

DISPOSITIVOS MÓVEIS PARA MONITORAMENTO DE VENTILAÇÃO EM MINA SUBTERRÂNEA

Rita de Cássia Pedrosa Santos,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (PPGEM),
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).
rita.pedrosa@ufg.br

Walter Albergaria Junior,
Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional (PPGGO)
Universidade Federal de Catalão (UFCAT).

José Margarida da Silva,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM),
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Michel Melo Oliveira,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (PPGEM),
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Douglas Batista Mazzinghy,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (PPGEM),
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

RESUMO

O importante papel da ventilação em minas subterrâneas é garantir segurança e condições ambientais adequadas em todas as áreas acessíveis de uma mina. O trabalho trata da utilização do conceito de Internet das Coisas (IoT) para o gerenciamento e monitoramento *on-line* dos parâmetros de temperatura, umidade e concentração de gases em operações de mina subterrânea quer seja pela tecnologia vestível (*wearable*) ou estação de monitoramento contínuo em pontos pré-determinados. A programação do microcontrolador permite que sejam inseridas as métricas normativas e que seja sinalizado se houver alguma anomalia. Esse sistema permite tomar medidas preventivas para garantir a segurança operacional permitindo registrar com maior precisão a qualidade do ar no ambiente de mineração subterrânea.

Palavras chaves: Ventilação subterrânea; Internet das Coisas; Monitoramento, Dispositivos.

ABSTRACT

The important role of ventilation in underground mines is to ensure safety and adequate environmental conditions in all accessible areas of a mine. The work deals with the use of the Internet of Things (IoT) concept for the online management and monitoring of temperature, humidity and gas concentration parameters in underground mine operations, whether through wearable technology or continuous monitoring station at points predetermined. The microcontroller programming allows normative metrics to be inserted and to be signaled if there is an anomaly. This system allows preventive measures to be taken to ensure operational safety, allowing the air quality in the underground mining environment to be recorded more accurately.

Key words: Underground ventilation; Internet of Things; Monitoring, Devices.

INTRODUÇÃO

Os dados mais atuais indicam que os fatores ergonômicos, os fatores de risco de lesão, as partículas em suspensão, gases, fumos e ruído são as principais causas da incidência de doenças profissionais em todo o mundo [1].

Em uma atividade de mineração subterrânea, as condições atmosféricas de trabalho apresentam riscos associados a: poeira, concentração de gases tóxicos, calor, umidade, incêndios, explosões, dentre outros. Alguns destes fatores de risco são intrínsecos ao ambiente operacional, enquanto outros advêm das condições de operação. A empresa de mineração deve analisar constantemente estas variáveis que interferem na qualidade do meio ambiente e, com isto, garantir condições ambientais adequadas para o trabalho humano.

Os desenvolvimentos tecnológicos afetam todos os aspectos do trabalho, desde as pessoas ou plataformas que o realizam à forma e local realizado. Afetam também o tipo de trabalho realizado, os modos de organização e condições de realização, assim como a segurança e saúde dos trabalhadores. Estas mudanças e desenvolvimentos estão a tornar-se mais céleres e já exercem um grande impacto nas condições de trabalho e na segurança e saúde dos trabalhadores, prevendo-se que esta tendência se mantenha no futuro [2].

O termo internet das coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), pode ser conceituado como uma rede de objetos físicos, veículos, prédios e outros que possuem tecnologia embarcada, sensores e conexão com rede capaz de coletar, processar e transmitir dados. O funcionamento da IoT apresenta duas vertentes implícitas classificadas como tecnológica e social (figura 1). A tecnológica que impulsiona o desenvolvimento de componentes eletrônicos e de infraestrutura necessária; e a vertente social, na qual as mudanças de comportamento estimulam o uso e consumo de produtos inteligentes, que por sua vez, geram demanda [3].

