. A maioria dos participantes não tinha experiência com dispositivos vestíveis tecnológicos, então não estava claro quais as dificuldades, prazeres e benefícios que seu uso traria, o que os torna mais difícil de aceitar e perceber a sua utilidade. O estudo foi limitado a 3 estados norte-americanos, foram amostrados apenas trabalhadores que estavam

executando projetos de reformas. Para um estudo mais completo e generalizável seria recomendável ampliar para outros tipos de projetos como pontes, rodovias, túneis etc.

5.2. CAPACETES INTELIGENTES

O capacete é um item comum e obrigatório em ambientes de trabalho e por ter essa característica foi a área em que mais se encontraram artigos. No total foram 37. A maior parte da amostra de literatura encontrada é composta pela descrição do desenvolvimento de protótipos de capacetes inteligentes com o uso de módulos do Arduino. Os artigos frisam a questão do baixo custo e revelam alguns detalhes da sua arquitetura e de seu funcionamento com testes em sua maioria de laboratório com ambientes controlados. De uma forma geral os artigos pendem mais para a interface eletrônica do que para a área de mineração.

Alguns artigos pesquisados possuem o campo de aplicação na construção civil, mas dada a similaridade de algumas situações e ambientes poderiam ser empregados também dentro da mineração sem necessidades de grandes adaptações. A busca de palavras-chave não adentrou para a área de construção como de escavações geotécnicas e movimentação de equipamentos, mas existem pesquisas com foco na resolução desses problemas.

É sabido que a mineração a céu aberto apresenta uma série de facilidades com relação à estrutura de supervisão, localização e comunicação. Então o foco dos artigos é a busca por soluções focadas no ambiente de mineração subterrânea e de forma especial tratam das minas de carvão. As minas de carvão costumam empregar um número alto de trabalhadores e por suas características geológicas estão mais propensas à emanção de gases e colapso de teto. Choi e Kim (2021) apontam o avanço de regulamentos de segurança em muitos países

Outro ponto em questão levantado por Choi e Kim (2021) é o avanço de regulamentos de segurança em muitos países. Então espera-se uma crescente adoção de tecnologia vestível, incluindo capacetes inteligentes, que impulsiona a demanda por segurança pessoal.

Os projetos de capacetes inteligentes podem contemplar sensores ambientais e fisiológicos. Todos os projetos abordam questões como comunicação constante, medição de temperatura e umidade, detecção de gases tóxicos com grande potencial para a ventilação,

como em Santos (2020). Módulos de Arduíno podem ser acrescentados para colocar sensor de uso no capacete, detecção de golpes na cabeça com sensores micro eletromecânicos (MEMS) e alertas de proximidade de veículos.

Um subtema dentro da área de capacetes é a preocupação de se resolver problemas de comunicação e transmissão dos dados. A comunicação com uma sala de controle é necessária para monitorar os trabalhadores e acionamento de eventual resgate. Um desabamento de teto pode deixar os mineiros isolados e danificar parte da rede sem fio. Dessa forma alguns autores como Deokar e Wakode (2017), Harshitha *et al.* (2018) e Ghadyani, Daniyal *et al.* (2021) buscam propor a solução da questão da transmissão e comunicação dos dados com simulações de colapso parcial de parte da rede sem fio e na outra extremidade estaria um trabalhador usando um capacete inteligente.

Segundo Deokar e Wakode (2017) existem 3 tipos de transmissão sem fio: *Bluetooth*, *Wi-Fi* e *Zigbee*. O *Wi-fi* possui cabos de roteamento e colapsos nos cabos interrompem a comunicação, o *bluetooth* possui uma distância de cobertura de curta distância, já com a rede do tipo *Zigbee* consegue-se criar uma rede multipontos e bidirecional para transmissão em maiores distâncias.

Ghadyani *et al.* (2021) realizaram experimentos práticos com um capacete com módulos de sensoriamento ambiental dentro de uma mina de carvão na cidade de Tabas no Irã para confirmar a validade da transmissão de dados em caso de danos na rede que culminaram em resultados bem-sucedidos. Os autores relatam que o ambiente subterrâneo possui complexidades e a transmissão em linha reta utilizando redes *Zigbee* pode alcançar até 430 metros, mas devido às limitações da mina como curvaturas e inclinações, a transmissão dos dados pode cair para 190 metros. Então um alarme é ativado para o trabalhador e para a sala de controle quando excede os limites de alcance para resolver o problema da falta de cobertura de rede.

Outra situação que o capacete inteligente pode antecipar e aumentar mais a segurança seria por meio do alerta do risco de colisão. Segundo Baek e Choi (2018) as colisões entre equipamentos e trabalhadores ocorrem com frequência dentro de túneis e galerias devido à visibilidade limitada aliada ao ambiente de trabalho confinado. Segundo Jobes *et al.* (2012) o uso de máquinas operadas por controle remoto faz com que o trabalhador tenha a tendência de

se posicionar ao lado da máquina para melhor visão e isto pode colocá-lo em pontos de risco de esmagamento ou de atropelamento por tráfego de outros veículos.

Os sistemas de alerta de proximidade podem ser baseados em diferentes tecnologias como radiofrequência (RFID), campo magnético e tecnologia *Bluetooth*. Segundo Park *et al.* (2016) os sistemas RFID e de campo magnético estão disponíveis comercialmente para uso industrial. O *Bluetooth* também está se mostrando muito competitivo pois é a prova de intempéries, têm longa vida útil de bateria, é barato exige menor infraestrutura e tempo para calibração. Os autores concluem em testes comparativos das tecnologias que o sistema *Bluetooth* registrou 2 alertas falsos e o RFID 4, já o sistema de campo magnético teve sucesso nas 20 tentativas embora a distância de alerta tenha sido menor do que os outros sistemas, o que pode não ser uma distância suficiente para tomar medidas adequadas.

O sistema de alerta de proximidade precisa enviar sinais por meio de formas visuais (LED), audíveis ou de vibração. Baek e Choi (2018) apontam que a vibração e constante ruído em locais de construção e mineração trazem dificuldades para os trabalhadores reconhecerem facilmente as advertências por sons ou vibrações. Uma alternativa é o uso de diferentes tipos de alarmes combinados para se ter maior eficiência.

Na área de monitoramento fisiológico a pesquisa remeteu a uma cobertura científica menor e foram encontrados 4 artigos na área. É importante ressaltar que o monitoramento fisiológico é sempre complementado pelos monitoramentos ambientais descritos anteriormente como qualidade do ar e comunicação constante. Os problemas de se colocar muitos sensores no capacete é aumentar o seu custo, trazer desconforto com a alteração do seu ponto de equilíbrio e trazer incômodos com seu peso. Outro ponto é que a medição de parâmetros fisiológicos para ser visualizada pelo trabalhador necessitaria de um display no pulso ou com consulta por meio do celular o que pode se torna pouco viável para a área operacional.

Forsyth *et al.* (2012) adaptaram um oxímetro de pulso dentro de um capacete com a medição sendo feita na testa para avaliar a exposição ao monóxido de carbono. Autores realizaram um teste com 10 participantes expostos em um ambiente controlado e o sistema proposto foi capaz de alertar os participantes de forma antecipada em 99% dos testes. O estudo faz a ressalva de que nos testes de movimentação da cabeça para frente e para os lados

como se acenasse um “sim” ou “não”, induziram erros e tornaram-se inutilizáveis algumas medições. Algumas outras modificações, adaptações e estudos teriam que ser realizados, mas o estudo preliminar mostrou uma boa viabilidade de medição na cabeça por meio de sensores de oxímetro na testa.

O artigo de Li Xian *et al.* (2018) traz experimentos de com um sistema vestível para monitorar a consciência situacional, que é um processo cognitivo que envolve a percepção do ambiente, compreensão e projeção dos eventos futuros. Ambientes extremos como situações da mineração subterrânea podem afetar a consciência situacional afetando-a e podendo ocasionar acidentes. No capacete proposto existem sensores que monitoram os movimentos dos olhos e no dedo há um sensor para fazer o eletrocardiograma (ECG). A partir dos dados brutos é possível estimar indicadores secundários de consciência situacional. O experimento de validação foi conduzido numa mina subterrânea histórica na Groenlândia, a Adventure Mine. O artigo não aborda pontos como custo, falhas na estimativa de consciência situacional e as implicações positivas e negativas do sistema vestível.

Outra possibilidade dentro do uso de capacetes inteligentes é a realização de medições de atividade elétrica cerebral ou encefalograma (EEG). Lu Huimin *et al.* (2018) propõem um capacete com eletrodos para análise de atividade elétrica cerebral e por meio disso a identificação de emoções como ansiedade, fadiga, concentração e estresses dentro de ambientes extremos como o de mineração subterrânea. Foi realizado um teste de identificação de emoções em um laboratório com 25 estudantes na identificação das emoções. O artigo não explicita se o monitoramento seria constante ou se seria feito por um período de tempo específico para levar a novas descobertas científicas e não faz estimava de custos.

Outro artigo que está relacionado com a identificação de emoções é do Wang *et al.* (2018) que mostra dispositivo que se utiliza também da técnica de EEG. Foi mencionada a questão do ambiente de mineração subterrâneo e mudanças para estados emocionais de ansiedade, fadiga, concentração combinados com parâmetros ambientais, mas também é pouco preciso quanto a praticidade e aplicabilidade dentro do ambiente produtivo da mineração.

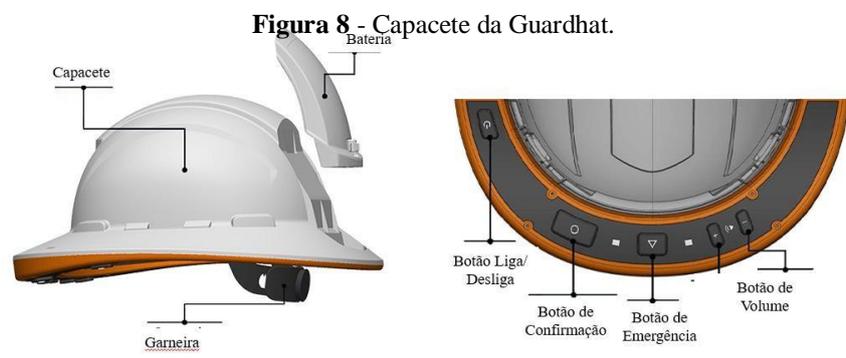
Um protótipo que se encontra em fase de projeto piloto com testes mais duradouros em campo é o capacete, *Smart Helmet Clip*, desenvolvido pela Deloitte Werables em parceria com as outras duas empresas Cortex Design e Vandrico, (vide figura 7). Segundo informações da Vandrico o dispositivo contém sensores para níveis de gases CO, CO₂, CH₄, NO_x, acelerômetros, giroscópio, bússola, termômetro, umidade, temperatura, magnetrômetro (instrumento usado para medir a intensidade direção e sentido de campos magnéticos), GPS e câmera fotográfica. Com essa grande quantidade de sensores firma-se que o capacete é capaz de detectar quedas, localização (interna e externa), consciência situacional, monitoramento da saúde e do ambiente.

Figura 7 - Capacete *Smart Helmet Clip* e detalhes dos seus sensores.



Fonte: <https://cortex-design.com/work/deloitte/>

Um capacete inteligente e que já se encontra disponível para uso industrial é o capacete da Guardhat. O dispositivo tem as mesmas funções que o capacete da Deloitte com exceção da detecção dos níveis de gases no ambiente. O capacete possui versões mais simples como mostrado na figura 8, e possui opcionais que podem deixar o capacete mais caro e sofisticado como a incorporação de câmeras de vídeo.



Fonte: <https://cortex-design.com/work/deloitte/>

O desenvolvimento de um capacete inteligente poderá gerar muitas vantagens para o setor produtivo. Choi e Kim (2021) ressaltam as seguintes vantagens desse equipamento.

- O capacete inteligente tem se mostrado nas pesquisas como um dispositivo vestível confiável e com baixo custo de desenvolvimento e operação.
- O dispositivo pode contribuir para melhorar a segurança de motociclistas e trabalhadores, detectando imediatamente acidentes e apoiando solicitações de resgate em situações de emergência.
- É altamente expansível e pode ser usado em outras aplicações adicionando ou removendo sensores conforme necessário.
- Os dados podem ser adquiridos em tempo real e a partir de sensores acoplados ao capacete e transmitidos para um servidor em nuvem para análise com processamento mais complexo.

Dentro das limitações que o desenvolvimento dos capacetes inteligentes enfrenta os mesmos autores destacam:

- O uso de alguns sensores, como câmeras e sistemas de posicionamento global e medições fisiológicas, possui elementos potenciais de invasão de privacidade.
- Capacetes inteligentes usam principalmente sensores leves e baratos, é preciso verificar se existe a possibilidade de o sensor apresentar mau funcionamento com frequência ou da ocorrência de alarmes falsos.
- Vários sensores podem ser acoplados a capacetes inteligentes, conforme sendo necessário; no entanto, isso pode aumentar o peso do capacete e torná-lo desconfortável de usar. Além disso, conectar uma bateria grande para alimentar um capacete inteligente aumenta a carga e pode ser perigoso para os seres humanos.

5.3 DISPOSITIVOS DE VISÃO

Os vestíveis tecnológicos de visão consistem em óculos especiais (*smartglasses*) ou monitores montados na cabeça (HMDs) como mostra a figura 9. Existem também dispositivos de mão como o *Hand-Held Display* (HHD) que são dispositivos que os usuários devem segurar em suas mãos para gerarem uma Realidade Aumentada (R.A.) do ambiente.

Figura 9 - Exemplos de dispositivos de visão para Realidade Virtual e Realidade Aumentada.



Fonte: Amazon.com, 2022 (modificado).

Outros dispositivos de visão não possuem mobilidade, mas mantêm a premissa de aumentar a percepção da visão auxiliando na interpretação de informações complexas e em treinamentos e simulações. Nessa categoria entram monitores óticos (OHMDs), monitores *heads-up* (HUDs), *display* espaciais (SD) e cavernas digitais (*Cave Automatic Virtual Environment*) que consistem em salas portadas de monitores de tela grande estacionários, nos quais as imagens são projetadas (D'ANGELO, 2018).

Os desenvolvimentos de dispositivos eletrônicos de visão não são recentes e remonta há várias décadas com a criação de capacetes de visualização. Entre os pioneiros no desenvolvimento de dispositivos de realidade aumentada pode-se citar o uso de capacetes em 1981 pela Força Aérea americana para simular o *cockpit* de avião com informações sobre o avião e os armamentos sobrepostas em um visor de acrílico (SILVA *et al.* 2011).

Entre as décadas de 1990 e 2000 foram lançados alguns dispositivos de visão de R.V. e R.A. para o setor industrial, mas segundo Regenbrecht *et al.* (2005) e Baumann (2013, *apud* Evers, Maren *et al.* (2018)), a ergonomia, preço, conforto e os erros na apresentação de imagens ficavam aquém das demandas do trabalho industrial.

O entusiasmo com a tecnologia de R.V. e R.A. só voltaria a ter uma perspectiva mais animadora e centrada na massificação com o lançamento do *Google Glass* em 2013. Outras empresas consideradas gigantes da tecnologia têm buscado também o desenvolvimento de produtos similares de R.V. e R.A. e incentivado o desenvolvimento de aplicação além do

campo de entretenimento, entre elas pode-se citar a Microsoft com o HoloLens e a Epson com BT-200.

As tecnologias de R.V. e R.A. buscam apresentar conteúdos virtuais aos usuários, porém se diferem na metodologia utilizada para expor os conteúdos. A realidade virtual promove a imersão completa do usuário em um mundo virtual, cercado por objetos e informações virtuais na sua representação gráfica em 3D para ajudar a criar as sensações de realidade. Os objetos podem conter animações e comportamentos, autônomos ou disparados por eventos predeterminados (D'ANGELO, 2018).

Já a realidade aumentada provê a sobreposição do mundo virtual ao mundo real com o intuito de aumentar a percepção humana do ambiente circundante. O usuário pode visualizar objetos ou informações virtuais geradas por computador e, ao mesmo tempo, pode visualizar o mundo real. Idealmente, o usuário pode interagir com esses objetos e informações virtuais. Além disso, esses objetos também devem ser posicionados e renderizados corretamente de forma que não fiquem inconsistentes com o mundo real, segundo Angrisani *et al.* (2019) e D'Ângelo, (2018).

As utilidades da R.V. e R.A. são muitas principalmente dentro da proposição de um ambiente de sistema Industrial 4.0 com aplicações que incluem inspeção remota, visualização de informações, gravação de ações, repasse de instruções, detecção de imagens, medição de distâncias, temperaturas e detecção de fadiga ocular. Outra possibilidade dentro dos dispositivos de visão é o uso de lentes de contato inteligentes, mas segundo Wang e Hsieh (2018) as patentes tecnológicas de lentes estão com o seu desenvolvimento mais direcionados para a área de saúde com a detecção eletroquímica de parâmetros fisiológicos.

Turner *et al.* (2020) chamam a atenção que a maior parte dos dados é capturado e representado na forma 2D. Com a crescente digitalização e poder de processamento de dados é possível criar um gêmeo digital que capturaria informações em tempo real e daria possibilidade para o usuário criar e testar hipóteses antes da implementação real. O mesmo autor destaca que a realidade aumentada pode comunicar aos usuários informações complexas multimodais provenientes de vários sensores e fontes e também pode permitir a um trabalhador documentar, monitorar atividades de campo e marcar informações importantes para que um gêmeo digital execute de forma inteligente a geração e análise de hipóteses *off-line*.

Os modos de interação em ambientes virtuais podem ser imersivos ou não. Quando a experiência é não-imersiva utiliza-se um monitor ou projeção, transportando parcialmente o usuário ao ambiente virtual, exigindo deste uma parcela de imaginação para a interação com o sistema (BONATO, 2015). Quando as experiências são imersivas segundo o mesmo autor podem ser agrupadas em:

- passivas: proporcionam ao usuário uma exploração do ambiente de maneira automática e sem interferência, onde a rota e os pontos de observação são explícitos e controlados exclusivamente pelo *software*, sem que o usuário tenha algum controle, exceto talvez para sair da sessão;
- exploratórias: proporcionam uma exploração do ambiente dirigida pelo usuário, que permitem ao participante escolher a rota e os pontos de observação, porém, sem interagir de outra forma com os objetos contidos na cena.
- interativas: - proporcionam uma exploração do ambiente dirigida pelo usuário e utilizam-se dispositivos que capturam os seus movimentos e comportamentos e provocam reações virtuais promovendo ações de modo a obter respostas das entidades virtuais do ambiente.

Realidade virtual se compõe de excelentes ferramentas para treinamento, educação, simulação de condições anormais e perigosas em minas e solução de problemas complexos, podendo-se reconstruir acidentes, criar aplicativos de simulação, analisar riscos e conscientizar sobre perigos e treinamentos (KIZIL *et al.* 2003).

