

Utilidade de vestíveis tecnológicos na mineração

Use of computational wearables in mining industry

DOI:10.34117/bjdv8n12-129

Recebimento dos originais: 10/11/2022

Aceitação para publicação: 13/12/2022

Cassiano Emílio da Silva

Mestrado em Engenharia de Minas pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto (PPGEM – UFOP)

Instituição: Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Endereço: Campus Morro do Cruzeiro, s/n, Bauxita, Ouro Preto - Minas Gerais,

CEP: 3540-000

E-mail: cassiano.silva@aluno.ufop.edu.br

José Margarida da Silva

Doutor em Engenharia Materiais, Metalúrgica e de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Instituição: Departamento de Engenharia de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Endereço: Campus Morro do Cruzeiro, s/n, Bauxita, Ouro Preto - Minas Gerais,

CEP: 3540-000

E-mail: jms@ufop.edu.br

RESUMO

Os vestíveis tecnológicos estão sendo implementados em muitos domínios como em monitoramento da saúde, práticas esportivas, na 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 evidencia 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 mostra como os vestíveis tecnológicos podem ser usados no contexto da mineração onde o monitoramento fisiológico mostra-se uma oportunidade interessante de melhoria da segurança de trabalho especialmente para área e ventilação subterrânea, que se for combinado com a localização que pode auxiliar na tomada de decisão. Foi buscada uma ampla literatura para entender os dispositivos computacionais vestíveis em desenvolvimento. A pesquisa indica que os vestíveis tecnológicos já estão em desenvolvimento para o setor mineral.

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

ABSTRACT

Computational wearables are being implemented in many domains such as health monitoring, sports practices, in 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 evident. Mining is also in line with the progress and deployment of these new technologies. The diversity of technological 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 introduce how technological wearables can be used in the context of mining where physiological monitoring is an interesting opportunity to improve work safety especially for area and underground ventilation, which if combined with the location that can assist in taking decision. A broad literature was sought to understand wearable computing devices in development. The research indicates that technological wearables are already under development for the mineral sector.

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

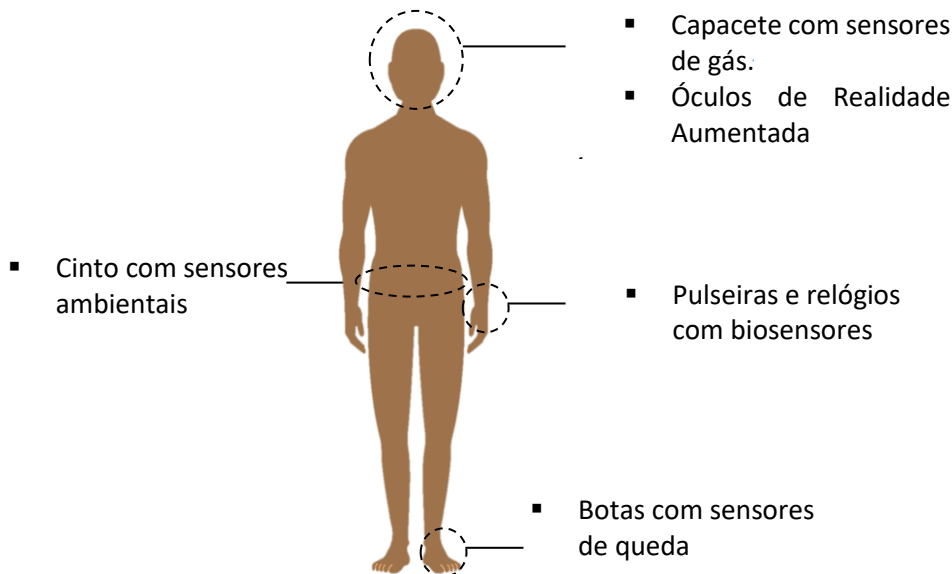
1 INTRODUÇÃO

À medida que a denominada 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 potencial de uso de vestíveis computacionais e ganhos associados.

Os vestíveis computacionais podem ser entendidos como a junção de roupas ou acessórios com tecnologias eletrônicas e digitais sobre o corpo humano que visam monitoramento fisiológico, do ambiente e detecção de atividades e fazem um resumo, registro e documentação do cotidiano, segundo Kamisalic *et al.* (2018) e Duque (2018).

Dentro do contexto industrial a aplicação de vestíveis tecnológicos na mineração se dariam 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 (*Augmented Operator*). Outra terminologia comumente usada é operador inteligente ou ainda operador 4.0 (vide exemplo na figura 1).

Figura 1 – Exemplo de dispositivos vestíveis aplicados em um operador 4.0.



Fonte: os próprios autores (2022).

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, tornando a operação mais inteligente, segura e eficiente.