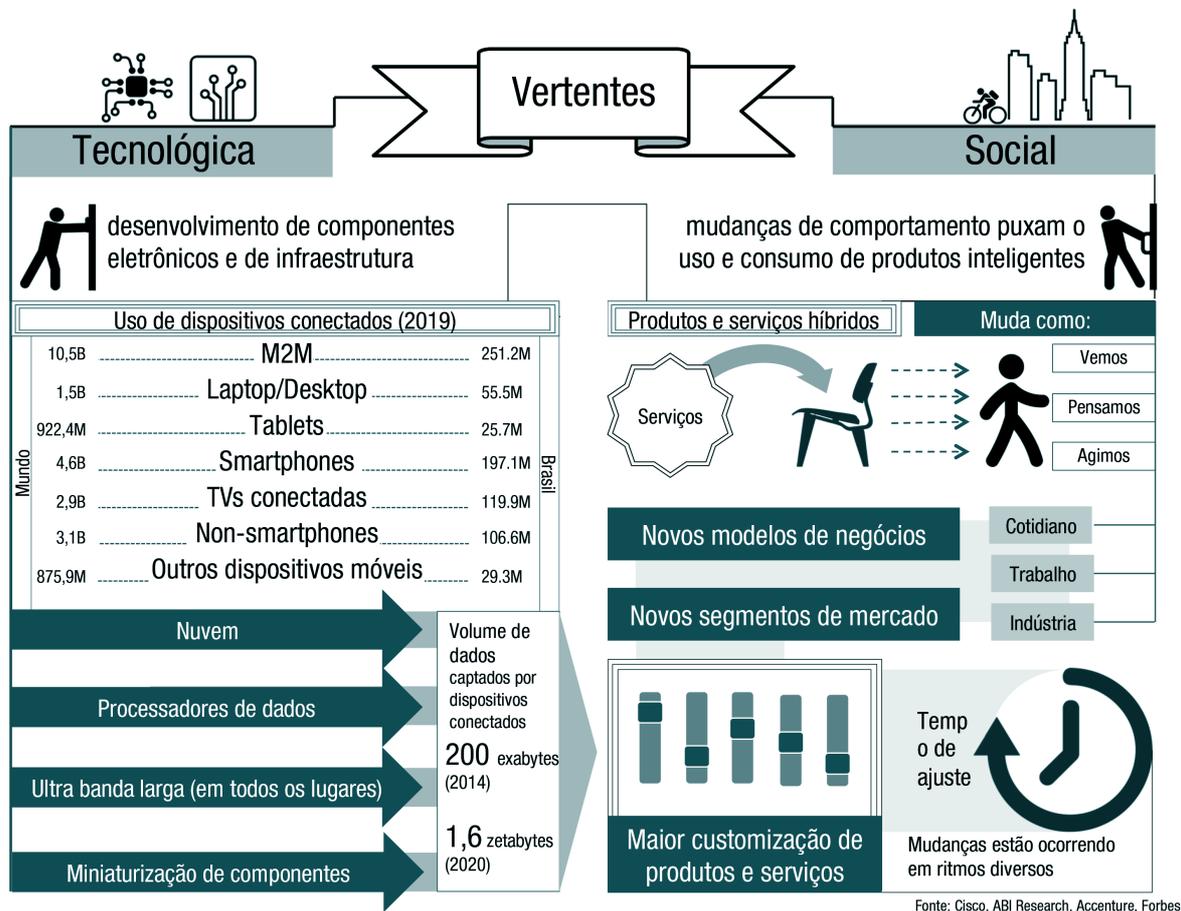


Figura 1 - O funcionamento da internet das coisas [3]

Para melhor visualização do funcionamento da IoT, pode-se estabelecer que as aplicações se dividem em três grupos englobando o usuário final, os negócios e serviços e a indústria. Dessa forma, o usuário final será o maior beneficiário da IoT, já que o valor percebido será mais tangível por meio da melhoria de serviços e de novas experiências, com potenciais modelos de negócios recém-criados [4].