O ambiente da mineração, dadas suas características possui várias situações como equipamentos grandes e caros, em que melhorias de operação podem ser observadas e treinadas em simuladores de equipamentos. Particularmente, nas minas subterrâneas o treinamento com operadores deve ser especialmente intencionado devido às características de espaços confinados e com perspectiva de antecipar e prevenir situações como colisões e quedas de blocos.

Segundo Komatsu (2022) é possível realizar treinos em máquinas virtuais (vide figura 10), em grupos ou de forma colaborativa entre diferentes equipamentos. O instrutor pode analisar, fazer comentários e programar cenários e tarefas personalizados para aumentar a habilidade do operador ou reduzir o tempo de execução dos ciclos.

Figura 10 - Simulador máquinas da Komatsu com a utilização de óculos de R.V.



Fonte: <https://www.komatsuforest.com.br>

O uso de R.V. se encontra bem consolidado na indústria petrolífera que conseguiu reduzir custos e viabilizar novas áreas de exploração. Russo *et al.* (2004) relatam que no final da década de 90 os patamares de preço de venda atingidos pelo barril de petróleo estavam muito baixos, então iniciou-se a busca pela redução de custos na cadeia de exploração e desenvolvimento de novos campos.

Durante a fase de exploração a perfuração pode consumir até 85% do custo total. Por isso, a decisão de perfurar um poço deve ser tomada baseada em estudos que forneçam um conhecimento detalhado das condições geológicas da área, sendo um furo mal planejado muito custoso. Dentre esses estudos, o método sísmico é o mais decisivo e, os especialistas precisavam ser capazes de criar um modelo tridimensional de forma mental sobre a espessura, constituição e profundidade das camadas de rocha usando seus conhecimentos e imaginações para desenharem modelos mentais e se sentirem imersos no reservatório. Esse processo levava tempo e dificultava as discussões e entendimentos sobre os campos de petróleo.

A adoção de R.V., com as telas de projeção, dispositivos de interação virtual e com os dados geoespaciais em uma única plataforma permitiu organizar diferentes mapas temáticos e visualizá-los de forma precisa para análises geométricas e volumétricas. Com isso o trabalho se tornou mais simples, dinâmico e preciso (BONATO, 2015).

Com o tempo os usos da R.V. passaram para outros elos da indústria petrolífera como nos projetos e construções das plataformas e na área de produção. As plataformas de petróleo são estruturas complexas e com a sua projeção virtual pode-se verificar a disposição e

localização dos diversos equipamentos e espaços projetados verificando as inconsistências que podem ter passado despercebidas (Almeida & Lara, 1991 *apud* Bonato, 2015).

Na área da produção as plantas de processamento de petróleo devem possuir flexibilidade de processo para se adequarem a diferentes tipos de produtos conforme o mercado e tipos de produtos demandados. Russo *et al.* (2004) destacam que é necessário um modelo atualizado da planta englobando todas as alterações feitas para treinamentos de emergência, manutenção que podem ser realizados por meio de RV.

A Realidade Aumentada vem sendo aplicada com sucesso para realizar verificações de montagem na indústria automotiva, como exemplo pode-se citar a Skoda Auto. Como compilado por Kong *et al.* (2019) o uso de óculos de R.A. permite inspecionar e relatar irregularidades por meio da gravação de voz e gestos e desta forma elimina os *checklists* de montagem final em papel e reduz a geração de informações irrelevantes e redundantes. Outros benefícios colhidos com essa tecnologia é a diminuição do tempo de treinamento e a criação de listas de verificações dinâmicas. O uso da tecnologia em R.A., embora ainda seja um pouco restrito pode ser extrapolado para outros setores que demandam checagem de inspeção e monitoramento de produtos e processos, inclusive dentro da mineração.

Dentro do contexto específico da mineração os autores Baek e Choi (2020) desenvolveram um protótipo de óculos inteligente para a segurança de pedestres em locais de construção e mineração e realizou testes em um túnel rodoviário e em uma área de mina. No desenvolvimento do sistema de alerta de colisão os equipamentos móveis foram dotados de sinalizadores *bluetooth* que transmitem sinais visuais para os óculos. Quanto maior a proximidade do equipamento, maior a intensidade do sinal visual.

A vantagem de usar alerta visual seria que alertas sonoros ou por vibração poderiam passar despercebidos em ambientes de construção ou mineração. Outra possibilidade explorada pelos autores foi o alerta de aproximação de áreas proibidas ou perigosas. Um ponto não observado pelos autores é que o uso de R.A. limita o campo de visão e pode trazer outras implicações como tropeços e tonturas durante o seu uso.

Uma nova possibilidade de entrada para uso de óculos de visualização de R.V. e R.A. na mineração pode-se dar com o uso de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) de inspeção e o monitoramento de áreas e instalações. Os VANT's possuem campos de aplicação cada vez mais diversificados, como mineração, topografia, geologia, ecologia, manutenção entre outras

com o emprego de diversos sensores digitais portáteis (vide figura 11) que permitem tirar proveito da facilidade de geração de imagens de alta resolução que podem ser usadas para produzir modelos fotogramétricos de alta resolução e a partir disso gerar laudos e cálculos topográficos.

Figura 11 - Exemplos de miniaturas de sensores que podem ser usados em drone. (a) Sensor infravermelho (b) Sensor ultrassônico (c) Câmera RGB (d) Câmeras estéreo (e) Sensores de telêmetros a *laser* (f) Radar UWB (g) Sensor hiperspectral (h) Sensores magnéticos (i)



Fonte: Shahmoradi, *et al.* (2020).

Os VANT's industriais junto com dispositivos de visão FPV (*First Person Vision*) (vide figura 12), proporcionam voos imersivos e permitem manobras com maior controle e precisão que seriam mais complicadas de se fazer em uma operação de voo tradicional, Então as aplicações industriais relacionadas com o uso de drones poderiam alcançar um novo patamar de experiência e inspeção inclusive com a operação mais segura e confiável dentro de ambientes confinados como ocorre na mineração subterrânea.

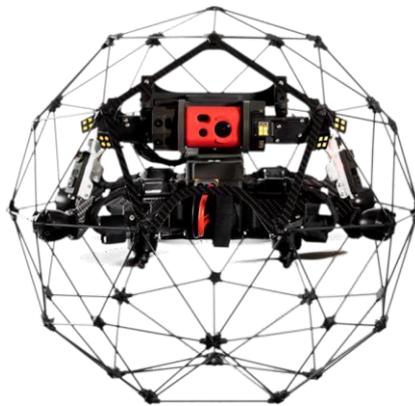
Figura 12 -VANT operado em conjunto com óculos R.A.



Fonte: <https://store.dji.com/guides/fpv-drones>

Recentemente o problema de estabilização e navegação de drones em ambientes de GNSS (Sistema Global de Navegação de Satélite) negado tem sido contornado com o emprego de armaduras de proteção para proteger o equipamento das quedas e colisões (figura 13), ou com o uso de sistemas de Algoritmos de Localização e Mapeamento Simultâneo (SLAM), que geralmente funcionam com um *scanner a laser* para construir uma nuvem de pontos do ambiente e dos obstáculos circundantes ao mesmo tempo em que identifica a posição do veículo dentro da nuvem de pontos.

Figura 13 - Drone industrial com armadura para inspeções em espaços confinados.



Fonte: <https://www.flyability.com/elios-2>

A flexibilidade de operação de drones no ambiente subterrâneo é restrita se comparada ao uso de drones a céu aberto. Existem muitos desafios para operá-los e coletar imagens de alta qualidade em ambientes subterrâneos, incluindo pouca iluminação e visibilidade, poeira, água, espaços confinados e turbulências do ar (AZHARI *et al.*, 2017; BECKER, 2019; PRESTON e ROY, 2017; RAJ, 2019).

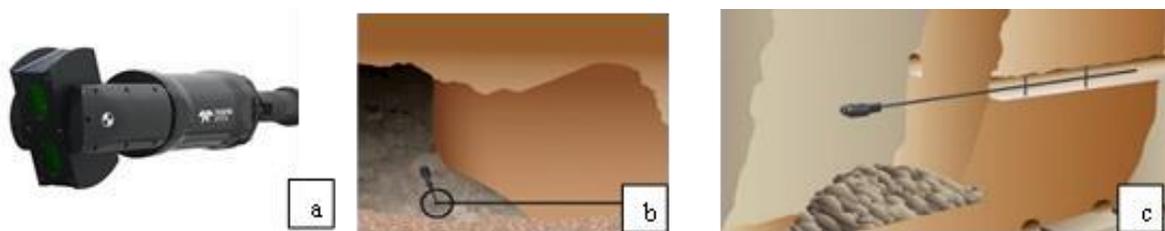
O levantamento de cavidades é realizado rotineiramente em minas subterrâneas por vários motivos incluindo inspeção de rocha escavada, medições de massa, monitoramento da geometria da cavidade, suas características geológicas e identificação de condições de rochas perigosas. Essas cavidades que são numerosas incluem realces, passagens de minérios e outras aberturas subterrâneas (AHMED *et al.*, 2017; AZHARI *et al.*, 2017; BECKER, 2019; RAJ, 2019).

Alguns procedimentos e técnicas estão sendo testados para serem aplicados com drones. O padrão de voo necessário para coletar dados de fotogrametria é diferente do padrão de voo que seria usado para explorar de forma autônoma uma abertura inacessível. A

qualidade dos dados de fotogrametria coletados também depende da capacidade do piloto de compreender e voar em um padrão favorável à modelagem fotogramétrica, havendo uma curva de aprendizado específica para área de fotogrametria, (BECKER, 2019).

O método tradicional de medição de uma abertura subterrânea é mostrado na figura 14, o método é conhecido pela sigla CMS (Sistema de Monitoramento de Caverna) e a metodologia apresenta alguns pontos de sombra no qual o laser não consegue obter leituras devido a posição ou distância.

Figura 14 (a) Laser de monitoramento de cavidades. (b) e (c) - Equipamento em operação de leitura.

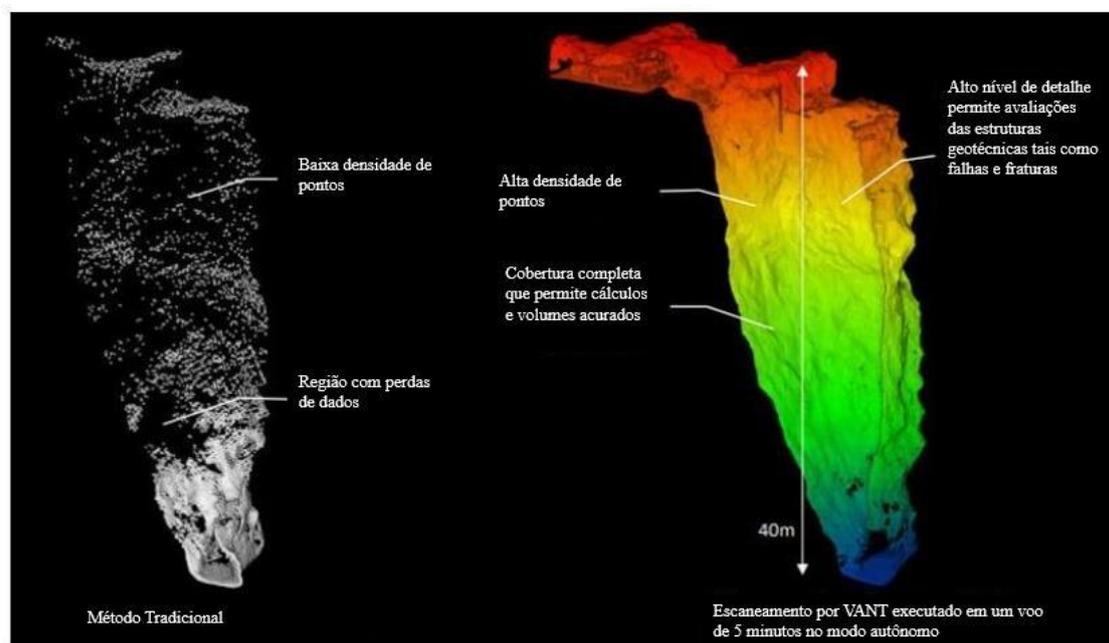


Fonte: adaptado de: www.teledyneoptech.com

A varredura móvel baseada em drone leva poucos minutos e envolve o voo para dentro e para fora do realce com o *scanner* em execução no modo de voo SLAM. A densidade da nuvem de pontos com o drone é maior, mais uniforme e sem pontos de sombras como mostrado na figura 15.

Dentro dessa linha de VANT's e dispositivos de visão, na interface mineração e manutenção pode-se citar o trabalho de D'Ângelo (2018) que desenvolveu um dispositivo de visão de baixo custo para tele inspeção de correias transportadoras de uma mineradora. As instalações de correia transportadora ficam em muitas das vezes em lugares insalubres com exposição ao ruído e poeira. Os óculos de R.A. desenvolvidos ficam em contato permanente com o VANT de inspeção e exibem as imagens com informações sobre a coordenada do ponto de inspeção, orientação e temperatura dos roletes de suporte da correia transportadora. Desta forma é possível fazer inspeções de forma mais segura.

Figura 15 - Comparação de um mesmo realce medido com o método tradicional de CMS (esquerda) e o escaneamento com sensor montado no drone à direita



Fonte: Ahmed *et al.* (2017).

5.4. OUTROS TIPOS DE DISPOSITIVOS

Este subitem faz considerações sobre dispositivos vestíveis tecnológicos colhidos durante as pesquisas de palavras-chave de forma ampla, ou seja, não foram aprofundadas pesquisas que adentrassem nestes dispositivos de forma mais específica. Entre os dispositivos que não foram cobertos em aprofundamento estão pequenos aparelhos que possuem sensores miniaturizados e podem ser presos ou incorporados em cintos, braçadeiras, botas, crachás, joias e coletes, e não foram aprofundados por diferentes razões explicitadas a seguir.

Os equipamentos de proteção individual inteligentes, ou seja, dotados de tecnologia de sensoriamento fisiológico ou ambiental estão em muitas das vezes descritos com palavras-chave que estão mais voltadas para o campo de IoT ou para desenvolvimento ou teste de pequenos sensores, tornando difícil a cobertura de pesquisa de literatura pois o foco dessa pesquisa é dispositivo vestível tecnológico e se o autor não explicitar que se trata de um disso será mais difícil de encontrar o artigo.

Outra razão pelo não aprofundamento de alguns dispositivos é que o seu desenvolvimento pode ter sido projetado para serem versáteis, e não se encaixam dentro de

um campo específico de equipamento de proteção individual inteligente e podem ser acoplados em um cinto, capacete ou presos na roupa.

Um exemplo de acessório versátil é mostrado na figura 16 e pode ser preso na roupa ou no cinto. O dispositivo foi desenvolvido para realizar medições individualizadas das condições de ar nas galerias subterrâneas e foi testado em uma mina do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais por Santos (2020) e obteve bons resultados. Esse dispositivo vestível foi desenvolvido com foco no baixo custo com placa do sistema Arduino. As informações coletadas são transmitidas para uma sala de controle de forma contínua e visam auxiliar o processo de tomada de decisão e reforçar a segurança com alertas de iluminação em caso de detecção.

O colete é outra vestimenta que pode ser multifunção. O colete mencionado aqui está no contexto de servir como suporte para um equipamento de medição, suas baterias ou acessórios de alerta como um pequeno alto falante ou luzes de atenção. Os bolsos em um colete podem ter tamanhos variados o que facilitaria a carregamento de sensores e permitiria que o trabalhador tenha as mãos livres para caminhar ou executar tarefas e o peso do equipamento fica distribuído sobre os ombros.

Figura 16 - Dispositivo vestível de medição de qualidade do ar em minas subterrâneas.



Fonte: Santos (2020).

Um exemplo de protótipo de colete com essas características é o da Elokon mostrado na figura 17. O colete foi projetado para a área de logística e visa prevenir riscos de colisão entre empilhadeiras de pátio (ou armazéns), e pedestres quando estão próximos entre si. Quando o operador está próximo demais da empilhadeira de pátios é emitido um sinal sonoro e é enviado um sinal para que a empilhadeira reduza a sua velocidade. Entre outras possibilidades do colete além da prevenção de colisão, segundo o desenvolvedor estão:

- sensor de inatividade e imobilidade que pode indicar um possível acidente ou de que o colete não está sendo usado;
- botão de alarme de ajuda;
- incorporação de tiras de led para melhor visibilidade;
- elementos de vibração para gerar percepções tácticas de alertas.
- sensores de detecção de gases.

Figura 17 - Colete multifunção da Elokon para uso em áreas de galpões logísticos.

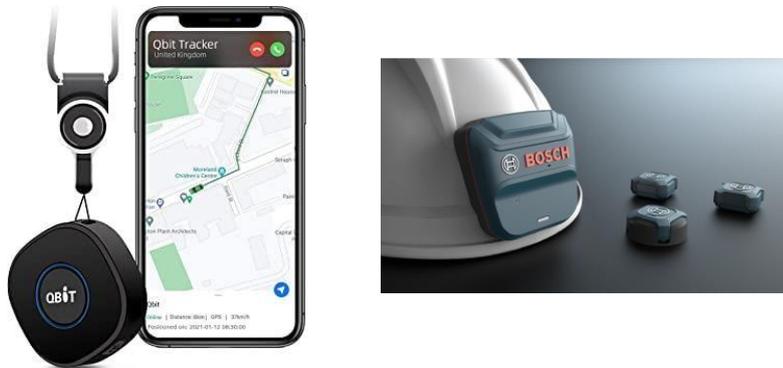


Fonte: <https://www.elokon.com>

Como já exposto os riscos de colisões e acidentes são mais propensos de acontecerem em ambientes confinados como em túneis e galerias subterrâneas. As tecnologias hoje permitem que a tecnologia de um colete para área de logística seja reprojetoado para área de mineração. O maior empecilho, no entanto, seria o custo e a demanda.

Outro dispositivo interessante, que está sendo aplicado na mineração e pode ser considerado um dispositivo vestível é sistema com o uso de rastreadores de GPS presos na roupa ou em cintos (vide figura 18). O uso desses rastreadores é especialmente importante em regiões de risco como o descomissionamento de barragens. Embora o descomissionamento de barragens esteja empregando um número cada vez maior de equipamentos remotos ou autônomos, a entrada de operários na área se faz necessária e a localização é importante para controle de área e em casos extremos facilitar o resgate e salvamento.

Figura 18 - Pequenos dispositivos de GPS que pode ser carregado junto a roupa, cinto ou capacete.



Fonte: Amazon.com (à esquerda) e <https://lora-alliance.org> (à direita).