Segundo Bartos (2007) a mineração progrediu por décadas com a adoção de equipamentos e máquinas cada vez maiores que incorporaram avanços mecânicos e eletrônicos que reduziram os custos de movimentação de material, entretanto esses ganhos parecem estar cada vez mais próximos do seu limite de desenvolvimento. Os investimentos para automatizar operações e trocar equipamentos de mineração, que são de um valor 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 automação das minas de forma mais rápida e ampla, já que uma boa parte dos novos investimentos são investidos na área conhecimento geológico do corpo mineral.

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. 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. 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 tecnologia vestível computacional ajuda a enfrentar o progresso da contínua complexidade e com novos requisitos crescentes em relação à eficiência de custos, adaptabilidade e sustentabilidade (Kong et al., 2018 e 2019) e se insere na proposta de transformação digital de processos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa se caracteriza por um estudo de revisão bibliográfica descritivo e estruturado sobre o uso de vestíveis computacionais industriais. 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 dos resultados obtidos relacionados 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 pesquisa foram elaboradas as seguintes questões de investigação:

Q1 – Quais são os vestíveis computacionais que estão sendo desenvolvidos para uso na mineração?

Q2 - Qual seria a utilidade dos vestíveis tecnológicos para a mineração?

Como plataforma de busca foram usados o banco de dados de artigos científicos: Google Acadêmico na língua inglesa e 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, com a um limite de inspeção e seleção os 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.

A escolha de palavras-chaves partiu de uma temática ampla sobre vestíveis computacionais e depois foram verificadas publicações sobre cada dispositivo combinado com a área da mineração. O quadro 01 traz as informações das palavras chaves usadas para a busca em banco de dados científico.

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: Os próprios autores (2022).

Foram aplicados os seguintes critérios de exclusão: vestíveis industriais do tipo tecido, 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 RESULTADOS

Esta seção apresenta os tipos de dispositivos vestíveis computacionais possíveis em princípio de serem empregados na mineração.

Dispositivos de pulso podem ser do tipo relógio ou pulseira e diferem pelas quantidades de funções e tamanho de tela. Ambos possuem sensores de rastreamento passivo de atividades biomecânicas e biosensores. Os 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.

Ambos os dispositivos têm alcançado a popularidade junto aos consumidores devido ao monitoramento contínuo automático de comportamentos como número de passos dados, 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 a combater o sedentarismo já que se tem medição constante deles ao longo do tempo.

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.

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. 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.

Na área específica da mineração 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 cardiorrespiratórias, ou seja, maior estresse e cansaço.

O capacete é um item comum e obrigatório em ambientes de trabalho e por ter essa característica foi a área em que mais se encontram artigos sobre o desenvolvimento de produtos, em sua maioria com foco no baixo custo e com o uso de módulos de Arduino. Os projetos de capacetes inteligentes podem contemplar sensores ambientais e fisiológicos assim como medição de temperatura, umidade e detecção de gases tóxicos. Outros módulos de Arduino podem ser acrescentados para colocar sensor de uso no capacete, detecção de golpes na cabeça com sensores micro eletromecânicos.

A questão da ventilação é primordial para o avanço da lavra subterrânea, visto que as minas existentes atualmente serão levadas a maiores profundidades devido à complexidade de se iniciar novos projetos de mineração em superfície. O aprofundamento das minas exige transpor mais desafios para manter os níveis adequados de segurança devido às condições geotécnicas e térmicas e o capacete inteligente demonstra ser especialmente útil para melhorar a segurança e comunicação.

Outra situação em que o capacete inteligente pode antecipar e aumentar mais a segurança seria por meio do alerta do risco de proximidade e 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.

É sabido que a mineração a céu aberto apresenta uma série de facilidades, relativa à lavra em subsolo, no que diz respeito à estrutura de supervisão, localização e comunicação. Desta forma, o foco dos artigos que abordam capacetes inteligentes 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 emissão de gases e colapso de teto. Choi e Kim (2021) apontam que há 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.

O desenvolvimento de um capacete inteligente poderá gerar muitas vantagens para o setor da mineração. Choi e Kim (2021) ressaltam as seguintes vantagens desse equipamento: possui baixo custo de desenvolvimento e operação, pode detectar acidentes de forma imediata e solicitar o resgate, geralmente é desenvolvido para ser modular podendo adicionar ou remover sensores conforme o necessário. As limitações no desenvolvimento dos capacetes segundo o mesmo autor são: alguns sensores como câmeras e sistemas de posicionamento global e medições fisiológicas, possui elementos potenciais de invasão de privacidade. Sensores leves e baratos podem apresentar mau funcionamento ou ocorrência de alarmes falsos. A decisão de acoplar muitos sensores pode aumentar o peso e tornar o capacete inteligente desconfortável.

Os vestíveis tecnológicos de visão consistem em óculos especiais (*smartglasses*) ou monitores montados na cabeça (HMDs). 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.

Os desenvolvimentos de dispositivos eletrônicos de visão não são recentes e remontam há várias décadas com a criação de capacetes de visualização. Entre os pioneiros no desenvolvimento de dispositivos de realidade aumentada podem-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).