Se as três revoluções anteriores foram impulsionadas pelo advento das máquinas a vapor, da eletricidade e dos computadores pessoais, a quarta está a ser impulsionada pela digitalização da informação [5]. Com o avanço rápido da tecnologia, a previsão da trajetória nas próximas décadas é muito difícil. [6] sugere que em 2030 poderão existir sete bilhões de dispositivos em rede, toda a atividade econômica mundial poderá ser monitorada quase em tempo real, e as empresas e lares poderão estar equipados com sistemas avançados de robótica.

Com a nova revolução industrial, conhecida como "Indústria 4.0", uma série de novas tecnologias e conceitos para o setor industrial tornaram-se disponíveis. Assim, há uma nova oportunidade de melhoria no setor mineral, promovendo a integração de toda a cadeia produtiva. Análises de grandes quantidades de dados a partir da integração de diferentes tipos de equipamentos utilizando IoT e a computação em nuvem (*cloud computing*) são algumas dessas novas tecnologias exploradas pelo setor mineral [7]. Na indústria de mineração, a IoT é usada como meio de alcançar a otimização de custos e produtividade,

melhorando as medidas de segurança e desenvolvendo suas necessidades de inteligência artificial.

Entre os desafios tecnológicos na lavra subterrânea, está o desenvolvimento de sistemas de monitoramento *on line* do ambiente, integrando a progressão de análise do sistema de ventilação. Estes são ainda muito incipientes e necessários ao bom desenvolvimento das operações e para a saúde dos mineiros [8]. Considerando as melhorias e ganhos nos processos, muitas grandes empresas de mineração planejam e avaliam maneiras de iniciar sua jornada digital para gerenciar as operações. As vantagens englobam a otimização de custos e produtividade aprimorada com a implementação de sensores em equipamentos e sistemas de mineração que monitoram o equipamento e seu desempenho. Grandes blocos de dados, os chamados “*big data*”, são utilizados para descobrir maneiras mais econômicas de executar operações e reduzir etapas operacionais. A indústria de mineração enfrenta emergências quase a cada hora, com alto grau de imprevisibilidade. A IoT ajuda no monitoramento do ambiente e na tomada de decisões baseada nos dados coletados dos vários sensores ativos ao mesmo tempo [9]. A figura 2 representa um fluxograma que leva a associação da IoT, *Big Data* e Inteligência Artificial resultando em otimização do processo, redução de custos, além da ganhos com a segurança operacional.