O barateamento da tecnologia de rastreadores de GPS portáteis pode auxiliar também no controle de pessoas e verificação de evacuação em áreas de realização de detonação, em situações de incêndio ou refúgio. A execução de obras pesadas, como túneis, rodovias e hidrelétricas realiza detonações de rocha de forma periódica e possui, geralmente, diversas empreiteiras, com muitos operários com variados níveis de conhecimento sobre normas de segurança. O controle de pessoas em área é uma preocupação constante e o rastreamento de operários pode trazer mais segurança para constatar que realmente não existem pessoas não autorizadas em áreas de risco de projeção de fragmentos.

De uma forma geral joias e acessórios não são recomendados para serem usados em áreas industriais pois podem se prender em partes móveis de máquinas ocasionando acidentes. O mercado de joias inteligentes ou tecnológicas é um novo ramo que começa a ser desenvolvido com o uso de anéis, pingentes, braceletes e broches que podem monitorar o estado fisiológico ou indicar a localização de uma pessoa.

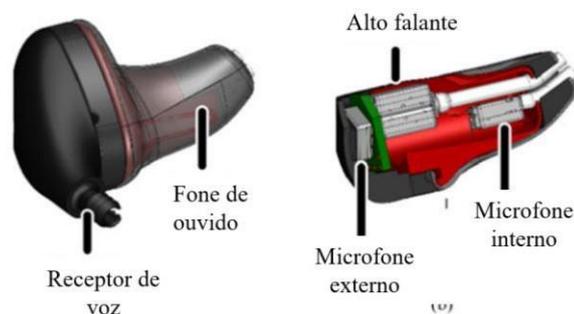
Os acessórios de moda não podem ser totalmente descartados para a indústria ou na mineração pois algumas funções desempenhadas poderiam portar elementos citados para funções de monitoramento ambiental ou fisiológico. Ao excluir questões inerentes ao mercado da moda como exclusividade, design, preço, *status* entre outros pontos, os acessórios de moda poderiam vir a ter um preço baixo pois esses dispositivos atuariam apenas na captura e registros dos dados, a exibição dos dados assim como o seu processamento dependeria de um dispositivo externo como um celular ou computador, tornando o dispositivo mais acessível, leve e com bateria de longa duração.

O desenvolvimento de botas inteligentes está ocorrendo com o emprego de sensores que detectam situações como quedas. O empecilho e pouca atenção para o desenvolvimento de botas inteligentes ou palmilhas com sensores é a sua concorrência com outros dispositivos que executariam as mesmas funções e ainda poderiam agregar outras funções de forma mais prática e usável como dispositivos no pulso que detectam quedas e ainda agregam funções de monitoramento fisiológico e *displays* de exibição.

Existe a possibilidade de usar câmeras portáteis e acopladas no capacete ou na roupa, como já ocorre em setores da polícia. Dentro da mineração, Mardanova e Choi (2018), sugerem o uso de câmera conectada com baterias em uma mochila ou em um dos bolsos do colete e com a transmissão das imagens para uma central que analisaria automaticamente a quantidade de sílica cristalizada respirável no ar em uma galeria de mina subterrânea.

Martin e Voix (2017) chamam atenção para a oportunidade de desenvolver fones de ouvidos inteligentes, ilustrados na figura 19. Eles podem ser usados para proteger de ruídos, receber instruções, e por meio de microfones externos realizar comunicação e ditar mensagens e com microfones internos poderiam atuar no monitoramento de sinais vitais com captação do ruído fisiológico resultante das atividades cardiovasculares. A vantagem de usar fones sem fio inteligentes segundo os autores resultaria na sua boa precisão de monitoramento cardíaco. No futuro são esperados que os fones de ouvido façam tradução em tempo real, e tenham maior integração com outros dispositivos para realizar comando por meio da voz.

Figura 19 - Fone de ouvido inteligente composto por microfones internos e externos.



Fonte: Martin e Voix (2017).

O último dispositivo a ser considerado, que foi colocado em evidência por Atif *et al.* (2020) é a concepção de máscaras faciais digitais e inteligentes para a mineração. As máscaras seriam impressas em 3D e agregariam biosensores que poderiam monitorar a temperatura do corpo, frequência cardíaca e níveis de oxigênio no sangue.

6 DISCUSSÃO

Nesta pesquisa, foram definidos, a partir do controle e da automação aplicados à lavra subterrânea, no contexto da indústria 4.0, dispositivos vestíveis ou aparatos leves o suficiente e de pequena forma, sem deixar de lado a componente custo, para serem incorporados nas partes do corpo como cintura, pulso ou sobre-visão ou ainda que possam ser acoplados em capacetes, cintos ou coletes, que tenham o objetivo de fazer o monitoramento fisiológico ou do ambiente.

De forma mais generalizada os vestíveis tecnológicos segundo Svertoka *et al.* (2021) atuam de quatro modos: monitoramento, suporte, treinamento e rastreamento.

O monitoramento inclui os parâmetros dos sinais vitais do trabalhador e do ambiente que o cerca. Os parâmetros vitais mais comuns são a frequência cardíaca, pressão arterial, temperatura corporal, atividade cerebral, os parâmetros psicológicos são menos usuais. A combinação dos parâmetros ambientais (temperatura, pressão, umidade, radiação e outros) com parâmetros vitais, torna possível rastrear de forma mais consistente os impactos ambientais na saúde humana em ambientes insalubres e perigosos (SVERTOKA *et al.* 2021).

O suporte descrito aqui, exclui os dispositivos vestíveis tecnológicos do tipo exoesqueletos que auxiliariam na postura e auxiliariam na força física com o levantamento de pesos. Segundo Svertoka *et al.* (2021) o suporte poderia ser de comunicação, simplificação da informação. A principal vantagem no quesito de comunicação se daria pela portabilidade de um dispositivo pequeno e seu uso com mãos livres, os microfones são relatados como inclusos em fones de ouvido, capacetes e óculos. O suporte dos dispositivos vestíveis na simplificação da informação pode ser entendido como na possibilidade de transmissão de informações visuais, armazenamento, acesso rápido a documentos e notificações.

O quadro 02 compila as informações sobre os dispositivos pesquisados, e ajuda a responder à pergunta de pesquisa 01: Qual seria a utilidade dos vestíveis tecnológicos para a mineração?

Quadro 02 – Dispositivos pesquisados e suas possíveis utilidades na mineração.

<p>Dispositivos de pulso (pulseiras e relógios)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoramento fisiológico (Batimentos cardíacos, pressão sanguínea, saturação de oxigênio no sangue, temperatura da pele, nível de estresse) - Detecção de sonolência - Monitoramento ambiental (temperatura do ambiente) - Detecção de quedas - Detecção de proximidade e colisão - Rastreamento e localização - Envio e recebimento de mensagens por texto ou áudio - Controle de acesso em áreas 	<p>Capacetes inteligentes</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoramento fisiológico (batimentos cardíacos) - Consciência situacional - Detecção de sonolência - Monitoramento ambiental (Qualidade do ar, temperatura, umidade) - Detecção de uso - Detecção de quedas - Rastreamento e localização - Controle de acesso em áreas
<p>Dispositivos de visão (óculos de R.A e R.V.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Visualização de informações complexas como dados geoespaciais, - Realização de inspeções de processos com preenchimento de <i>checklist</i> de forma eletrônica. - Gravação, transmissão e envio e recebimento de mensagens de procedimentos para uma sala remota. - Ampliar a percepção do ambiente com a exibição de dados na tela, indicando por exemplo temperatura de componentes mecânicos. - Exibir alertas de aproximação de veículos - Orientação e navegação nos ambientes 	<p>Colete</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Sensor de atividade/ inatividade - Geração de alertas tátil/ vibracional. - Incorporação de Led para comunicação - Detecção de proximidade e risco de colisão - Sensores de detecção de gases. - Controle de acesso em áreas
<p>Acessórios (anel/ colares, cintos e broches)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Rastreamento e localização - Controle de acesso em áreas 	<p>Fones de Ouvido</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoramento fisiológico (batimento cardíaco) - Comunicação com o envio e recebimento de mensagens de áudio
<p>Botas</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Detecção de quedas 	<p>Máscaras</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoramento fisiológico (Batimentos cardíacos, saturação de oxigênio, temperatura do corpo e níveis de oxigênio)

Fonte: Próprio autor (2022).

O treinamento do trabalhador pode ser auxiliado com o uso de alguns dispositivos que rastreiam e corrigem ações do trabalhador no âmbito posturas (biomecânica) e comportamentais. Esse registro e análise permite a prevenção e mudança das condições para prevenir erros no futuro. Os recursos de R.V. e R.A. tornam possível treinar os trabalhadores para realizar operações complexas (SVERTOKA *et al.* 2021).

O rastreamento, a localização do trabalhador, permite melhorar a gestão da segurança com o monitoramento da evacuação em casos de emergência, localização de acessos. Quando os equipamentos móveis são instalados com sensores de colisão e de presença de trabalhadores em áreas permite prevenir colisões.

6.1. ANÁLISE COM A MATRIZ *SWOT*

A análise com a matriz *SWOT* compõe uma das ferramentas usadas para elaborar o planejamento estratégico. O planejamento estratégico ganhou espaço na academia e no meio empresarial para projetarem cenários futuros com maior grau de precisão. Outro ponto importante do planejamento estratégico é entender como os negócios são afetados, isto é tentar descrever as variáveis internas e externas que influenciam a organização e a partir disso se preparar para o futuro, aproveitar as oportunidades e se posicionar à frente dos seus concorrentes (FERNANDES, 2012).

A matriz *SWOT* foi estruturada em algum momento entre a década de 1950 e 1960 e, até hoje não se conseguiu apontar, com precisão, a sua origem. Segundo Fernandes (2012) não é possível encontrar o documento que evidencie o início dos estudos, mas sim de muitos documentos relacionados a vários estudiosos que relatam o reconhecimento do seu valor para compor os estudos de planejamento estratégico.

A partir da pesquisa de literatura é realizada uma análise sob o ponto de vista da matriz *SWOT* destacando as Forças (*Strengths*), Fraquezas (*Weaknesses*), Oportunidades (*Opportunities*) e Ameaças (*Threats*) dos dispositivos vestíveis tecnológicos com sua aplicação no contexto de uma mineração 4.0. Os pontos fortes e as fraquezas são consideradas como inerentes ao produto em si, e as oportunidades e ameaças são considerados sob o ponto de vista externo, ou seja, envolvem cenários e implicações que estão além do produto.

A aplicação da análise *SWOT* permite entender os aspectos específicos do uso de dispositivos vestíveis tecnológicos na mineração e criar perspectivas e direções para as diferentes entidades envolvidas sobre como os dispositivos devem ser inseridos no ambiente de trabalho e complementa a resposta sobre a pergunta de pesquisa sobre a utilidade dos vestíveis tecnológicos na mineração.

Segundo Fernandes (2012) a matriz *SWOT* é imprescindível para a construção de uma organização dinâmica e que busca uma associação com uma sociedade que se reinventa a todo instante envolvida nas dinâmicas das novas tecnologias.

Quadro 03 - Matriz *SWOT* sobre o uso de vestíveis tecnológicos na mineração.

Forças	Fraquezas
Monitoramento ambiental Rastreamento e localização Plataforma multissensorial Entrega de conteúdo Envolvimento da experiência humana	Questões de privacidade Protocolos de comunicação Custo e manutenção Fragilidade eletrônica Desconfortável/ problemas de design
Oportunidades	Ameaças
Monitoramento fisiológico Integração com outros equipamentos Prevenção de colisões Apoio na tomada de decisão	Fraca precisão de detecção Número alto de falsos positivos Maturidade dos fabricantes Negociação entre trabalhador e empresa Motivações inespecíficas das empresas Atendimento a todas as faixas etárias Desafio da análise dos dados Competição com aparelhos portáteis

Fonte: O próprio autor (2022).

6.2 FORÇAS

Os pontos fortes indicam o que se ganha com a adoção dos dispositivos vestíveis tecnológicos na mineração. A seguir são detalhadas todas as características percebidas.

6.2.1 MONITORAMENTO AMBIENTAL

A natureza do ambiente de trabalho industrial, no qual se encaixa também as atividades de mineração, é tal que apresenta riscos para a saúde e segurança dos trabalhadores. Isso não ocorre apenas porque a maioria das atividades é realizada ao ar livre ou em escavações, fazendo com que os trabalhadores tenham uma exposição considerável aos elementos climáticos e à proximidade a rochas. Mas os processos industriais também envolvem o uso de materiais perigosos na forma de produtos químicos, gases e materiais sólidos. A detecção automatizada desses materiais prejudiciais e elementos climáticos adversos é necessária (AWOLUSI *et al.* 2019).

O monitoramento ambiental hoje é feito na forma de estações fixas e espaçadas e possui uma restrição geográfica. Já outros procedimentos de medição são temporais com equipamentos sendo posicionados nas áreas de trabalho por um certo tempo e recolhidos depois. Outros problemas com estações fixas são a sua necessidade reposicionamento à medida que as frentes de trabalho mudam com o risco de danos. Outra questão é que não conseguem medir o nível de exposição individual e a sua precisão é apenas para uma área restrita.

Com o barateamento dos sensores torna-se possível incluir mais parâmetros de medição dentro de um único dispositivo vestível, ou seja, são versáteis, e podem tornar a análise da qualidade do ar, por exemplo, mais complexa e aprimorada combinando as medições de estações fixas com as medições individualizadas dos vestíveis tecnológicos, entretanto os estudos sobre a precisão e comparação entre sensores miniaturizados e métodos de referência ainda são escassas (BORGHI *et al.* 2017).

Santos (2020) destaca que a medição individualizada abre caminho para um maior número de medições proporcionando maior controle e agilidade nas leituras. O uso de um

vestível com monitoramento ambiental cria uma relação positiva tanto para o trabalhador quanto para a empresa.

6.2.2 RASTREAMENTO E LOCALIZAÇÃO

A localização constante pode ajudar bastante na gestão da segurança e planejamento do trabalho. A localização é especialmente útil em trabalhos em lugares perigosos como barragens de rejeitos, na mineração subterrânea que possui muitos condutos e em obras pesadas e minas que precisam de controle de área para realizar detonações de explosivos.

A localização é especialmente útil quando combinada com os dados de sensoriamento ambiental. Então por exemplo no monitoramento do sistema ventilação de uma mina subterrânea é muito útil saber os pontos que estão com parâmetros insuficientes e a partir disso fazer melhorias pontuais.

6.2.3 PLATAFORMA MULTISENSOR EM UM ÚNICO DISPOSITIVO

O raciocínio por trás dessa ideia é selecionar sensores que sejam complementares, de modo que uma gama mais ampla de atividades possa ser monitorada. Este sensor multimodal poderia ser incorporado em dispositivos móveis, como telefones celulares. A integração de sensores em dispositivos que as pessoas já carregam provavelmente será mais atraente para os usuários e obterá uma maior aceitação dos mesmos (AWOLUSI *et al.* 2019).

Os dispositivos vestíveis são projetados para serem automáticos e de comandos simples o que pode facilitar o seu uso comparado com equipamentos de segurança portáteis que demandam procedimentos e treinamentos para serem operados.

6.2.4 ENTREGA DE CONTEÚDO

A tecnologia pode ser usada como aliada do aumento de segurança e de produtividade. Os dispositivos vestíveis permitem que os usuários recebam informações, enviem mensagens,

permitem alertar sobre procedimentos e incentivar posturas comportamentais. Krupitzer *et al.* (2020) também colocam outras possibilidades como consultas automatizadas a manuais digitais e orientações de navegação.

6.2.5 ENVOLVIMENTO DA EXPERIÊNCIA HUMANA

Os dispositivos podem permitir uma relação mais segura, agradável, mais interativa e perceptiva do ambiente industrial. O uso de dispositivos vestíveis tecnológicos principalmente de óculos de R.V. e R.A. podem também permitir lidar com problemas mais complexos e gerar novas perspectivas de solução, execução e planejamento de tarefas. A combinação por exemplo de VANT's com uso de óculos de R.A. e R.V. ilustra bem esse ponto pois permite ao trabalhador executar inspeções em ambientes insalubres de forma remota.

A introdução de equipamentos e operações controladas remotamente, já de uso comum em várias minas subterrâneas, assim como o controle das cavidades (para verificação da diluição) e a perfilagem de furos na perfuração (para controle da recuperação de minério na lavra). Os trabalhos executados de forma remota são apoiados com uso de câmeras e telas. É preciso investigar se o uso de óculos imersivos e com exibição de informações nas formas de R.A. pode substituir as telas tradicionais com vantagens e trazer conforto, segurança e mais produtividade para a rotina operacional.

A geração de um ambiente de trabalho mais seguro com alertas de perigo e lembretes de atenção pode trazer benefícios e menor incidência de acidentes. Outro exemplo que contribuiria para a gestão da segurança seria o uso das informações dos sensores associadas aos locais. Então, por exemplo o uso de dispositivos de pulso com a detecção de queda pode indicar os pontos que precisam de modificação para evitar novas quedas.

Marcengo *et al.* (2014) mencionam que os dispositivos vestíveis tecnológicos com suas análises e por meio do envio de mensagens, podem reforçar ou reprimir comportamentos. Autores exemplificam que a conquista de insígnias e distribuições de prêmios podem incentivar condutas positivas.

6.3 FRAQUEZAS

São levantados neste item os principais riscos de se implantar os dispositivos vestíveis tecnológicos no ambiente da mineração e por meio disso se ter uma clareza para amenizar ou desenvolver métodos de eliminá-las.

6.3.1 QUESTÕES DE PRIVACIDADE

É uma das maiores preocupações quando se trata de vestíveis tecnológicos. Às vezes a privacidade é tratada de forma aprofundada, outras vezes de forma mais superficial, mas os riscos de exposição dos dados são sempre abordados nos artigos sobre os dispositivos vestíveis tecnológicos. O que torna ainda mais prenunciada após a Lei Geral de Proteção dos Dados (LGPD), em vigor desde agosto de 2018 que estabelece parâmetros sobre como os dados dever ser coletados, armazenados, processados, disponibilizados e destruídos. Outro passo importante da lei é que estabelece direitos que permitem o usuário solicitar os dados fornecidos, revogar a concessão dos dados e pedir a exclusão deles. O registro do cotidiano ou da rotina de trabalho pode levar a descobertas sobre o usuário que até ele mesmo desconhece.

Como os dispositivos vestíveis são compactos e possuem limitação de processamento, os dados precisam ser transferidos para nuvem e passam por armazenamentos em banco de dados que sem a devida preocupação com segurança podem ser acessados e expostas por um *hacker* ou por um intermediário das informações. Anaya *et al.* (2018) ressaltam que os usuários parecem não relacionar as questões de privacidade com consentimento informado ao comprar um dispositivo ou ao instalar *softwares* de monitoramento no celular e Duque (2019) menciona que os usuários devem assinar ou concordar com contratos de política de privacidade digitais extensos que são pouco compreensíveis.