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 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 podem-se citar Microsoft com o *Hololens* e a Epson com *BT-200*.

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, gravar ações, dar instruções, detectar imagens, medir distâncias, temperaturas e detecção de fadiga ocular. Turner *et al.* (2020) chamam a atenção que a maior parte dos dados são capturados e representados 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 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

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 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.

Os VANT's industriais junto com dispositivos de visão FPV (First Person Vision), proporcionam voos imersivos e permite manobras com maior controle e precisão que seriam mais complicadas de se fazer em uma operação de voo tradicional. Então as

aplicações industriais relatadas 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.

A flexibilidade de operação de drones no ambiente subterrâneo é restrita se comparada ao uso de drones 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, turbulências do ar e obstáculos (AZHARI et al., 2017; BECKER, 2019; PRESTON e ROY, 2017; RAJ, 2019).

Outros dispositivos vestíveis computacionais que não foram cobertos em aprofundamento são pequenos aparelhos 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 que possuem sensores miniaturizados e ainda podem ser presos ou incorporados em cintos, braçadeiras, botas, joias e coletes.

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.

Outro dispositivo interessante e que está sendo aplicado na mineração e pode ser considerado um dispositivo vestível é o uso de rastreadores de GPS presos na roupa ou em cintos. O uso desses rastreadores é especialmente importante em regiões de risco como o descomissionamento de barragens. Embora essa atividade 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.

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. Além da mineração, a execução de obras pesadas como túneis, rodovias e hidrelétricas realizam detonações de rocha de forma periódica e possuem 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 broches, anéis ou colares 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.

Martin e Voix (2017) chamam atenção para a oportunidade de desenvolver fones de ouvidos inteligentes, 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.

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.

4 DISCUSSÃO

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 percebido 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 uso imediato.

Nos aspectos de monitoramento e segurança, os 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 agrupados em cinco categorias de funcionamento: Processamento de imagem, medição 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 são as mais eficientes segundo o mesmo autor.

Para maior eficiência dos estados de fadiga e sonolência é mais assertivo o resultado quando se combina as técnicas de detecção. Os vestíveis tecnológicos através da medição de parâmetros fisiológicos podem se somar a outros sinais indiretos e a partir disso realizar diagnósticos mais precisos.

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 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 ocorre dentro do setor petrolífero, tendo a sua apresentação de dados em telas de computadores como satisfatórias 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).

O quadro 2 apresenta os tipos de dispositivos e sua utilidade dentro do contexto da mineração e responde as questões de pesquisas formuladas para orientar a pesquisa.

Quadro 2 – Tipos de dispositivos vestíveis e sua utilidade na mineração.

Dispositivos de pulso (pulseiras e relógios)	<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 	Capacetes inteligentes	<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
Dispositivos de visão (óculos de R.A e R.V.)	<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 	Colete	<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
Acessórios (anel/colares, cintos e broches)	<ul style="list-style-type: none"> - Rastreamento e localização - Controle de acesso em áreas 	Fones de Ouvido	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoramento fisiológico (batimento cardíaco) - Comunicação com o envio e recebimento de mensagens de áudio
Botas	<ul style="list-style-type: none"> - Detecção de quedas 	Máscaras	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoramento fisiológico (Batimentos cardíacos, saturação de oxigênio, temperatura do corpo e níveis de oxigênio)

Fonte: compilado pelos autores (2022).

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. ocorrem 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).

5 CONCLUSÕES

Os 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 apresentação de protótipos.

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. Krupitzer *et al* (2020) expõem que o trabalhador não pode mais ser considerado distanciado de sistemas produtivos com o grande emprego de automação. Segundo o autor 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.

Os 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. 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.

O produto da mineração é uma *commodity*. Então ao agregar tecnologia ao processo produtivo não se afeta o preço recebido pelo minério e isto torna de uma forma geral a mineração mais conservadora na adoção de inovações e novas tecnologias. 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.

REFERÊNCIAS

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.

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.

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.

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.

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 baixo custo para indústria 4.0. 2018. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 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, Akshta *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.

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.

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.

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.

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. *IIE 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.

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.

KUMAR, K. KRANTHI; PRIYANKA, G. A Smart Helmet for Air Quality and Hazardous Event Detection for the Mining Industry. 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, 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

SANTOS, Rita de Cássia Pedrosa *et al.* – Tese de doutorado - Dispositivos Móveis Para Monitoramento De Ventilação Em Mina Subterrânea. 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.* Arduino 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.

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.

SILVA, Danielson *et al.* Realidade virtual aumentada aplicada como ferramenta de apoio ao ensino. *Tecnologias em Projeção*, v. 2, n. 1, 2011.

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.

THE SMART HELMET. Disponível em: <<https://miningworld.com/the-smart-helmet/>>. 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.