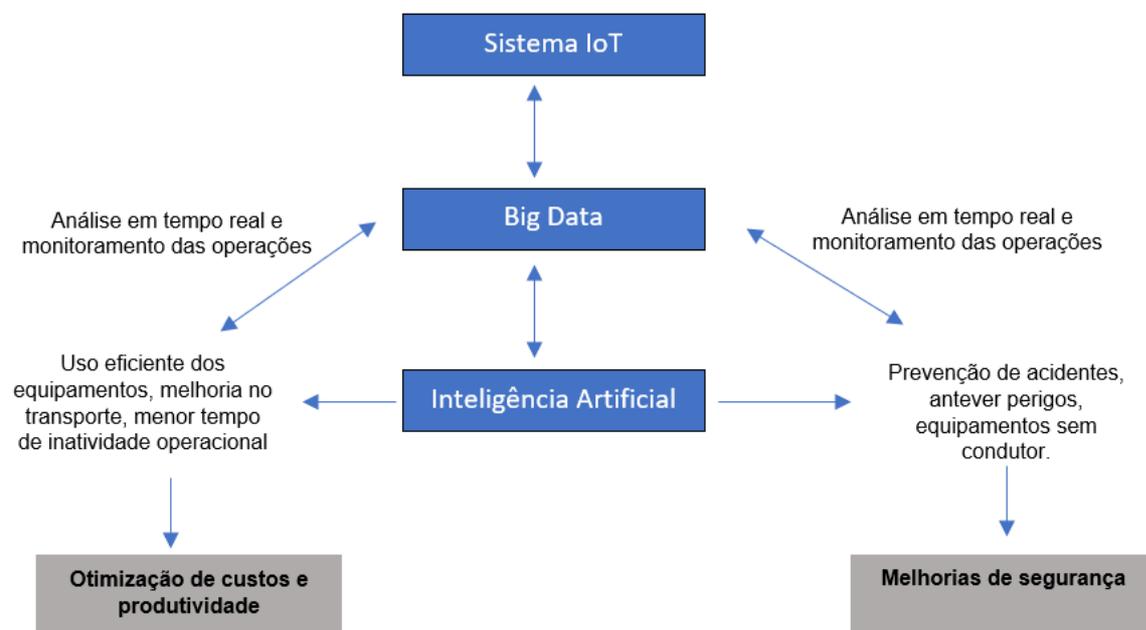


Figura 2 – Fluxograma da IoT na mineração - Adaptado de [8]

A aplicação de IoT e Inteligência Artificial (AI) na indústria de mineração aumenta o poder das soluções como um meio de agilizar as operações. A tabela 1 apresenta alguns dispositivos instalados na lavra subterrânea e seus respectivos ganhos operacionais segundo [9].

Tabela 1 – Exemplos de IoT na Lavra Subterrânea - adaptado de [9]

Local e data de implantação	Dispositivo instalado	Ganhos apontados
Casa Berardi (Canadá)- 2018	Telemetria em equipamentos móveis, com diagnóstico em tempo real para diminuir paradas	Aumento de horas diárias de operação
Sindesar (Índia)- 2018	Plataforma digital para receber dados de perfuratrizes, carregadeiras, caminhões, etc	Aumento da eficiência global
Porcupine (Canadá)- 2018	VOD - Interface digital para controle a partir da superfície	Redução da vazão necessária de ar a 55%, diminuição do consumo de eletricidade

A segurança e a saúde nas minas subterrâneas são questões desafiadoras na indústria de mineração [10]. A disponibilidade de ar fresco nas escavações subterrâneas destaca-se como o principal parâmetro de controle, tendo influência direta sobre os demais parâmetros ambientais. O controle das condições do ambiente de trabalho proporciona melhores condições de segurança, contribuindo significativamente para aumentar a produtividade e, conseqüentemente, reduzir os custos operacionais da mineração. Galerias com ventilação insuficiente têm altos níveis de contaminantes e altas temperaturas. Os aspectos ambientais devem ser sempre analisados e tratados em conjunto, pois um parâmetro influencia os demais [11].

Na mineração, a aplicação da IoT promete benefícios como o aumento do nível de automação e melhorias na performance da produção. A maior disponibilidade de instrumentos confiáveis para medição de parâmetros de ventilação, conjugada com a crescente disponibilidade de recursos computacionais justifica a atenção das empresas no sentido de projetar, de forma mais eficiente, seus sistemas de ventilação.

Nas últimas décadas houve um aumento significativo nos pedidos de patentes em todo o mundo [12]. A capacidade de inovação e sustentabilidade de uma empresa estão intimamente relacionadas aos seus investimentos de capital em pesquisa e desenvolvimento (P&D) que desempenham um papel importante na vantagem competitiva de uma empresa [13]. Sendo assim, uma empresa pode ser mais ou menos suscetível à influência de fatores incertos ao tomar decisões relacionadas ao investimento em P&D.