Dispositivos vestíveis tecnológicos que envolvem funções de filmagem e fotos devem ser projetados para preservarem informações sensíveis e proteger a privacidade das pessoas ao redor que são capturadas pelos sensores que estão preso ao corpo do trabalhador de forma constante. As câmeras podem capturar informações e procedimentos sigilosos como digitação de senha, captura de telas e documentos com informações confidenciais. Como os dados das

câmeras são descarregados quase sempre em um sistema externo (serviço de *upload* na nuvem de um provedor externo) as informações se tornam mais vulneráveis ainda de serem acessadas por um agente malicioso se não se adotarem procedimentos rigorosos de segurança (SHRESTHA e SAXENA, 2017).

Outro ponto pouco abordado segundo Anaya *et al.* (2018) é o pouco envolvimento das autoridades regulatórias em elaborar consequências legais por violação e uso indevido de informações de saúde fornecidas por dispositivos vestíveis. Svertoka *et al.* (2020) evidenciam que os orçamentos de desenvolvimento dos dispositivos vestíveis tecnológicos estão voltados para a eliminação de outros problemas tecnológicos em vez de mecanismos de proteção de dados do usuário, que ficam em segundo plano.

6.3.2 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

A maioria dos dispositivos vestíveis tecnológicos são projetados para ficarem conectados o tempo todo com uma central de monitoramento, e a maioria dos ataques *hacker* ocorrem nos canais de comunicação. Com o aumento das máquinas conectadas e a inserção de objetos de IoT no meio industrial a largura de banda pode se tornar um problema. É preciso então pensar nos protocolos de comunicação e pontos de vulnerabilidades da rede (TURNER *et al.* 2020).

Na mineração, principalmente na subterrânea segundo Ranjan *et al.* (2019), são necessários esforços de pesquisa para fornecer uma infraestrutura de comunicação sem fio confiável, considerando as operações dinâmicas da mina e a escalabilidade de tais redes. Este desempenho extremo da comunicação sem fio é caracterizado principalmente por características exclusivas do ambiente de propagação subterrânea, incluindo inclinação de longo alcance do corpo de minério, rugosidade das paredes das escavações da mina, sistemas de suporte aleatórios, ruído do equipamento de mineração, movimentos do minerador e infraestrutura complexa da mina (dutos, pilares e outros possíveis obstáculos).

Anaya *et al.*, (2018) apontam que medidas de comunicação com dados criptografados são uma forma eficaz de proteger o canal de comunicação e, os registros armazenados contra a divulgação de informações e a sua adulteração.

6.3.3 CUSTO E MANUTENÇÃO

O custo de um dispositivo depende de muitos fatores como número e tipo de sensores, durabilidade e autonomia da bateria, material de confecção entre outros. As tecnologias vestíveis para a indústria devem ter um baixo custo de implantação e manutenção, ao mesmo tempo que devem ser robustas o suficiente para resistir a um ambiente hostil por vários anos (AWOLUSI *et al.* 2018).

Dependendo da funcionalidade e nível de integração pretendida com o dispositivo vestível tecnológico a sua implantação pode ter um alto custo, por exemplo no custo de um sistema de alerta de colisão teria que se embutir também o custo da instalação de receptores de *bluetooth* ou etiquetas RFID de identificação nos equipamentos móveis.

6.3.4 FRAGILIDADE ELETRÔNICA

Os vestíveis tecnológicos compreendem dispositivos compactos e cheios de sensores. O ambiente industrial pode conter poeira, variações de temperatura e/ ou umidade e propiciar impactos. Desta forma é importante testar e averiguar a resistência do dispositivo ao ambiente agressivo.

6.3.5 DESCONFORTO E PROBLEMAS DE DESIGN

Segundo Khakurel *et al.* (2018) se o dispositivo vestível não incorporar características adequadas de usabilidade pode afetar motivação do operário a trajar adequadamente o acessório. Os dispositivos vestíveis tecnológicos devem ter um *design* agradável. Dispositivos rígidos ou volumosos podem restringir posições de leitura ou causar constrangimento no uso como no caso de óculos de R.A. (Ling *et al.* 2020).

A premissa dos dispositivos vestíveis tecnológicos é manter as mãos livres, mas é preciso verificar o tamanho e peso se são adequados para o desempenho da função e não causam desconfortos ou limitações de movimentos, ou seja, o dispositivo não pode se tornar um inconveniente para a rotina de trabalho.

Awolusi *et al.* (2018) notam que a capacidade da bateria é diretamente proporcional ao seu tamanho e peso e os requisitos para uma bateria de longa duração se opõem diretamente aos requisitos de tamanho pequeno e baixo peso. É esperado um avanço nos próximos anos com a tecnologia de baterias com novos materiais eletroquímicos, cargas realizadas de forma mais rápida, e a eliminação de cabos durante o carregamento.

6.4 OPORTUNIDADES

As oportunidades advêm dos cenários e implicações externas e podem se dar em várias camadas econômicas, políticas e sociais. O item monitoramento fisiológico tem merecido maior atenção por ter mais nuances que estão na fronteira entre a responsabilidade da empresa e os cuidados da saúde individual do funcionário. Na área de saúde ocupacional o padrão é realizar exames periódicos anuais de saúde obrigatórios pela definição das leis trabalhista para determinadas funções. Com a possibilidade de inserir vestíveis tecnológicos para o monitoramento fisiológico abre a possibilidade de monitoramento da saúde de forma contínua trazendo junto questionamentos e problemas de várias esferas.

6.4.1 MONITORAMENTO FISIOLÓGICO

Este aspecto de sensoriamento do corpo humano é inerente ao produto em si, porém a real necessidade do monitoramento contínuo no ambiente de trabalho apresenta muitos questionamentos e pontos de vistas. Atualmente o monitoramento fisiológico contínuo não é feito no ambiente de trabalho. Se passar a ser feito com o uso de dispositivos vestíveis tecnológicos pode trazer oportunidades e descobertas de novos conhecimentos, mas também carrega junto outros problemas que são explicitados a seguir.

Com os avanços da tecnologia é possível acompanhar os trabalhadores e seus parâmetros de saúde por meio de biosensores. Na abordagem tradicional as coletas de dados e conferência de parâmetros são feitas de maneira limitada, com pouca periodicidade, em geral quando ocorrem incidentes e acidentes, algumas de forma manual e subjetiva e outras medições possuem também limitação de distribuição geográfica (AWOLUSI *et al.* 2018).

O monitoramento contínuo e automatizado é um dos métodos mais promissores e também pode acompanhar sinais vitais e de postura e por meio de análise e comparativo de padrões preestabelecidos, fazer alertas para trabalhadores com riscos para a sua saúde. O monitoramento contínuo pode conferir a consciência situacional do funcionário e envolve a percepção do ambiente e projeção de estados e eventos futuros especialmente em condições extremas (LI, XIAN *et al.*, 2018).

Ranjam *et al.* (2019) argumentam que estatísticas e razões para doenças como câncer em trabalhadores ou silicose, comuns em minas subterrâneas, são difíceis de estimar e acompanhar pois são doenças que desenvolvem ao longo do tempo e são altamente dependentes de fatores como exposição e localização dos trabalhadores. Desta forma uma infraestrutura de monitoramento preventivo da saúde é útil para a gestão do ambiente de trabalho e formulação do tipo de trabalho e das funções atribuídas.

No âmbito da saúde pessoal as questões de confidencialidade podem ficar em segundo plano visto que os pacientes veem uma clara conexão entre o monitoramento e a recuperação. No âmbito industrial, a coleta de dados fisiológicos e sua ligação com fatores de estresses ou de indícios de doenças podem preocupar o funcionário com medo de ser demitido ou que tenha seus dados expostos (SVERTOKA *et al.* 2020) e se constituir em uma barreira de implantação do monitoramento.

Embora os fabricantes se esforcem para melhorar os sensores e seus algoritmos de análises há uma linha tênue entre regulamentação governamental e a classificação de um dispositivo do tipo clínico e do tipo recreativo ou industrial. A análise dos dados dos biosensores deve ser complementada por consultas e exames médicos. Não se pode acreditar totalmente nos apontamentos dos relatórios gerados por coleta e análise de um dispositivo vestível sem entender e complementar com as questões individuais de cada trabalhador.

Outro ponto de crítica feita por Nafus (2013), com relação à coleta de dados por dispositivos vestíveis, é a não transparência por partes dos desenvolvedores que tomam as decisões sobre o que é relevante, como deve ser medido e o que deve ser interpretado e exibido para o usuário. Não há a mínima possibilidade para que outros cálculos ou interpretações floresçam, os *designers* possuem o privilégio de predefinir o problema e a solução, não deixando dessa forma permissão para adaptações personalizadas.

O monitoramento constante também pode ser desconfortável psicologicamente pois reforça a narrativa de se estar constantemente vigiado e a necessidade de ser produtivo já que gestos, tempo sentado, passos e deslocamentos podem ser medidos de forma constante. O artigo de Choi *et al.* (2017) reporta sobre o uso e aceitação de dois dispositivos vestíveis (pulseira e colete) no ambiente de construção civil e constata que alguns trabalhadores testados têm a sensação de vigilância e punição.

Marcengo *et al.* (2014) ressaltam que não basta o usuário saber de dados fisiológicos porque isso em si não é capaz de produzir algum tipo de mudança, é um pensamento ingênuo que tem sua origem em paradigmas psicológicos parciais ou ultrapassados. Os mesmos autores dizem que o cérebro humano não é um “computador racional”, que sabendo de alguns dados produz a “melhor” resposta para esses dados. Nessa mesma linha de raciocínio é sabido que o cigarro provoca um grande número de doenças, mas esse fator não é relevante para fazer as pessoas pararem de fumar, nem toda mudança é feita com base em números e na racionalidade.

Al-Eidan *et al.* (2018) mencionam o desafio do uso de dispositivos vestíveis no longo prazo. Os usuários começam empolgados com o uso e monitoramento contínuo, mas fatores como vida útil, aceitação do usuário, segurança, peso, tolerância a falhas e preocupações de privacidade tendem a desestimular o seu uso no longo prazo.

Nafus (2013) complementa a questão do abandono do uso de dispositivos vestíveis no monitoramento fisiológicos, apontando que quando os dados são bons ou são alcançados devido a maior atividade física ocorre pouco ganho com o uso contínuo ou com o compartilhamento dos parâmetros nas redes sociais para se gabar. O mesmo autor aponta que os aplicativos dão retorno as pessoas sobre o que devem e o que não devem fazer. De forma geral atletas estão acostumados com retornos negativos sobre seus treinos, mas fora do âmbito dos esportes os retornos negativos podem causar vergonha ou culpa que contribuem para levar ao abandono do dispositivo.

6.4.2 INTEGRAÇÃO COM OUTROS EQUIPAMENTOS

Pode-se potencializar o uso de dispositivos vestíveis tecnológicos se eles forem integrados com o funcionamento de outros equipamentos. Esse aspecto está ligado com o ponto forte abordado também no envolvimento da experiência humana, exemplificando o uso de óculos de R.A.. Para uma inspeção de correias poderia dar uma percepção extrassensorial ou visão sobre o processo que permitiria o operador atuar com mais confiança pois os óculos exibirão parâmetros como a temperatura de um rolete e partir disso ocorre o registro de normalidade ou ponto de atenção ou intervenção.

6.4.3 PREVENÇÃO DE COLISÃO

Ambientes como o de construção civil e mineração são dinâmicos e a movimentação de pessoas e equipamentos ocorre de forma intensa em alguns pontos. Um sistema de detecção e alerta de proximidade em tempo real pode prevenir lesões de contato e até mesmo mortes. Segundo Awolusi *et al.* (2019) os sistemas de prevenção de proximidade foram desenvolvidos utilizando várias tecnologias, como um sensor baseado em ultrassom, tecnologia de detecção de radiofrequência, radar e GPS para prevenir acidentes de contato. Segundo o mesmo autor etiquetas ativas de RFID por exemplo podem aumentar o sinal de alcance para cerca de 100 metros.

6.4.4 APOIO NA TOMADA DE DECISÃO

A coleta de dados em tempo real pode ajudar a melhorar a densidade de pontos de coleta que estão apoiados em estações de monitoramento fixa e com isso apoiar a tomada de decisão de melhorias em sistemas, como de ventilação (SANTOS 2020).

Os dispositivos vestíveis podem ajudar a tomar decisões descentralizadas com o operador em campo, podem ampliar a percepção do ambiente e gerar mensagens ou sinais para que o operador tenha atitudes imediatas de intervenção em máquinas e processos.

O registro de informações de forma automática pelos dispositivos vestíveis tecnológicos é importante também para uma posterior análise de procedimentos ou ajustes de

sensibilidade e desta forma contribuir para a gestão da produção, segurança e mudanças no ambiente trabalho apoiadas em dados e com a implantação de experiências documentadas de forma científica.

6.5 AMEAÇAS

São pontos que podem atrapalhar na implantação dos dispositivos vestíveis tecnológicos que provêm dos cenários externos e podem trazer implicações que podem se dar em várias camadas como econômicas, produtivas, políticas e sociais.

6.5.1 FRACA PRECISÃO DE DETECÇÃO

Segundo Ling *et al.* (2020) como o corpo humano é macio e os sensores vestíveis são rígidos, a movimentação ou o fraco contato com a pele pode levar a registros imprecisos, e a precisão dos dados é um pré-requisito para um diagnóstico válido.

Awolusi *et al.* (2018) apontam que a sensibilidade dos dispositivos pode ser afetada em ambientes hostis, como a mineração, a presença de campos magnéticos elevados pode por exemplo afetar a precisão ou a sensibilidade de alguns sensores. Os autores também dizem que o suor produzido pode afetar negativamente os sensores causando redução na precisão ou criando a necessidades de recalibração.

Niknejad *et al.*, (2020) e Liu (2021) apontam que a maior parte dos vestíveis tecnológicos que tem o foco de aplicação voltado para área industrial estão em fase teórica ou laboral com poucos casos relatados em larga escala para referência de pesquisa, e por períodos de tempos relativamente curtos, o que muitas das vezes deixa de cobrir situações da vida real. As atualizações de *firmware* (ou *software* embarcado, conjunto de instruções operacionais programadas diretamente no *hardware* de equipamentos eletrônicos), poderiam ser lançadas para alterar e ajustar a confiabilidade de coleta e análise dos dados, mas ainda assim é um ponto de fragilidade e ameaça para a implantação dos dispositivos vestíveis tecnológicos.

6.5.2 NÚMERO ALTO DE FALSOS POSITIVOS E NEGATIVOS

Esse ponto fraco está ligado de certa forma à fraca precisão dos dados, pois se os dados não forem confiáveis pode ocasionar um número alto de falsos positivos.

A inteligência artificial possui grande capacidade de encontrar padrões, mas pode falhar em captar as sutilezas próprias de algumas situações complexas tanto no sensoriamento ambiental quanto no monitoramento fisiológico com o uso de dispositivos vestíveis tecnológicos. A geração de falsos positivos pode ocasionar perdas econômicas por paradas no processo de produção e com a verificações de alarmes falsos. Situação ainda pior poderia ser a geração de falsos negativos que além das perdas econômicas poderiam ocasionar problemas para o operário que não teve assistência ou orientação no tempo indicado (CAMPERO *et al.* 2020).

6.5.3 MATURIDADE DAS EMPRESAS

O mercado de dispositivos vestíveis tecnológicos é relativamente recente, embora grandes companhias de tecnologia já estejam presentes como a Google, Samsung e Apple, há muitas *start ups* que estão em busca de desenvolvimento de produtos vestíveis voltados para nichos empresariais e tendem a ter uma experiência e capacidade industrial limitada (Evers *et al.* 2018).

Outro ponto de preocupação apontado por Evers *et al.* (2018) é a falta de padrões para sistemas operacionais, interfaces e aplicativos de diversas empresas que podem dificultar o desenvolvimento de soluções mais integrativas e abrangentes.

Empresas novas podem trazer produtos e tecnologias inovadoras, mas a alta concorrência e necessidade de capital podem fazer com que o produto seja descontinuado ou que a empresa seja vendida para outra e com isso o dispositivo corre o risco de ficar sem peças de manutenção e suporte.

6.5.4 NEGOCIAÇÃO DOS CENÁRIOS

Segundo Evers *et al.* (2018) a maior parte das implementações de dispositivos vestíveis tecnológicos é de projetos pilotos e as empresas estão testando os usos e implicações dessas tecnologias no ambiente de trabalho. Desta forma os cenários e funções que vão ser monitorados estão sendo negociados por vários atores (funcionários, empresas e sindicatos).

Evers *et al.* (2018) alegam que implementação de dispositivos vestíveis tecnológicos pode implicar um ambiente produtivo com grande racionalização e Moore (2015) (*apud* Khakurel *et al.*, 2018) aponta que os vestíveis e o auto rastreamento são formas emergentes do sistema produtivo do neo-taylorismo com a subordinação dos corpos ao capitalismo neoliberal. A busca por racionalização excessiva no ambiente de trabalho pode não captar as nuances próprias do comportamento humano e pode gerar um ambiente de trabalho desagradável com o cumprimento de métricas que só fazem sentido em planilhas eletrônicas.

A questão do uso de dispositivos vestíveis tecnológicos e os benefícios da quantificação devem ser equilibrados de forma que os funcionários tenham controle sobre os dados e também possam auferir benesses.

6.5.5 MOTIVAÇÕES INESPECÍFICAS DAS EMPRESAS

Evers *et al.* (2018) apontam por meio de realização de entrevistas com gerentes de fábricas que a motivação para implementar dispositivos vestíveis tecnológicos no ambiente de trabalho é um processo multicamadas. As empresas enfatizaram claramente a sua intenção de racionalizar o processo de trabalho, mas não sabem muito bem como fazer isso e demandam projetos com grande margem interpretativa dos fabricantes. Os mesmos autores afirmam que a motivação para racionalizar a produção muitas vezes anda de mãos dadas com a disposição de coletar dados sobre o processo de trabalho - e explorar os possíveis usos desses dados para a otimização do processo, ainda que não esteja claro em um primeiro momento como relacionar as medidas e produtividade.

Se um projeto de implantação de dispositivos vestíveis tecnológicos não for bem estruturado e não tiver uma clareza dos benefícios a serem medidos e alcançados, a tendência

é fracassar. Evers *et al.* (2018) questionam a captação de dados de batimentos cardíacos por parte de algumas empresas que implantaram dispositivos vestíveis tecnológicos nos seus processos produtivos: qual a real necessidade de coleta e armazenamento deles? A coleta de batimentos cardíacos é relativamente simples de fazer, mas se não tiver uma clareza de objetivos da coleta e da sua análise não faz sentido o seu monitoramento.