[14] cita duas notificações de invenção relacionado a dispositivos de baixo custo que consideram a segurança dentro da mina subterrânea com abordagem no monitoramento de parâmetros da ventilação e utilização da IoT. A criação de novos produtos ainda está em andamento referente a programação e desenho do dispositivo que possui muitas variáveis. Tendo como área de conhecimento da tecnologia a Engenharia de Minas e Sistemas de Informação e por isto não será detalhada neste artigo. A versatilidade dos dispositivos proporciona aplicar conceitos de IoT adaptando ao ambiente de mineração subterrânea. A tecnologia vestível (conhecida como tecnologia *wearable*) proporciona um maior controle

individual e a estação de monitoramento contínuo permite o conhecimento de cada ponto de atenção determinado pela empresa podendo antever decisões gerenciais relacionada a segurança operacional e condicionamento de mina.

A tecnologia e os dispositivos inteligentes portáteis também podem criar oportunidades no domínio da segurança e saúde, por exemplo, permitindo que os gestores de segurança monitorem comportamentos e comuniquem conselhos e informações de segurança e saúde aos trabalhadores em tempo real [15][16].

METODOLOGIA

O ambiente de estudo dos dispositivos são as minas subterrâneas. A instalação dos dispositivos permite o monitoramento contínuo de parâmetros relacionados a temperatura, umidade, pressão e gás. A montagem do microcontrolador, sensores, leitor de cartão, bateria dentre outros componentes para capturar as leituras e transmiti-las foram planejadas e instaladas em uma caixa personalizável.

O código do microcontrolador coleta dados ambientais automaticamente (temperatura, umidade, pressão e concentração de gases) de acordo com a periodicidade desejada, podendo ser alterados de acordo com o interesse da empresa e a disponibilidade de sensores. A transmissão *on-line* para um ambiente externo respeita a tecnologia de transmissão disponível no interior da mina e investimentos propostos pela empresa. A metodologia também contempla o armazenamento das leituras no cartão Micro SD e programação relacionada ao acionamento de alarme caso tenha algum parâmetro fora do limite pré-estabelecido.

Para o desenvolvimento do site utilizou-se a linguagem de programação PHP juntamente com o *framework* Laravel. Apesar de existirem opções disponíveis para exibição dos dados *on-line*, optou-se por um desenvolvimento próprio de modo a permitir uma maior flexibilidade na exibição dos dados. Os dispositivos móveis englobam tanto a segurança operacional do indivíduo quanto do coletivo permitindo assim estender a rede de monitoramento ao longo de toda a mina em pontos pré-estabelecidos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O microcontrolador definido para o projeto é o Arduino, ele recebe as leituras dos sensores de temperatura, umidade, pressão e gases nos pontos pré-definidos e, conforme sua programação, soa um alarme sonoro se os parâmetros estiverem fora das métricas definidas pela empresa, respeitando a legislação vigente. Os dados dos sensores medidos possibilitam a geração de curva de medição a ser analisada e o alarme tem função de alertar quanto a condições anômalas. As fichas técnicas de especificação (*DataSheet*) são fornecidas pelo fabricante dos sensores. Existem sensores com os mesmos parâmetros, porém com precisões diferentes. Fez-se a leitura dos sensores para posterior análise referente a melhor performance no sistema avaliado. A figura 3a representa o protótipo e a 3b o teste realizado na mina subterrânea.



Figura 3: (a) Protótipo desenvolvido, (b) Teste em mina subterrânea

O desenho do dispositivo foi executado no Fritzing®, software que auxilia na modelagem de circuitos usando microcontroladores como Arduino ou somente a matriz de contatos (*protoboard*) e alguns componentes eletrônicos. O software transforma o projeto num diagrama elétrico e em um desenho de placa de circuito impresso (PCI), permitindo que utilize o projeto para a confecção da PCI profissionalmente. Neste estudo, utilizou-se essa ferramenta somente para desenhar o protótipo, conforme mostrado na figura 4.

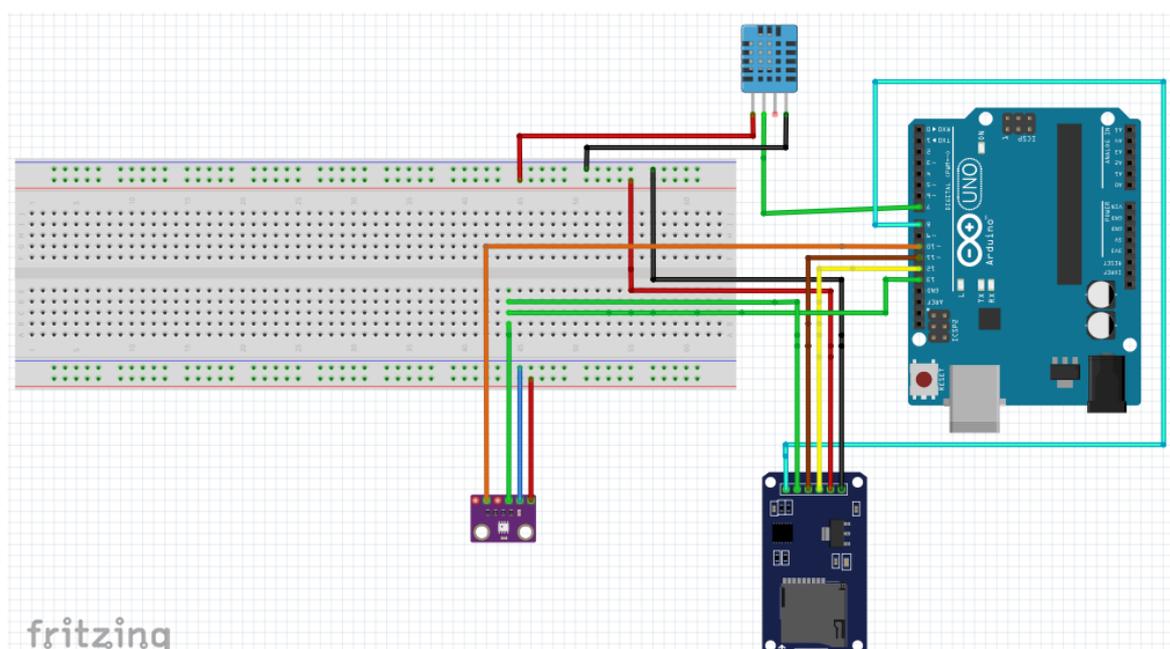


Figura 4 – Desenho do protótipo no Fritzing®

As duas notificações relacionadas aos dispositivos móveis para monitoramento em mina subterrânea apresentam a versão *wearable* para uso individual e a estação de monitoramento contínuo nos pontos normativos. O dispositivo *wearable* desenvolvido é leve e pode ser instalado ("vestido") em muitas variações, como em coletes, cintos, pulseiras ou uniforme proporcionando assim uma maior versatilidade de instalação de acordo com o conforto individual. A estação de monitoramento contínuo é complementar ao método normativo mensal estabelecido na NR22, pois este dispositivo não possui todos os sensores para cumprir a norma na totalidade. Entretanto, possibilita melhor visualização do processo de ventilação, maior controle e segurança do processo, possibilitando intervenções a qualquer momento.

Quanto a transmissão dos dados, utiliza-se um leitor de cartão micro SD dentro do dispositivo que permite gravar os dados medidos e posteriormente baixá-los externamente. Considera-se uma vantagem visto que nem todas as empresas têm uma rede *wi-fi* dentro da mina. Se a mina tiver uma rede *wi-fi*, o dispositivo pode ser adaptado alterando a programação do microcontrolador e, em seguida, os dados são gravados em um banco de dados e disponibilizados *on-line* para uma sala de controle, permitindo o monitoramento e análise imediata do responsável.

O campo de invenção envolve o desenvolvimento de estações e criação de um site, a figura 5 representa uma das configurações de exibição dos dados *on-line* e para posterior análise.