6.5.6 ATENDIMENTO A TODAS AS FAIXAS ETÁRIAS

O uso de vestíveis tecnológicos, seu manuseio e operação devem ser simples o suficiente para atender a todas as faixas etárias para não afetar a sua usabilidade (Khakurel *et al.*, 2018). Se o dispositivo vestível tecnológico for de operação complexa corre o risco de o operador boicotar o seu uso, em outras palavras, a curva de aprendizado sobre o uso e manuseio dos vestíveis tecnológicos não deve ser íngreme.

6.5.7 DESAFIO DA ANÁLISE DOS DADOS

Os dispositivos vestíveis geram uma grande quantidade de dados relevantes para a saúde que podem ser analisados por diferentes prestadores de serviços, como empregadores e seguradoras. O que levanta preocupações e questionamentos como: pertencimento dos dados por quanto tempo vão ficar armazenados? Os dados poderão ser transferidos para terceiros? Que tipo de análises vai ser feitas? (Nikayin *et al.*, 2014; Khakurel *et al.*, 2018).

Segundo Li e Hopfgartner (2016) as três possíveis fontes de receita dos fabricantes dos dispositivos vestíveis tecnológicos vêm da venda do produto, da venda de serviços de assinatura com análise dos dados ou da venda dos dados para terceiros com fins de *marketing* pois os dados coletados revelam informações detalhadas sobre necessidades e interesses dos usuários.

6.5.8 COMPETIÇÃO COM APARELHOS PORTÁTEIS

O monitoramento constante pode ser um incômodo. Os aparelhos portáteis também são desenvolvidos para cumprirem funções de aumento da densidade dos dados e teriam como vantagem a menor exposição a risco no campo provocados por impactos e poeiras, as limitações dos portáteis frente aos vestíveis são muitas como a questão de ocupar as mãos, uso por períodos específicos ou o deslocamento ou interrompimento do trabalho para medir os parâmetros no ambiente de trabalho.

Outra possibilidade em aberto e em desenvolvimento é o monitoramento portátil com o uso de VANT's que poderiam ser programados para fazerem sobrevoos carregando sensores de medições ambientais nas frentes de trabalho como forma de auditar os dados.

6.6 PRINCIPAIS CONCLUSÕES DA ANÁLISE *SWOT*

A escolha dos registros em cada campo da análise *SWOT* (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças) escolhidas foi baseada no levantamento de literatura e pode mudar entre os campos à medida que ocorrem progressos computacionais, melhorias de materiais, tecnologias e nas discussões sobre o uso de dispositivos vestíveis tecnológicos nos ramos industriais.

Outra ressalva apontada por Fernandes (2012) é sobre o número de fatores da matriz dependente da complexidade da organização e da necessidade de delimitar a envoltória dos ambientes previstos, ou seja, a análise *SWOT* é funcional e intuitiva, mas traz um pouco de subjetivismo.

Os pontos fracos somados às ameaças são grandes barreiras para uma maior difusão e implantação do seu uso na mineração de forma mais ampla principalmente nas possibilidades dos aspectos de monitoramento fisiológico com riscos à privacidade e pouca clareza nos questionamentos sobre o pertencimento, análises, uso e segurança dos dados coletados.

Essa questão dos dados e privacidade somadas à negociação dos cenários de implantação entre os envolvidos (trabalhadores, empresas, sindicatos e governos) pode se tornar uma discussão delicada e com o avanço lento para acomodar os interesses e para

proteger de forma adequada todas as partes envolvidas. Outro cenário possível seria a implantação de forma desregulada, mas uma exposição dos dados envolvendo empresas com grande visibilidade ou até mesmo adulteração dos dados por falha ou invasão do sistema, poderia ocasionar o travamento das possibilidades no monitoramento com dispositivos vestíveis tecnológicos.

O mercado de dispositivos vestíveis tem forte presença das grandes empresas de tecnologia, mas existe bastante espaço para empresas novas que podem criar produtos para nichos como o industrial que demanda soluções e suportes mais dedicados. A concorrência e aumento do mercado tendem a aumentar a competição e incentivam o desenvolvimento de soluções para amenizar os pontos fracos presentes hoje.

As oportunidades mostram que mesmo que ainda não se tenha um custo-benefício tão atraente, dispositivos como óculos de R.A. e R.V. permitem ganhos de segurança, com registro e realização de procedimentos de forma muito mais vantajosa do que a maneira convencional com o trabalhador exposto no campo. A mesma vantagem pode ser observada com aplicação dos óculos especiais para treinamentos e educação.

O monitoramento ambiental com dispositivos vestíveis tecnológicos, principalmente nas medições de qualidade do ar, é outra oportunidade interessante que pode trazer ganhos para o trabalhador com o ambiente mais bem projetado e com suporte de segurança ao seu alcance o tempo todo. Se conseguir somar dados ambientais com o rastreamento o monitoramento trará muita riqueza de informações e a descoberta e entendimento em detalhes.

6.7. RESULTADOS DA ANÁLISE DE LITERATURA

Este subitem traz as respostas sobre a questão de pesquisa número dois: Quais são as publicações que relacionam o uso de dispositivos vestíveis tecnológicos na mineração? No total foram encontrados 45 artigos que tratam especificamente das questões sobre dispositivos vestíveis tecnológicos na mineração. A lista completa dos artigos pode ser consultada no apêndice.

A tabela a seguir aponta a distribuição dos temas por dispositivos.

Tabela 01: Relação entre artigos de mineração e quantidade de artigos.

Tipo de dispositivo vestível	Quantidade de artigos
Capacete	25
Óculos de R.A. e R.V.	2
Faixa na cabeça (ECG)	1
Portátil acoplado	3
Pulseira e relógios	1
Etiquetas RFID	1
Não descrito de forma específica	11
Total	45

Fonte: o próprio autor (2022).

Os autores Mardanova e Choi (2018) trazem uma análise geral das possibilidades da aplicação de dispositivos vestíveis tecnológicos na mineração, sendo o texto mais citado com relação com essa temática. Partindo-se dele buscou-se ampliar e atualizar a pesquisa sobre vestíveis e mineração. Os objetivos iniciais propostos nessa dissertação, trazem também um aprofundamento das implicações sobre a adoção dos dispositivos vestíveis tecnológicos.

Os artigos que não tratam de forma específica sobre nenhum tipo de dispositivo reportam: o panorama dos dispositivos vestíveis, segurança e as tecnologias no setor mineral, problemas referentes a IoT, comunicação e arquitetura relacionados aos dispositivos vestíveis tecnológicos.

Os artigos em sua maioria são experimentais, total de 37 (82%) com a proposta de protótipos de capacetes, uma pulseira para medir sinais vitais e soluções de arquitetura e rede envolvendo dispositivos vestíveis tecnológicos. O dispositivo ECG é descrito como uma placa com sensores montados sobre uma faixa em volta da cabeça e foi proposto por Kartsch *et al.* (2018) para monitorar o estado de sonolência e fadiga. Os autores apontam que nem toda a população apresenta os mesmos sinais de sonolência e fadiga e o dispositivo seria uma alternativa aos sistemas de monitoramento atualmente presentes em máquinas que utilizam câmeras de vídeo.

Observa-se que a área de desenvolvimento de capacetes inteligentes é o principal foco dos artigos. Todos os artigos sobre capacetes são do tipo projeto experimental, preferencialmente usam módulos de Arduíno para terem um baixo custo. Dentre as causas pelo interesse em desenvolver capacetes inteligentes pode-se pressupor que por ser um item obrigatório, teria um mercado maior a ser conquistado ao agregar tecnologias de monitoramento ambiental e fisiológico.

Sobre os artigos sobre que tratam de óculos de R.A. e R.V. temos Baek e Choi (2020) com a exibição de alertas de colisão, e D'Ângelo (2018), que aborda a manutenção de correias transportadoras dentro de uma mineradora. A temática de óculos de R.A. e R.V. na mineração é difícil de encontrar de forma específica, já que os dispositivos, aplicativos e estruturas ainda estão em estágio de experimentação e desenvolvimento. É provável que as soluções e descrições dos usos se desenvolvam dentro de grandes áreas como a manutenção, logística, construção civil para somente depois de provado o seu sucesso e benefícios serem testadas e adaptadas para setores como mineração.

Com relação ao ano de publicação dos artigos, o critério de datas não se aplicaria para artigos relacionados dentro da bibliografia revelada pelos critérios principais aplicados nos buscadores de dados científicos. Com isso em vista, surgem artigos sobre mineração e dispositivos vestíveis tecnológicos com a data de publicação anteriores a 2016. Os dispositivos relatados em anos anteriores a 2016 se enquadram na forma de dispositivos portáteis acoplados em partes do corpo ou no capacete e um artigo sobre a questão de arquitetura de rede para vestíveis. Nesses artigos não se tem menção à palavra *wearables*. A figura do gráfico a seguir relaciona os anos e a quantidade de artigos.

Figura 20 - Gráfico com a Quantidade de artigos e data de publicação.



Fonte: O próprio autor (2022).

O artigo mais antigo tem a data de 2009 e trata da tecnologia RFID, que tem se mostrado útil para monitoramento de caminhões, carregadeiras e até operadores de mina. Facilitam, portanto, controle e supervisão. O artigo descreve o caso de aplicação das etiquetas RFID em uma mina de carvão na China, Wanglou Mine. A inclusão do artigo, autoria de Sengupta *et al.* (2009), exemplifica muito bem como as etiquetas RFID nos capacetes ajudam no monitoramento e gerenciamento de segurança.

Takiff e Aiken (2010) tratam de um dispositivo portátil que pode ser carregado na cintura, portanto está na categoria vestível e permite o trabalhador ter as mãos livres, para medições nanopartículas de carbono elementar nas galerias de minas.

A preocupação com riscos de colisão não é recente, a busca por um sistema de detecção de operadores próximos de máquinas é relatada por Jobes *et al.* (2012). Os autores fazem experimentos com um operador portando um aparelho que alerta sobre a proximidade com a máquina.

O artigo de Shabina (2014) desenvolve três módulos (capacete, localizador e módulo de sala de controle) para localizar um trabalhador em uma mina. O último artigo que está fora do período de 2016 em diante, é de Mu *et al.* (2015) e os autores propõem uma estrutura de rede para o trabalhador portando dispositivos vestíveis.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A BUSCA DE LITERATURA

O fato das pesquisas de referência bibliográfica se basearem em apenas dois buscadores de banco de dados científicos, Google Acadêmico e Portal Capes, apoiados nos artigos relacionados nas leituras pode ter sido um impedimento para revelar um número maior de artigos sobre dispositivos vestíveis tecnológicos e mineração.

A proposta inicial foi obter uma amostra da literatura. Para alcançar o estado da arte demandaria mais tempo de pesquisa e maior apuração dentro de outros bancos de dados científicos com a inclusão de outras palavras-chave que não foram cobertas dentro dessa dissertação.

Os vestíveis industriais estão em desenvolvimento também para outras áreas industriais, e durante as pesquisas foram encontrados dispositivos que foram desenvolvidos para áreas como engenharia civil, manutenção e logística. A proposta de um protótipo ou a busca de uma solução nessas grandes áreas podem ser adaptadas para a mineração, já que algumas dessas áreas compartilham funções e tarefas análogas que envolvem o mesmo grau de risco e segurança.

A busca por referencial bibliográfico encontrou um total de 16 artigos que revisaram a literatura sobre dispositivos vestíveis tecnológicos sobre diversos aspectos que podem ser consultados no apêndice B. Esse número relativamente alto de artigos cobrindo o estado da arte, foi outro fator que influenciou a tomada de decisão por manter dois buscadores de banco de dados científicos.

A busca de literatura na língua portuguesa retoma a poucos resultados que tenham como foco o aspecto industrial e mineral. As publicações em sua maioria são voltadas para aspectos de saúde, bem-estar e debates sobre a privacidade. Os destaques da literatura sobre a temática dispositivos vestíveis cabem a Santos (2020), com o desenvolvimento de um aparelho vestível versátil de baixo custo para medição da qualidade do ar na mineração subterrânea e a, D'Ângelo (2018) com o desenvolvimento do óculos de R.A. para inspeções

de correias de uma mineradora. Alguns outros autores brasileiros optaram por publicar os artigos em língua inglesa.

De forma geral, os autores que não fizeram a escolha da palavra-chave *wearables*, ou seu protótipo descrito, mesmo que seja do tipo dispositivo vestível e teve sua publicação antes de 2016 dificilmente vai contê-la por ser o tipo de palavra aplicada em um contexto mais recente.

Alguns artigos na área de monitoramento ambiental podem estar situados em uma zona pouco clara entre a possibilidade de se tratar um dispositivo vestível ou de ser dispositivo portátil e podem não ter sido captados dentro da busca de amostra de literatura.

7.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS DISPOSITIVOS VESTÍVEIS

Os dispositivos vestíveis tecnológicos já são uma realidade dentro da aplicação do contexto industrial, e se mostram úteis para o setor mineral com alguns relatos de testes em campo. Entretanto a maioria dos artigos está na categoria de protótipos, mas cabem algumas considerações para os dispositivos específicos, como pulseiras, capacetes e óculos de R.A. e R.V.

Romero *et al.* (2016) apresenta as tipologias do operador 4.0 em seus futuros locais de trabalho de fábrica (vide figura 21), de uma perspectiva social. Dentre as possibilidades de tipologias de um novo operador dos sistemas fabris tecnológicos descritos estão todas muito relacionadas com o uso de dispositivos vestíveis tecnológicos nas suas diversas possibilidades.

Um operador 4.0 pode fazer uso de um exoesqueleto para obter uma super força na execução de tarefas, ampliar seu poder de intervenção nas operações com os sentidos ampliados. Outra possibilidade que está se desenvolvendo rapidamente após a pandemia da COVID-19 é o uso de operador virtual, que trabalha de forma remota. Ainda dentro das possibilidades de trabalho remoto/colaborativo e social temos a inserção de trabalhadores mais experientes na análise e sugestões de melhorias de processos e projetos por meio de ferramentas como fóruns e salas virtuais de reuniões.

Um operador com mais ferramentas virtuais ou físicas capazes de captar dados ou de visualizá-las em tempo real permite tornar viável um operador mais analítico, capaz de simular processos e intervir no processo de forma mais eficiente.

Figura 21 - Tipologia dos operadores de uma indústria 4.0 – a) Operador com super força. b) Operador ampliado c) Operador virtual d) Operador saudável e) Operador inteligente f) Operador colaborativo g) Operador social g) Operador analítico.



Fonte: Romero *et al.* (2016).

O operador mais saudável, segundo Romero *et al.* (2016), é também uma das expectativas geradas com o uso dos dispositivos vestíveis tecnológicos. Um operador mais saudável possui maior controle do estresse, maior nível de satisfação e com isso tem maior capacidade de entregar níveis maiores de produtividade maior. De uma forma geral o uso de pulseiras e relógios no âmbito industrial poderia detectar condições fisiológicas, ambientais e rastreabilidade portanto, são multifunções.

O preço dos dispositivos de pulso vem caindo rapidamente, a disposição dos fabricantes por desenvolver e agregar novas funções é intensa, mas o interesse de desenvolver produtos específicos para a área industrial não é percebida na literatura de forma clara. A

aplicação das pulseiras no contexto industrial e mineral se mostra incerta pois o número de casos relatados de pulseiras e relógios inteligentes no ambiente de trabalho é reduzido.

Os capacetes inteligentes se mostram também capazes de agregar um número de funções até mais alto que o das pulseiras e relógios, com destaque para a capacidade de medição da qualidade do ar que é especialmente útil para a mineração subterrânea. O capacete inteligente tem a vantagem de ser um item obrigatório na área mineral, o que o tornaria mais fácil de inserir para um imediato uso.

O desenvolvimento de tecnologias de R.V. e R.A. beneficia muito a mineração pois além da questão dos projetos visualizados em 3D, há também muitas informações geoespaciais que precisam ser processadas e analisadas. Até o presente momento não houve necessidade ou justificativa de investimento mais abrangente na mineração para que as projeções de dados geoespaciais passassem a ser exibidas na forma 3D com auxílio de óculos de R.V. ou em salas imersivas, como já ocorre dentro da área petrolífera, tendo a sua apresentação de dados em telas de computadores como satisfatória para o planejamento das etapas de prospecção e lavra.

Ainda segundo D'Ângelo (2018) os óculos de R.A. e R.V. possuem dois problemas principais que dificultam o desenvolvimento e adoção de forma ampla na indústria que são o seu custo elevado e problemas de experiência do usuário como conforto, campo de visão limitado, latência de renderização e dificuldades de calibração.

Os projetos e ideias conceituais de uso de óculos de R.V. e R.A. ainda encontram barreiras de robustez e conforto para o uso contínuo por um período prolongado, mas não há dúvidas que os óculos vão ter implicações importantes para o desempenho homem/ tarefa bem como para a segurança e saúde ocupacional (KIM, 2016).

Os óculos de R.V. e R.A. possuem uma faixa de preço superior em relação a pulseiras e capacetes inteligentes por serem mais complexos na sua construção e desenvolvimento. Ao menos no curto e médio prazo a sua aplicação deve ficar restrita a execução de tarefas especiais que são executadas por alguns poucos trabalhadores. Dessa forma, a inserção de óculos traz muitos benefícios mesmo que o custo seja alto. Uma boa perspectiva, é que à medida que aumenta o poder de processamento e conseqüentemente o poder da R.V. ocorre uma redução de preço e um aumento das aplicações industriais.

A combinação de VANT's somados com a visualização em tempo real, com sensores portáteis e exibição de parâmetros em óculos de R.A. permite inspeções em grandes áreas ou em locais insalubres e também o seu registro. Os VANT's estão sendo aplicados dentro da mineração subterrânea e o uso de óculos R.A. permite fazer inspeções geotécnicas e medições dentro dos realces de lavra de forma inovadora e segura.

Por fim o uso de R.V. em treinamentos e para fins educacionais traz muitos benefícios com facilidades de visualização de cenários e compreensão dos processos. Treinamentos inadequados e baixa qualificação são a principal causa de acidentes na mineração, a simulação em ambientes virtuais pode reduzir lesões e perdas operacionais por mau uso no setor mineral (KIZIL *et al.* 2003).

7.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MONITORAMENTO FISIOLÓGICO

Os dispositivos vestíveis tecnológicos permitem o monitoramento contínuo do estado fisiológico do trabalhador, ou seja, inferir o estado de saúde de forma inédita. Foi percebido que o monitoramento contínuo pode criar um novo paradigma nas questões entre empresa e trabalhador. Até onde a empresa deve se envolver com soluções ou problemas de saúde de cunho individual? Mesmo que os dados não permitam a identificação do funcionário, corre-se o risco de ocorrer um vazamento de dados ou da identificação do funcionário pelo cruzamento de dados.

A implantação de um monitoramento contínuo além da questão de custo, depende de fatores como aceitação por parte dos operários, conforto ao usar o dispositivo, garantia da privacidade e outros fatores. Os dados e as informações geradas devem ser transparentes para o funcionário, as garantias de segurança e privacidade sobre os seus dados devem ser bem compreendidas incluindo questões de quem ficará com os dados e por quanto tempo.

Dentro das empresas há uma preocupação cada vez maior em relação a saúde e bem-estar do funcionário, a prática de exercícios ajuda a combater problemas como ansiedade e alívio de estresse. Algumas empresas já buscaram esses objetivos com a implantação de programas de ginástica laboral ou realizando convênios com academias.

Outra situação que já emerge em alguns países industrializados é o envelhecimento da população e o aumento da idade de aposentadoria especialmente na Europa e no Japão, o que

traz desafios adicionais para as empresas (Romero *et al.* 2016). As faixas etárias mais avançadas demandam maiores atenções com relação a ergonomia e saúde, e são pontos que permitem a inserção dos dispositivos vestíveis tecnológicos com ganhos para trabalhador e para empresa.

A Finlândia implantou um programa piloto primário de prevenção primária nas empresas para incentivar os funcionários a ter uma vida mais saudável. Os programas de prevenção primária estimulam atividades físicas, melhorias na dieta para desta forma impactar na saúde e bem-estar no local do trabalho com efeitos sobre a saúde mental, criatividade e produtividade. Segundo Nikayin *et al.* (2014) os empregadores da Finlândia são legalmente obrigados a oferecer cuidados de saúde ocupacional preventivos aos seus empregados. Uma melhoria na saúde levaria a uma redução com despesas de saúde e poderia integrar de forma mais inclusiva trabalhadores com faixas etárias maiores.

O programa piloto foi elaborado e incentivado pelo governo e deveria ser executado pelos planos de saúde empresariais e iniciou-se em 2011 com o objetivo de implementar a prescrição de atividades físicas para os funcionários. Os dados coletados e sua análise ficavam em uma plataforma no qual as empresas não tinham acesso eliminando assim a preocupação de discriminação dos funcionários no local de trabalho.

Os autores detalham as etapas do programa, que se inicia com a etapa de consulta com a realização de *check-up* médico. O funcionário leva os exames para um farmacêutico que avalia o bem-estar do funcionário e os exames laboratoriais, e prescreve orientações sobre atividades físicas. A cada 3 meses o funcionário faz um novo *check-up* e o farmacêutico orienta e planeja os próximos passos. Os exercícios podem ser adaptados com foco em grupos específicos como no gerenciamento do estresse ou controle de peso.

Os dados das atividades físicas feitas são coletados por meio de diversos dispositivos vestíveis (pedômetros, pulseiras e balanças de bioimpedância) e transmitidas em tempo real para a plataforma digital na internet e ficam acessíveis para o farmacêutico, governo e funcionário. Para as outras partes interessadas nos dados de saúde como organizações patronais, empresas farmacêuticas, de seguros e autoridades os dados são visualizados no nível agregado como por exemplo, por ocupação ou grupos etários. Com a disponibilização dos dados novas oportunidades de negócios podem surgir assim como também promoção da imagem de empresas e incentivo às atividades físicas.

A plataforma dos dados também pode agregar serviços adicionais de orientações nutricionais, mas os autores ressaltam que a disponibilização de dados ou venda para terceiros deve ser feita de forma criteriosa e o próprio funcionário é quem deve decidir quem pode acessar e quais dados serão disponibilizados.

O programa piloto implantado na Finlândia mostra que essas questões de saúde devem ser abordadas envolvendo médicos, planos de saúde e governo, a empresa deve ter apenas um papel secundário. O uso de dispositivos vestíveis tecnológicos poderia promover mudanças positivas no estilo de vida e economia de tempo e dinheiro em consultas médicas e problemas como depressão e obesidade são cada vez mais comuns dentro das empresas.

O patamar sobre o monitoramento da saúde com os dispositivos vestíveis tecnológicos poderia se elevar de forma obscura, se não for debatido em profundidade, tanto para o trabalhador, quanto para empresa ou ainda para terceiros que tenham acesso a esses dados. A educação digital passa pelo entendimento dos benefícios e riscos que ocorrem quando temos os dados coletados por meios digitais.

Em resumo o monitoramento fisiológico é uma oportunidade interessante que pode levar à descoberta de novos conhecimentos em diversos aspectos como estresse, programação de descansos com a inserção de intervalos nas jornadas de trabalho embasados em dados e permite a realização de experimentos que podem levar a um ambiente mais produtivo. O monitoramento de longo prazo pode trazer mais conhecimento sobre o desenvolvimento de doenças ocupacionais bem como meios de preveni-las. Tudo isso interessa de sobremaneira à mineração.

7.4 MINERAÇÃO 4.0. E OS VESTÍVEIS TECNOLÓGICOS INDUSTRIAIS

Bartnitzki (2017) afirma que a Indústria 4.0 precisa de um fornecimento de matéria prima confiável, sustentável e transparente para o seu processo produtivo, e sobre este prisma é feita a conexão entre a indústria 4.0 e a Mineração 4.0. Assim como há uma corrida pela liderança no setor de manufaturas incentivadas pelos países é possível observar iniciativas um pouco mais acanhadas para o setor extrativo em direção a uma mineração integrada e inteligente.

O produto da mineração é uma *commodity*. Então, ao se agregar tecnologia ao processo produtivo não eleva o preço recebido pelo minério, e isto torna de uma forma geral a mineração mais conservadora na adoção de inovações e novas tecnologias. Descrever tecnologias, buscar bons exemplos aplicados na mineração e em outros setores diminui a resistência e facilita a sua implementação. Esse estudo busca atuar nesse âmbito de descrição e exemplos aplicados com a implantação dos dispositivos vestíveis tecnológicos.

Segundo Bartos (2007) a mineração é um setor maduro e apresenta longos períodos de pouca inovação e de tempos em tempos descobre tecnologias disruptivas que elevam o patamar de produção, isso pode ser constatado comparando a produtividade média da mineração com outros setores. A mineração é intensiva de capital e seus equipamentos têm ciclo de vida longo, como pode ser observado nos equipamentos como caminhões, escavadeira e perfuratrizes. A decisão sobre novos investimentos é fortemente captada pela exploração geológica afinal a vida e garantia da mina vem do aperfeiçoamento do conhecimento sobre o depósito geológico.

Outros fatores que Bartos (2017) cita que contribuem para que inovação não seja tão atuante na mineração são: hierarquia mais rígida, baixa mobilidade dos profissionais. O lucro não é tão excepcional, a mineração está submetida a ciclos de demandas que quebram o ciclo de investimentos.

Os dispositivos vestíveis tecnológicos são parte integrantes das proposições de um novo ambiente de produção industrial e o avanço e implantação dessas tecnologias em outros setores produtivos como nas manutenções preventivas e na logística de forma bem sucedida tendem a migrar para o setor mineral também. Segundo Romero et al. (2016) todo potencial da Indústria 4.0 e a conquista de um processo produtivo socialmente sustentável só serão alcançados se o ser humano estiver interagindo de forma física e cognitiva com as máquinas.

A complexidade e sofisticação industrial, e por extensão aplicada nos setores extrativos como a mineração, permitem auferir ganhos nas esferas de segurança, produção, controle e qualidade dos produtos. Um operador aumentado, como proposto por Krupitzer *et al* (2020), dotado de vestimentas tecnológicas permitiria aproximar e integrar o trabalhador para atuar nesse novo ambiente produtivo reagindo e corrigindo em situações não previstas pela crescente automação e controle dos processos, enxergar pontos de melhoria e fazer alocações dinâmicas em ambientes incertos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADJISKI, Vancho *et al.* - System architecture to bring smart personal protective equipment wearables and sensors to transform safety at work in the underground mining industry. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, v. 34, n. 1, p. 37-44, 2019.

AHMED, S. N., GAGNON, J. D., MAKHDOOM, M. N., NAEEM, R., & WANG, J. New methods and equipment for three-dimensional laser scanning, mapping and profiling underground mine cavities. In: *Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*. Australian Centre for Geomechanics, p. 467-473, 2017.

AL MAMUN, Md Abdulla; YUCE, Mehmet Rasit. Sensors and systems for wearable environmental monitoring toward IoT-enabled applications: A review. *IEEE Sensors Journal*, v. 19, n. 18, p. 7771-7788, 2019.

AL-EIDAN, Rasha M.; AL-KHALIFA, Hend; AL-SALMAN, Abdul Malik. A review of wrist-worn wearable: sensors, models, and challenges. *Journal of Sensors*, v. 2018, 2018.

AL MAMUN, Md Abdulla; YUCE, Mehmet Rasit. Sensors and systems for wearable environmental monitoring toward IoT-enabled applications: A review. *IEEE Sensors Journal*, v. 19, n. 18, p. 7771-7788, 2019.

AMAZON. Amazon.com: Online Shopping for Electronics, Apparel, Computers, Books, DVDs & more. Disponível em: <<https://www.amazon.com>>, acessado em 19/04/2022.

AMORIM, Vicente JP; OLIVEIRA, Ricardo AO; DA SILVA, Mauricio Jose. Recent Trends in Wearable Computing Research: A Systematic Review. *arXiv preprint arXiv:2011.13801*, 2020.

ANAYA, LH Segura *et al.* Ethical implications of user perceptions of wearable devices. *Science and engineering ethics*, v. 24, n. 1, p. 1-28, 2018.

ANGRISANI, Leopoldo *et al.* A wearable brain-computer interface instrument for augmented reality-based inspection in industry 4.0. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 69, n. 4, p. 1530-1539, 2019.

ARBIX, Glauco *et al.* O Brasil e a nova onda de manufatura avançada: o que aprender com Alemanha, China e Estados Unidos. *Novos estudos CEBRAP*, v. 36, p. 29-49, 2017.

ATIF, Iqra; CAWOOD, Frederick Thomas; MAHBOOB, Muhammad Ahsan. The Role of Digital Technologies that Could Be Applied for Prescreening in the Mining Industry During the COVID-19 Pandemic. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, v. 5, n. 4, p. 663-674, 2020.

AWOLUSI, Ibukun; MARKS, Eric; HALLOWELL, Matthew. Wearable technology for personalized construction safety monitoring and trending: Review of applicable devices. *Automation in construction*, v. 85, p. 96-106, 2018.

BAEK, Jieun; CHOI, Yosoon. Bluetooth-beacon-based underground proximity warning system for preventing collisions inside tunnels. *Applied Sciences*, v. 8, n. 11, p. 2271, 2018.

BAEK, Jieun; CHOI, Yosoon. Smart glasses-based personnel proximity warning system for improving pedestrian safety in construction and mining sites. *International journal of environmental research and public health*, v. 17, n. 4, p. 1422, 2020.

BARTNITZKI, Thomas. Mining 4.0-importance of industry 4.0 for the raw materials sector. *Artificial Intelligence*, v. 2, p. M2M, 2017.

- BARTOS, Paul J. Is mining a high-tech industry?: Investigations into innovation and productivity advance. *Resources Policy*, v. 32, n. 4, p. 149-158, 2007.
- BEHR, C. J.; KUMAR, Anuj; HANCKE, Gerhard P. A smart helmet for air quality and hazardous event detection for the mining industry. In: 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, p. 2026-2031, 2016.
- BONATO, Raquel Kahan. Revisão bibliográfica em realidade virtual e modelagem 3D aplicada à engenharia civil e à exploração e produção de petróleo e gás natural. 2015.
- BORGHI, Francesca *et al.* Miniaturized monitors for assessment of exposure to air pollutants: A review. *International journal of environmental research and public health*, v. 14, n. 8, p. 909, 2017.
- BOSTON, GROUP, Global Management Consulting | Strategy Consultants | BCG, Brazil - PT, disponível em: <<https://www.bcg.com/pt-br/>>. Acesso em: 19/04/2022
- CAMPERO-JURADO, Israel *et al.* Smart helmet 5.0 for industrial internet of things using artificial intelligence. *Sensors*, v. 20, n. 21, p. 6241, 2020.
- CESÁRIO NETO, Euler Daltro. Os impactos da Indústria 4.0 na mineração. Tese de Mestrado UFU – Universidade Federal de Uberlândia, 2019.
- CHOI, Byungjoo; HWANG, Sungjoo; LEE, SangHyun. What drives construction workers' acceptance of wearable technologies in the workplace?: Indoor localization and wearable health devices for occupational safety and health. *Automation in Construction*, v. 84, p. 31-41, 2017.
- CHOI, Yosoon; KIM, Yeanjae. Applications of Smart Helmet in Applied Sciences: A Systematic Review. *Applied Sciences*, v. 11, n. 11, p. 5039, 2021.
- CHOUDHARY, Prakash *et al.* A survey paper on drowsiness detection & alarm system for drivers. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 3, n. 12, p. 1433-1437, 2016.
- D'ANGELO, Thiago. Desenvolvimento de dispositivos vestíveis de realidade aumentada de baixocusto para indústria 4.0. 2018. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- DEHGHANI, Milad; DANGELICO, Rosa Maria. Smart wearable technologies: state of the art and evolution over time through patent analysis and clustering. *International Journal of Product Development*, v. 22, n. 4, p. 293-313, 2018.
- DEOKAR, S. R.; WAKODE, J. S. Coal mine safety monitoring and alerting system. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 4, n. 03, 2017.
- DEWARKAR, Akshita *et al.* Smart device for security of coal mine workers. *Int. J. Innov. Res. Technol*, v. 5, p. 351-353, 2019.
- DHANALAKSHMI, A.; LATHAPRIYA, P.; DIVYA, K. A Smart Helmet for Improving Safety in Mining Industry. *International Journal of Innovation Science and research Technology (IJISRT)*, v. 2, n. 3, 2017.
- DIAN, F. John; VAHIDNIA, Reza; RAHMATI, Alireza. Wearables and the Internet of Things (IoT), applications, opportunities, and challenges: A Survey. *IEEE Access*, v. 8, p. 69200-69211, 2020.
- DJI. FPV Drones: Everything You Need to Get Started. DJI Guides. Disponível em: <<https://store.dji.com/guides/fpv-drones/>>. Acesso em 19/04/2022.

DUQUE, Thatiane Mendes. Sob a pele e a roupa: computação vestível como marca de intimidade e memória. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais; Programa de Pós-Graduação em Artes; UFMG; Brasil; EBA–Departamento De Artes Plásticas. 2019

DURRANT-WHYTE, Hugh *et al.* How digital innovation can improve mining productivity. McKinsey & Company Insights, p. 1-8, 2015.

ELDEMERDASH, Tarek *et al.* IoT Based Smart Helmet for Mining Industry Application. *Int. J. Adv. Sci. Technol*, v. 29, n. 1, p. 373-387, 2020.

ELOKON. Sicherheits- und Assistenzsysteme für die Industrie. ELOKON Gruppe. Disponível em: <<https://www.elokon.com>>. Acesso em: 19/04/2022.

EVERS, Maren; KRZYWDZINSKI, Martin; PFEIFFER, Sabine. Designing wearables for use in the workplace: the role of solution developers. WZB Discussion Paper, 2018.

FERNANDES, Djair Roberto. Uma visão sobre a análise da Matriz SWOT como ferramenta para elaboração da estratégia. *Revista de Ciências Jurídicas e Empresariais*, v. 13, n. 2, 2012.

Flyability. Elios 2 - Indoor drone for confined space inspections. www.flyability.com. Disponível em: <<https://www.flyability.com/elios-2>>. Acesso em 19/04/2022.

FORSYTH, Jason B. *et al.* Feasibility of intelligent monitoring of construction workers for carbon monoxide poisoning. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, v. 9, n. 3, p. 505-515, 2012.

GHADYANI, Daniyal *et al.* Real-Time Monitoring and Alarm System in Underground Coal Mines Using Smart Helmets (A Case Study: Tabas Coal Mine). 2021.

Guardhat. Disponível em: <<https://www.guardhat.com/hc1-communicator>>. Acesso em: 19 abr. 2022.

HARSHITHA, K. *et al.* ZigBee based intelligent helmet for coal miners safety purpose. *Int. J. Innov. Technol*, v. 6, p. 403-406, 2018.

HAZARIKA, Pranjal. Implementation of smart safety helmet for coal mine workers. In: 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). IEEE, p. 1-3, 2016.

IoT Module GCY 500-1. Disponível em: <https://lora-alliance.org/lora_products/iot-module-gcy-500-1/>. Acesso em: 19 abr. 2022.

IDC - Mercado de wearables cresce no 1º trimestre, mas IDC Brasil alerta para o avanço do grey market - The premier global market intelligence company, disponível em: <https://bityli.com/enWyH>, acesso em: 8 Feb. 2022.

JANG, Hyongdo; TOPAL, Erkan. Transformation of the Australian mining industry and future prospects. *Mining Technology*, v. 129, n. 3, p. 120-134, 2020.

JOBES, C. C.; CARR, J. L.; DUCARME, J. P. Evaluation of an advanced proximity detection system for continuous mining machines. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 7, n. 6, p. 649-671, 2012.

KAMIŠALIĆ, Aida *et al.* Sensors and functionalities of non-invasive wrist-wearable devices: A review. *Sensors*, v. 18, n. 6, p. 1714, 2018.

KARTSCH, Victor *et al.* A wearable EEG-based drowsiness detection system with blink duration and alpha waves analysis. In: 2017 8th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER). IEEE, p. 251-254, 2017.

- KARTSCH, Victor Javier *et al.* A sensor fusion approach for drowsiness detection in wearable ultra-low-power systems. *Information Fusion*, v. 43, p. 66-76, 2018.
- KHAKUREL, Jayden; MELKAS, Helinä; PORRAS, Jari. Tapping into the wearable device revolution in the work environment: a systematic review. *Information Technology & People*, 2018.
- KIM, Sunwook; NUSSBAUM, Maury A.; GABBARD, Joseph L. Augmented reality “smart glasses” in the workplace: industry perspectives and challenges for worker safety and health. *IEEE transactions on occupational ergonomics and human factors*, v. 4, n. 4, p. 253-258, 2016.
- KITCHENHAM, Barbara; CHARTERS, Stuart. Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. Technical Report EBSE 2007-001, Keele University and Durham University Joint Report, 2007.
- KIZIL, M. S.; KERRIDGE, A. P.; HANCOCK, M. G. Virtual Reality Applications in the Australian Minerals Industry. 31st Int. In: Symposium on Computer Applications in the Minerals Industries Held under the auspices of the South African Institute of Mining and Metallurgy. p. 14-16, 2003.
- Komatsu Forest. Disponível em: <<https://www.komatsuforest.com.br>>. Acesso em: 19 abr. 2022.
- KONG, Xiang TR *et al.* Industrial wearable system: the human-centric empowering technology in Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 30, n. 8, p. 2853-2869, 2018.
- KONG, Xiang TR *et al.* The impact of industrial wearable system on industry 4.0. In: 2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). IEEE, p. 1-6, 2018.
- KRUPITZER, Christian *et al.* A Survey on Human Machine Interaction in Industry 4.0. arXiv preprint arXiv:2002.01025, 2020.
- Leonida, Carly. “Battery Power.” Disponível em: <https://bityli.com/aiggn> Acesso em: 10 Feb. 2022.
- KUMAR, K. KRANTHI; PRIYANKA, G. A Smart Helmet for Air Quality and Hazardous Event Detection for the Mining Industry. 2017.
- LASKIER, Rafael. Modernizing the mining industry with the internet of things. *Internet of Things and Data Analytics Handbook*, p. 521-543, 2017.
- LI, Jian-guo; ZHAN, Kai. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment. *Engineering*, v. 4, n. 3, p. 381-391, 2018.
- LI, Na; HOPFGARTNER, Frank. To log or not to log? swot analysis of self-tracking. In: *Lifelogging*. Springer VS, Wiesbaden, p. 305-325, 2016.
- LI, Xian *et al.* A wearable system for situational awareness estimation in underground mines. In: 2018 IEEE/ACM International Conference on Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies (CHASE). IEEE, p. 31-32, 2018.
- LING, Yunzhi *et al.* Disruptive, soft, wearable sensors. *Advanced Materials*, v. 32, n. 18, p. 1904664, 2020.
- LITVINENKO, V. S.; SERGEEV, I. B. Innovations as a Factor in the Development of the Natural Resources Sector. *Studies on Russian Economic Development*, v. 30, n. 6, p. 637-645, 2019.
- LIU, Tianchi. Application of Wearable Devices in Construction Safety and Worker Occupational Health. *International Core Journal of Engineering*, v. 7, n. 5, p. 253-260, 2021.

LONGO, Francesco; NICOLETTI, Letizia; PADOVANO, Antonio. Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context. *Computers & industrial engineering*, v. 113, p. 144-159, 2017.

LORA ALLIANCE – Disponível em fonte: <https://lora-alliance.org>, Acesso em 17/04/2022:

LU, Huimin *et al.* BrainNets: Human emotion recognition using an Internet of Brian Things platform. In: 2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). IEEE, 2018. p. 1313-1316.

MAAG, Balz; ZHOU, Zimu; THIELE, Lothar. W-air: Enabling personal air pollution monitoring on wearables. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, v. 2, n. 1, p. 1-25, 2018.

MARCENGO, Alessandro; RAPP, Amon. Visualization of human behavior data: the quantified self. In: *Innovative approaches of data visualization and visual analytics*. IGI Global, 2014. p. 236-265.

MARDONOVA, Mokhinabonu; CHOI, Yosoon. Review of wearable device technology and its applications to the mining industry. *Energies*, v. 11, n. 3, p. 547, 2018.

MARTIN, Alexis; VOIX, Jérémie. In-ear audio wearable: Measurement of heart and breathing rates for health and safety monitoring. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 65, n. 6, p. 1256-1263, 2017.

MAURTUA, I. *Wearable Technology in Automotive Industry: from Training to Real Production*. [s.l.] IntechOpen, 2009.

MESQUITA, Pedro Paulo Dias; CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; OGANDO, Laura Duarte. *Desenvolvimento e inovação em mineração e metais*. 2016.

MINARI, G. Exoesqueleto dá superforça e transforma soldados de Taiwan em “homens de ferro”. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/inovacao/exoesqueleto-da-superforca-e-transforma-soldados-de-taiwan-em-homens-de-ferro-200887/>>. Acesso em: 19 jul. 2022.

MORAWSKA, Lidia *et al.* Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment international*, v. 116, p. 286-299, 2018.

MU, Qi; WANG, Tanghong; JIA, Yikai. Research on framework of underground wearable devices framework based on cloud computing. In: 2015 8th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). IEEE, p. 458-461, 2015.

NAFUS, Dawn. *The data economy of biosensors. Sensor technologies: Healthcare, wellness and environmental applications*. New York: Springer, p. 137, 2013.

NALEPA, Grzegorz J.; BRZYCHCZY, Edyta; BOBEK, Szymon. On the Opportunities for Using Mobile Devices for Activity Monitoring and Understanding in Mining Applications. In: *International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning*. Springer, Cham, p. 75-83, 2018.

NIKAYIN, Fatemeh *et al.* Workplace primary prevention programmes enabled by information and communication technology. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 89, p. 326-332, 2014.

NIKNEJAD, Naghmeh *et al.* A comprehensive overview of smart wearables: The state of the art literature, recent advances, and future challenges. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 90, p. 103529, 2020.

NIKULIN, Andrei; IKONNIKOV, Dmitry; DOLZHIKOV, Iliya. Smart personal protective equipment in the coal mining industry. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, v. 10, n. 4, p. 852-863, 2019.

NOORIN, Maviya; SUMA, K. V. IoT based wearable device using WSN technology for miners. In: 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT). IEEE,. p. 992-996, 2018.

NOSIROV, Kh *et al.* THE ROLE OF SMART TECHNOLOGIES IN ENSURING THE SAFETY OF MINERS IN MINING EMERGENCIES. In: Archive of Conferences.p. 20-22, 2021.

PARK, JeeWoong *et al.* Performance test of wireless technologies for personnel and equipment proximity sensing in work zones. Journal of Construction Engineering and Management, v. 142, n. 1, p. 04015049, 2016.

PRABHU, P. Umang; Jayakumar, J.; Kumar, CP Intelligent Wearable Device for Coal Miners. Int. J. Eng. Technol, v. 7, p. 677-680, 2018.

RANJAN, Alok *et al.* Opportunities and challenges in health sensing for extreme industrial environment: perspectives from underground mines. IEEE Access, v. 7, p. 139181-139195, 2019.

ROCHA, Maria Clara, O que é análise SWOT e qual a sua importância? %, FGV Jr., disponível em: <https://bityli.com/aAxgV> ,acesso em: 8 Feb. 2022.

RATHOD, Subhash *et al.* Smart Helmet for Detection of Unsafe Events in Mining Industry Based on IoT. EasyChair, 2021.

REVINDRAN, Rohith; VIJAYARAGHAVAN, Hansini; HUANG, Mei-Yuan. Smart helmets for safety in mining industry. In: 2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). IEEE, p. 217-221, 2018.

ROJA, P.; SRIHARI, D. Iot based smart helmet for air quality used for the mining industry. Int. J. Res. Sci. Eng. Technol, v. 4, p. 514-521, 2018.

SALAMONE, Francesco; MASULLO, Massimiliano; SIBILIO, Sergio. Wearable Devices for Environmental Monitoring in the Built Environment: A Systematic Review. Sensors, v. 21, n. 14, p. 4727, 2021.

SAMPAIO, Rosana Ferreira; MANCINI, Marisa Cotta. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. Brazilian Journal of Physical Therapy, v. 11, p. 83-89, 2007.

SANJAY, Bhagat Sagar *et al.* Smart helmet using zigbee. Int. J. Innov. Res. Technol, v. 6, p. 144-148, 2019

SANTOS, Rita de Cássia Pedrosa. – Tese de doutorado - Dispositivos Móveis Para Monitoramento de Ventilação Em Mina Subterrânea. Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.

SARKAR, Sayan; GHOSH, Aayushman; GHOSH, Shiuli Subhra. Study of Cardiorespiratory and Sweat Monitoring Wearable Architecture for Coal Mine Workers. In: 2020 Ieee Region 10 Conference (Tencon). Ieee, p. 355-360, 2020.

SAWANT, Pradeep *et al.* Arduíno Based Smart Helmet for Coal Mine Safety. In: 2nd International Conference on Communication & Information Processing (ICCIP). 2020.

SENEVIRATNE, Suranga *et al.* A survey of wearable devices and challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 19, n. 4, p. 2573-2620, 2017.

SENGUPTA, Arijit; SCHILLER, Shu; WANG, Licai. Saving Lives: The Case of RFID-Based Personnel Tracking in a Chinese Coal Mine. Production and Inventory Management Journal, v. 45, n. 1, p. 44, 2009

SHABINA, S. Smart helmet using RF and WSN technology for underground mines safety. In: 2014 International Conference on Intelligent Computing Applications. IEEE, 2014. p. 305-309.

- SHARMA, Mayank; MAITY, Tanmoy. Low cost low power smart helmet for real-time remote underground mine environment monitoring. *Wireless Personal Communications*, v. 102, n. 1, p. 149-162, 2018.
- SHAHMORADI, Javad *et al.* A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry. *Drones*, v. 4, n. 3, p. 34, 2020.
- SHRESTHA, Prakash; SAXENA, Nitesh. An offensive and defensive exposition of wearable computing. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, v. 50, n. 6, p. 1-39, 2017.
- SILVA, Mateus C. So ware and Hardware Requirements and Trade-Offs in Operating Systems for Wearables: A Tool to Improve Devices’.
- SILVA, Danielson *et al.* Realidade virtual aumentada aplicada como ferramenta de apoio ao ensino. *Tecnologias em Projeção*, v. 2, n. 1, 2011.
- STEFANA, Elena *et al.* Wearable Devices for Ergonomics: A Systematic Literature Review. *Sensors*, v. 21, n. 3, p. 777, 2021.
- SURIYAKRISHNAAN, K. *et al.* Smart Safety Helmet in Coal Mining Using Arduino. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, v. 12, n. 11, p. 5481-5486, 2021.
- SVERTOKA, Ekaterina; RUSU-CASANDRA, Alexandra; MARGHESCU, Ion. State-of-the-Art of Industrial Wearables: A Systematic Review. In: 2020 13th International Conference on Communications (COMM). IEEE, p. 411-415, 2020.
- SVERTOKA, Ekaterina *et al.* Wearables for Industrial Work Safety: A Survey. *Sensors*, v. 21, n. 11, p. 3844, 2021.
- TAKIFF, Larry; AIKEN, Geoffrey. A real-time, wearable elemental carbon monitor for use in underground mines. In: 13th United States/North Am. Mine Vent. Symp. p. 137-141, 2010.
- TALPUR, Mir Sajjad Hussain *et al.* Smart Helmet For Coal Mines Safety Monitoring With Mobile App.
- TELEDYNEOPETECH. Disponível em: Fonte:<https://www.teledyneoptech.com> Acesso em 17/04/2022:
- TIINSIDE, Mercado de wearables explode em 2020 e deve seguir crescendo em 2021, diz IDC Brasil, Tiinside Online, disponível em: <https://bitly.com/OUSDH> ., acesso em: 8 Feb. 2022.
- THE SMART HELMET. Disponível em: <<https://miningworld.com/the-smart-helmet/>>. Acesso em: 19 abr. 2022.
- TUDOCELULAR.COM. Epson cria óculos de realidade aumentada para setor da indústria. Disponível em: <<https://www.tudocelular.com/android/noticias/n56604/epson-oculos-realidade-aumentada-para-industria.html>>. Acesso em: 19 abr. 2022.
- TURNER, Christopher J. *et al.* Utilizing industry 4.0 on the construction site: Challenges and opportunities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 17, n. 2, p. 746-756, 2020.
- WANG, Yu-Hui; HSIEH, Chia-Ching. Explore technology innovation and intelligence for IoT (Internet of Things) based eyewear technology. *Technological forecasting and social change*, v. 127, p. 281-290, 2018.
- WANG, Yu-Hui; HSIEH, Chia-Ching. Explore technology innovation and intelligence for IoT (Internet of Things) based eyewear technology. *Technological forecasting and social change*, v. 127, p. 281-290, 2018.

WESSELS, Carina Helena *et al.* To IOT or not IOT: a critical analysis of the key legal considerations applicable in internet of things of implementations in the mining industry. 2016. Tese de Doutorado. University of Pretoria.

XIAMOI. Xiaomi Global Community —Xiaomi-mi.com. Disponível em: <<https://xiaomi-mi.com/>>. Acesso em: 19/04/2022

XUE, Yukang. A review on intelligent wearables: Uses and risks. *Human Behavior and Emerging Technologies*, v. 1, n. 4, p. 287-294, 2019.

APÊNDICE A - LITERATURA DOS ARTIGOS SOBRE MINERAÇÃO E VESTÍVEIS TECNOLÓGICOS

Autor	Ano	Breve comentário	Artigo de Revisão ou experimental?	Trata de algum wearable em específico?	Palavras-chave
ADJISKI, Vancho <i>et al.</i>	2019	Apresentaremos um protótipo de sistema que pode ser empregado em mineração subterrânea que utiliza sensores acoplados a roupas comuns de EPI, incluindo capacetes e óculos de segurança que são conectados a smartphones e <i>smartwatches</i> por meio de sensores Bluetooth, para fornecer - tempo de conscientização da situação de segurança e prever incidentes de saúde e segurança antes que eles ocorram.	Experimental	não	underground mining, PPE, IoT, sensors, safety at work
ATIF, Iqra; CAWOOD, Frederick Thomas; MAHBOOB, Muhammad Ahsan.	2020	Este artigo visa explorar a aplicação de tecnologias digitais inteligentes que podem ser aplicadas para detecção, pré-triagem e prevenção de COVID-19 na indústria de mineração.	Revisão	não	COVID-19 · Coronavírus · Pandemic · SARS-CoV-2 · Digital technology · Mining industry · Fourth Industrial Revolution (4IR)

BAEK, Jieun; CHOI, Yosoon.	2018	Foi proposto um sistema de alerta de proximidade baseado em beacon Bluetooth (PWS) capaz de prevenir colisões dentro de túneis subterrâneos. O PWS proposto recebe sinais de beacons Bluetooth acoplados aos corpos dos trabalhadores da mina e/ou seus equipamentos por meio de smartphones instalados nos veículos	experimental	capacete	underground tunnels; Bluetooth beacon; smartphone; safety management; App Inventor
BAEK, Jieun; CHOI, Yosoon.	2020	Um sistema de alerta de proximidade pessoal (PWS) baseado em óculos inteligentes foi desenvolvido para segurança de pedestres em locais de construção e mineração.	experimental	Óculos de R.A. e R.V.	
BEHR, C. J.; KUMAR, Anuj; HANCKE, Gerhard P.	2016	Foi desenvolvido um capacete inteligente capaz de detectar eventos perigosos na indústria de minas. No desenvolvimento do capacete, consideramos os três principais tipos de perigo, como qualidade do ar, remoção do capacete e colisão	experimental	capacete	air quality; mining; safety; wireless sensor networks; ZigBee
D'ANGELO, Thiago	2018	Este artigo investigou, sob o enfoque bibliográfico, a temática Realidade Virtual, com o objetivo de pesquisar o que é a realidade virtual, como surgiu e qual a finalidade desta tecnologia moderna	experimental	Óculos de R.A. e R.V.	

DEOKAR, S. R.; WAKODE, J. S.	2017	Neste projeto desenvolver um capacete inteligente para monitorar o nível de concentração de gases nocivos e eventos perigosos de minas de carvão e transmitir os dados para a estação base usando Zigbee	experimental	capacete	Zigbee, GSM, WSN, Miner Safety, Alert Switch.
DEWARKAR, Akshita <i>et al.</i>	2019	Projetamos um dispositivo para dar segurança aos trabalhadores contra os acidentes nas minas de carvão. Nós projetamos um capacete que funciona em três parâmetros. Consiste em dois sensores principais que são usados para detectar monóxido de carbono e temperatura dentro da mina de carvão.	experimental	capacete	Buzzer, GPS module, HC12, Sensors, wireless communication.
DHANALAKSHMI, A.; LATHAPRIYA, P.; DIVYA, K.	2017	Foi desenvolvido um capacete inteligente com recursos, como comunicação bidirecional, detecção de gases perigosos, notificação em caso de remoção do capacete, colisão, interruptor de pânico para situações de emergência, monitoramento contínuo das condições ambientais, como temperatura e pressão na indústria de mineração e GPS é fornecido para rastrear a localização do minerador	experimental	capacete	mining, environmental condition, collision, hazardous gases.
ELDEMERDASH, Tarek <i>et al.</i>	2020	O principal objetivo desta pesquisa é projetar e desenvolver um sistema de capacete inteligente para aplicação na indústria de mineração. Onde o sistema fornecido continuará monitorando os eventos perigosos, como temperatura, umidade, gás, remoção do capacete do minerador e danos por obstáculos ao capacete.	experimental	capacete	Smart helmet; industrial application; detection system; wireless communication.

GHADYANI, Daniyal <i>et al.</i>	2021	Este projeto é um sistema de monitoramento e vigilância contínuo e em tempo real baseado em comunicação sem fio para aumentar a segurança, monitorando vários parâmetros como temperatura, umidade, gases perigosos, impacto na cabeça, uso de capacete e navegação.	experimental	capacete	Underground mines, smart safety helmet, smart monitoring, wireless data transmission
HAJIZADEHMOTLAGH, Mandana; PAPROTNY, Igor.	2019	Apresenta o projeto, fabricação e avaliação experimental de componentes individuais de um monitor de poeira respirável vestível miniaturizado de ar micro fluídico (WEARDM) que mede diretamente a fração de massa respirável da poeira em minas de carvão subterrâneas.	experimental	portátil acoplado	respirable dust monitor, PM4, air-microfluidics
HARSHITHA, K. <i>et al.</i>	2018	Este projeto se concentra em um sistema de supervisão de minas baseado no sistema IOT (ZigBee) de baixo custo. Nosso projeto visa desenvolver uma rede de sensores, realizar vigilância em tempo real com inteligência de alerta antecipado sobre gases nocivos, temperatura, umidade	experimental	capacete	Zigbee, LEDS, DC-DC Converters
HAZARIKA, Pranjal.	2016	Este artigo apresenta a implementação de capacete de segurança para trabalhadores de minas de carvão. Este capacete está equipado com sensor de gás metano e monóxido de carbono	experimental	capacete	Smatt Safety Helmet; Gas Sensor; X-Bee

JOBES, C. C.; CARR, J. L.; DUCARME, J. P.	2012	Os autores revisam as tecnologias de alerta de proximidade existentes, descrevem a pesquisa em andamento do NIOSH sobre um sistema de alerta de proximidade inteligente e resumem os resultados dos testes atuais.	Revisão	capacete	
KARTSCH, Victor <i>et al.</i>	2017	Este trabalho apresenta um sistema capaz de fornecer alertas de sonolência usando apenas as informações provenientes dos sinais de EEG, combinando análise de características fisiológicas com comportamentais, melhorando significativamente a generalidade, precisão e compacidade em relação às soluções anteriores	experimental	não	
KARTSCH, Victor Javier <i>et al.</i>	2018	Este trabalho apresenta um esquema de detecção de sonolência fundindo informações comportamentais provenientes do movimento do usuário através de um sensor IMU e informações fisiológicas provenientes da atividade cerebral através de um único eletrodo de EEG	experimental	ecg	Drowsiness detection Fatigue monitoring EEG Sensor fusion Wearable
KIM, Yeanjae; BAEK, Jieun; CHOI, Yosoon.	2021	Um sistema de alerta de proximidade pessoal baseado em capacete inteligente foi desenvolvido para evitar colisões entre equipamentos e pedestres em minas. Um teste de desempenho do sistema proposto foi realizado em uma mina subterrânea de calcário.	experimental	capacete	mine safety; smart helmet; personnel proximity warning system; Bluetooth beacon; Arduino

KUMAR, K. KRANTHI; PRIYANKA, G. A	2017	Foi desenvolvido um capacete inteligente que está equipado para descobrir eventos perigosos na indústria de minas. No desenvolvimento do capacete, consideramos os três principais tipos de risco que lembram a qualidade do ar, a eliminação do capacete e a colisão (os mineiros são atingidos por um objeto)	experimental	capacete	ARM7, Microcontroller, Collision Sensor, I Sensor, GA Sensor, Zigbee Module, Flashlight.
LASKIER, Rafael.	2017	O artigo concentra em explicar e trazer exemplos de como a Internet das Coisas (IoT) irá impactar o setor da mineração.	Revisão	não	
LI, Xian <i>et al.</i>	2018	Desenvolvemos um <i>wearable</i> para aquisição de múltiplos indicadores fisiológicos em minas subterrâneas. O experimento de validação é conduzido em uma mina subterrânea histórica com alta umidade nível. Vários sinais fisiológicos podem ser detectados com sucesso no ambiente especial	experimental	capacete	Wearable devices, ECG, eye movement, situational awareness, underground mine
LU, Huimin <i>et al.</i>	2018	Há pouca pesquisa sobre o reconhecimento de emoções humanas em um ambiente extremo. é projetado para identificar a área do cérebro onde a característica da emoção é mais evidente	experimental	capacete	Emotion recognition, EEG, Cloud computing, Internet of Things

MARDONOVA, Mokhinabonu; CHOI, Yosoon	2018	Este artigo analisa as tendências atuais na tecnologia de dispositivos vestíveis e fornece uma visão geral de suas implantações prevalentes e potenciais na indústria de mineração	Revisão	não	mining; wearable technology; smart helmet; smart eyewear; occupational health; sensor technology
MU, Qi; WANG, Tanghong; JIA, Yikai.	2015	Este artigo propõe uma estrutura de dispositivo vestível subterrâneo baseado em computação em nuvem. A estrutura consiste em dispositivo vestível subterrâneo.	experimental	não	wearable device; cloud computing; sensor mine; Internet of Things for coal mine
NALEPA, Grzegorz J.; BRZYCHCZY, Edyta; BOBEK, Szymon	2018	Neste artigo, elaboramos os exemplos recentes do uso de dispositivos vestíveis na indústria de mineração. Identificamos desafios para o monitoramento de alto nível do pessoal de mineração com o uso de dispositivos móveis e vestíveis.	Revisão	capacete	Mobile devices · Activity monitoring · Data understanding
NIKULIN, Andrei; IKONNIKOV, Dmitry; DOLZHIKOV, Iliya.	2019	Os autores deste artigo realizaram uma pesquisa em duas etapas entre os funcionários de empresas de mineração de carvão russas. A primeira etapa revelou o status geral do fornecimento de EPI aos funcionários e a segunda etapa foi realizada para pesquisar a atitude do funcionário em relação ao uso de EPI inteligente	experimental	capacete	personal protective equipment, smart PPE, OSH, safety, assessment, miner, work zone

NOORIN, Maviya; SUMA, K. V.	2018	Um dispositivo vestível baseado em IoT que inclui recursos de segurança para os trabalhadores da mina é desenvolvido. Consiste no módulo do capacete e no módulo da estação base. Os sensores usados neste dispositivo vestível são o sensor de temperatura (DHT11), sensor de umidade (DHT11), sensor de gás (MQ4) e sensor de detecção de colisão (SW420).	experimental	capacete	Internet of things, wireless sensor network, wearable device, wireless fidelity
NOSIROV, Kh <i>et al.</i>	2021	Este artigo revisa a questão do papel das tecnologias inteligentes para garantir a segurança dos mineradores em emergências de mineração. Este artigo apresenta quatro tecnologias essenciais de segurança em mineração baseadas em tecnologia inteligente. São Simuladores de <i>Worksite</i> ; Identificação de rádio frequência; Capacetes Inteligentes; Robôs e Automação	Revisão	não	Safety; mining; emergency; smart technology; smart helmet.
PRABHU, P. Umang; Jayakumar, J.; Kumar, CP	2018	Projetamos um dispositivo vestível inteligente para mineradores de carvão. Este sistema proposto não só ajuda os trabalhadores a informar sobre os gases venenosos que estão presentes, mas também os rastreia se ocorrer algum acidente. O dispositivo é fornecido com sensor de gás	experimental	capacete/ casaco	: wearable device, methane and carbon monoxide gas sensor, IoT, RFID

RANJAN, Alok <i>et al.</i>	2019	Apresenta e discute nossa proposta de arquitetura de sistema e solução seguida pelos desafios de tal sistema no contexto de minas subterrâneas. São apresentadas discussões detalhadas sobre o comportamento do link sem fio para transmissão e comunicação confiáveis de dados	experimental	não	Health sensing, activity monitoring, underground mines, occupational health hazards, communication, data analytics, wearables in mines, artificial intelligence, miners.
RATHOD, Subhash <i>et al.</i>	2021	Projetamos uma máquina, ou seja, um capacete inteligente, o uso da geração ZigBee para rastrear os gases perigosos, situações de temperatura estranhas e os graus de umidade no ar	experimental	capacete	IOT, ZigBee Sensor, electricity supply, mining and safty
REVINDRAN, Rohith; VIJAYARAGHAVAN, Hansini; HUANG, Mei-Yuan.	2021	Esta rede de sensores sem fio (RSSF) pode ser usada para monitorar o bem-estar de todos os mineiros que estão trabalhando. O protocolo de roteamento desenvolvido para este projeto é baseado no roteamento do vetor de distância (DVR) e encontra o melhor caminho com base no salto mais curto.	experimental	capacete	Wireless Sensor Network (WSN), Distance Vector Routing (DVR), failure recovery, Graphical User Interface (GUI)

ROJA, P.; SRIHARI, D.	2018	Foi criado um capacete brilhante que pode distinguir ocasiões perigosas nas minas. No avanço do protetor de cabeça, consideramos o principal perigo que é a qualidade do ar.	experimental	capacete	Arduíno, Gas Sensors, GSM Module, Internet of Things, IR Sensor, Mining and Safety
SANJAY, Bhagat Sagar <i>et al.</i>	2019	Projetamos um sistema, ou seja, capacete inteligente usando a tecnologia ZigBee para monitorar os gases perigosos, condições anormais de temperatura e os níveis de umidade no ar	experimental	capacete	Zigbee, Smart Helmet, WSN, Embedded
SANTOS, Rita de Cássia Pedrosa	2020	Desenvolver dispositivos portáteis de baixo custo e tecnologicamente compatíveis para monitoramento contínuo dos parâmetros relacionados à ventilação e a construção do primeiro laboratório modular de ventilação do Brasil.	experimental	portátil acoplado	Mine ventilation, Remote Monitoring, Underground Environment, Arduíno, Internet of Things
SARKAR, Sayan; GHOSH, Aayushman; GHOSH, Shiuli Subhra	2020	Desenvolvemos um wearable integrado de monitoramento dos índices cardiorrespiratório e de suor e realizamos extensos experimentos em uma mina subterrânea operacional em diferentes condições. O surgimento de uma plataforma vestível com análise bioquímica, monitoramento de parâmetros fisiológicos juntamente com sensores do ambiente possibilitou a observação de indicadores críticos de desempenho, bem como o estresse dos mineiros.	experimental	pulseiras, smartwatches	Wearable; Cardiorespiratory; Sweat; Miner; UG

SAWANT, Pradeep <i>et al.</i>	2020	Planejamos uma estrutura, ou seja, um capacete inteligente usando a tecnologia Arduino para monitorar os gases perigosos, condições anormais de temperatura e, portanto, os níveis de umidade no ar. Os recursos de segurança aprimorados em nosso sistema aumentaram drasticamente a antecipação dos mineiros de carvão, alertando-os sobre os perigos	experimental	capacete	Smart helmet, Arduino, Mine Safety
SENGUPTA, Arijit; SCHILLER, Shu; WANG, Licai.	2009	Nosso artigo apresenta um exemplo de como a tecnologia RFID é usada para melhorar a segurança do trabalho subterrâneo e a eficiência das operações na Wanglou Coal Mine	experimental	RFID	RFID, Safety, Coal Mine, Positioning, Tracking, China
SHABINA, S.	2014	O projeto fornece três módulos, ou seja, módulo de capacete, módulo localizador e módulo de sala de controle.	experimental	capacete	RF, wireless sensor network, smart helmet, mobile
SHARMA, Mayank; MAITY, Tanmoy.	2018	O principal objetivo do projeto é reduzir o acidente de mineração e melhorar as condições de trabalho. O sistema de segurança de minas baseado em IoT possui vários sensores para diversas finalidades e o Arduino Uno é usado para melhor confiabilidade. Os vários parâmetros, como valor de temperatura e umidade, nível de intensidade da luz, nível de gás venenoso no ar, são observados da área pelos sensores.	experimental	não	Internet of Things, Arduino, ThingSpeak, API key, Mining safety system node, localization

SILVA, Mateus C.	2019	Este artigo foca em melhorias de software, apresentando uma ferramenta projetada para criar diferentes versões de sistemas operacionais (SOs) que se adequem às especificações de projetos de dispositivos vestíveis. Os autores desenvolveram uma ferramenta de software que permite ao usuário final criar um novo sistema operacional em apenas algumas etapas	experimental	não	wearable devices; operating systems; build tool; performance; prototype; mining
SURIYAKRISHNAAN, K. <i>et al.</i>	2021	Projetamos um capacete para a segurança dos trabalhadores da mina. Em nosso sistema estamos detectando gases perigosos como metano e monóxido de carbono, colisão e temperatura e umidade em área subterrânea	experimental	capacete	ATmega328 Microcontroller, Sensors, RF Transmitter, RF Receiver, Buzzer, LCD Display
TAKIFF, Larry; AIKEN, Geoffrey	2010	O monitor ICx DPM em tempo real descrito aqui replica com precisão os resultados da técnica NIOSH 5040 usada para medições de EC e TC em minas subterrâneas.	experimental	portátil acoplado	
TALPUR, Mir Sajjad Hussain <i>et al.</i>	2021	O objetivo deste estudo é fornecer uma solução para mineração através de comunicação e monitoramento de segurança. O capacete inclui um sistema de monitoramento que se comunica com todos os rastreadores por meio de técnicas de Wi-Fi para ajudar a fornecer informações. O sistema usa "circuitos rastreadores Wi-Fi baseados em mega microcontroladores" para obter os dados	experimental	capacete	Smart Helmet, IoT, coal mines safety monitoring, mobile application

WESSELS, Carina Helena <i>et al.</i>	2016	A pesquisa introduz filosoficamente a quarta revolução industrial, explorando a aplicação da inovação e automação em termos amplos e a Internet das Coisas (IoT) especificamente na indústria de mineração.	Revisão	não	Fourth industrial revolution, Internet of Things, Industrial Internet of Things, IoT, IIoT Mining automation, innovation in mining, modernisation
---	------	---	---------	-----	---

APÊNDICE B. – ARTIGOS COM ESTUDOS ABRANGENTES SOBRE O ESTADO DA ARTE EM VESTÍVEIS TECNOLÓGICOS

Autor	Ano	Breve comentário	Estado da arte	Palavras chave
AL MAMUN, Md Abdulla; YUCE, Mehmet Rasit.	2019	O objetivo desta revisão é resumir as pesquisas e desenvolvimentos em dispositivos vestíveis destinados a aplicações ambientais de Internet das Coisas (IoT). Este artigo fornece descrições abrangentes dos sistemas de monitoramento ambiental vestíveis (WEMS) de última geração e os compara em termos de tecnologias de detecção e comunicação.	Vestíveis para monitoramento da qualidade do ar	Air pollution, environmental monitoring, Internet of Things, wearable sensing
AMORIM, Vicente JP; OLIVEIRA, Ricardo AO; DA SILVA, Mauricio Jose.	2020	A revisão sistemática da literatura apresentada neste artigo investiga tendências recentes em estudos de computação vestível, levando em consideração um conjunto de restrições aplicadas a estudos relevantes em uma janela de dez anos	Vestíveis tecnológicos de forma ampla	
BORGHI, Francesca <i>et al.</i>	2017	O objetivo deste estudo é fornecer informações sobre o conhecimento atual sobre o uso de sensores miniaturizados de poluentes atmosféricos.	Qualidade do ar	air pollution monitoring; citizen science; exposure assessment; global positioning system (GPS); participatory sensing; particulate matter; portable monitoring; wireless sensor network

Autor	Ano	Breve comentário	Estado da arte	Palavras chave
CHOI, Yosoon; KIM, Yeanjae	2021	Neste estudo, o status atual e as tendências da pesquisa de capacetes inteligentes foram sistematicamente revisados.	Capacetes	wearable device; smart helmet; sensor; microcontroller; wireless communication technology
DEGHANI, Milad; DANGELICO, Rosa Maria.	2018	Este estudo oferece uma visão completa do estado da arte e da evolução dos SWTs ao longo do tempo, fornecendo insights importantes para pesquisadores e gestores - tecnologias vestíveis inteligentes (SWTs)	Tecnologias vestíveis	wearable technology; smart devices; smart wearables; patent analysis; cluster analysis.
KRUPITZER, Christian <i>et al.</i>	2020	Neste artigo, fornecemos uma análise do estado da arte atual em máquinas homem-máquina. interação no domínio da Indústria 4.0.	Interação homem-máquina	human machine interaction, augmented / virtual reality, Industry 4.0, Industrial IoT
MORAWSKA, Lidia <i>et al.</i>	2018	Nós nos concentramos em duas questões: (1) Essas tecnologias são adequadas para os vários propósitos previstos? e (2) Até que ponto essas tecnologias e suas aplicações progrediram para fornecer respostas e soluções? O objetivo desta revisão é fornecer respostas para as perguntas com base em pesquisa sistemática e revisão de publicações.	Qualidade do ar	Low cost sensor/monitor Air pollution sensing Sensor data utilisation Air sensor/monitor performance Personal exposure monitoring

Autor	Ano	Breve comentário	Estado da arte	Palavras chave
NIKNEJAD, Naghme <i>et al.</i>	2020	O objetivo predominante desta pesquisa é revisar a literatura de wearables inteligentes, avanços recentes e desafios futuros. Assim, uma revisão sistemática da literatura foi realizada para explorar wearables inteligentes, revisando estudos anteriores de 2010 a 2019	Vestíveis tecnológicos	Smart wearables Information systems Potential factors Weight analysis technique
SALAMONE, Francesco <i>et al.</i>	2021	Realizamos uma revisão sistemática sobre os quatro diferentes fatores ambientais (visual, acústico, térmico e qualidade do ar) e utiliza os resultados para definir as tendências de pesquisa de wearables para monitoramento ambiental. Objetiva responder a seguinte questão: Qual é a tendência mundial na literatura científica em relação ao monitoramento ambiental com wearables?	Monitoramento ambiental e vestíveis tecnológicos	environmental monitoring; wearable devices; wearables; systematic review; visual environmental factor; acoustic environmental factor; thermal environmental factor; air quality environmental factor
SENEVIRATNE, Suranga <i>et al.</i>	2017	Fornecemos uma pesquisa e classificação abrangentes de wearables e protótipos de pesquisa disponíveis comercialmente. Em seguida, examinamos os problemas de segurança da comunicação enfrentados pelos wearables populares seguidos de um levantamento das soluções estudadas na literatura	Vestíveis tecnológicos disponíveis	

Autor	Ano	Breve comentário	Estado da arte	Palavras chave
SHRESTHA, Prakash; SAXENA, Nitesh.	2017	Identificamos uma ampla gama de dispositivos vestíveis existentes e futuros e investigamos suas amplas aplicações. Fornecemos uma exposição da segurança e privacidade da computação vestível, estudando aspectos duplos, ou seja, ataques e defesas. Abrangente os potenciais aprimoramentos de segurança, privacidade e segurança dos sistemas existentes com base no surgimento da tecnologia vestível.	segurança privacidade e Vestíveis tecnológicos	Wearable computing, security requirements, side-channel analysis and countermeasures
STEFANA, Elena <i>et al.</i>	2021	Realizamos uma revisão sistemática para identificar dispositivos vestíveis propostos na literatura científica para fins ergonômicos e analisar como eles podem auxiliar na melhoria das condições ergonômicas	Ergonomia vestíveis tecnológicos	wearable technology; human factors; sensor; work-related musculoskeletal disorder; biomechanical risk; risk factor; real-time measurement; Industry 4.0
SVERTOKA, Ekaterina <i>et al.</i>	2021	O objetivo é sistematizar o conhecimento na área de segurança de wearables industriais para avaliar a relevância de seu uso nas empresas como a tecnologia de manutenção da segurança do trabalho, correlacionar os benefícios e custos de sua implementação e, por meio da identificação de lacunas de pesquisa, para delinear direções promissoras para trabalhos futuros nesta área.	Vestíveis tecnológicos segurança	wearables; smart devices; occupational safety; IIoT; data collection; communications; localization
SVERTOKA, Ekaterina <i>et al.</i>	2020	Tem como objetivo apresentar uma visão geral do estado atual do mercado de dispositivos vestíveis relacionados a este nicho e destacar os vestíveis industriais modernos, novas técnicas e abordagens neste campo de pesquisa	Wearables disponíveis	Industry 4.0, wearable devices, industrial wearables, work safety, biosensor, survey

Autor	Ano	Breve comentário	Estado da arte	Palavras chave
TURNER, Christopher J. <i>et al.</i>	2020	Este artigo discute o estado da arte atual na adoção de Tecnologias da indústria 4.0 na indústria da construção. Discute a relevância das seguintes tecnologias chave da Indústria 4.0 para a construção: análise de dados e inteligência artificial, robótica e automação, gerenciamento de informações de construção, sensores e vestíveis, gêmeo digital e conectividade industrial.	Sim	Cyber-physical systems, digital twin, industrial internet, Industry 4.0, Internet of Things (IoT), wearables.
WANG, Yu-Hui; HSIEH, Chia-Ching.	2018	Este estudo explora a inovação tecnológica e a inteligência para a tecnologia de óculos baseada em IoT (internet das coisas). Propõe uma análise integrada de patentes e um método de implantação de função de qualidade em dois estágios para explorar aplicações de óculos inteligentes.	Sim	Internet of Things (IoT); Quality function development (QFD); Patent analysis; Eyewear; Technology innovation