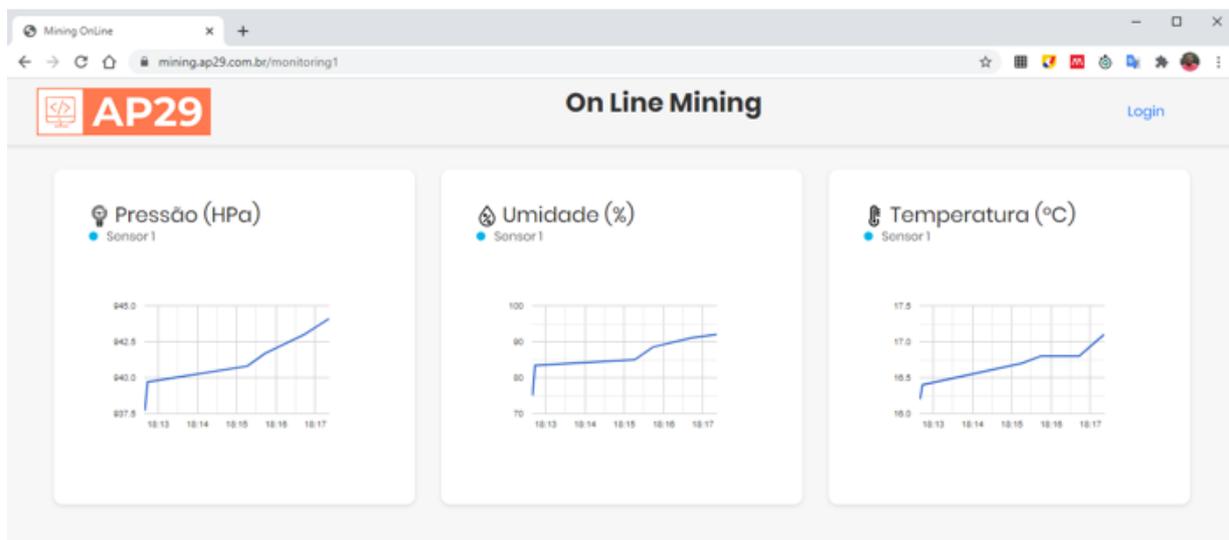


Figura 5 – Exemplo de configuração do site.

As leituras transmitidas para sala de controle localizada na superfície possibilitam o monitoramento *on-line* dos dados coletados nos pontos sugeridos. A criação de um site possibilita apresentar estas leituras em forma de tabelas e gráficos facilitando a análise pelo operador da sala de controle. Essas informações facilitam a verificação dos índices de controle do ambiente subterrâneo, se estão dentro dos limites estabelecidos e acionamento de alarmes se ultrapassar o valor estipulado. O monitoramento e a avaliação das condições climáticas subterrâneas são necessários para identificar perigos potenciais e iniciar medidas corretivas com antecedência. Além disto, este projeto automatiza uma parte morosa do processo de ventilação, a coleta de dados.

A rede exigida em uma mina subterrânea deve ser capaz de fornecer comunicações bilaterais entre o centro de controle de superfície e a operação no interior da mina subterrânea. Sendo assim resumidamente definido:

* Interior da Mina: Dispositivo instalado em local previamente determinado ao longo da mina contendo um sistema de alerta baseado em risco. Um código de computador desenvolvido para fornecer um alerta visual (*LEDs*) quando os parâmetros monitorados excederem o limite permitido ou estabelecido pela empresa. Códigos de cores indicam diferentes condições dentro da mina, auxiliando assim a análise do estado da atmosfera da mina, de forma que as medidas preventivas possam ser iniciadas quando necessário. De acordo com os valores limites, o *status* do ambiente de trabalho na mina subterrânea tem avaliação em três condições de seguro (verde), transitório (azul) e inseguro (vermelho).

* Controle de superfície: Análise de dados. Os dados de monitoramento atmosférico enviados *on-line* são importantes para fornecer as condições detalhadas e análises em diferentes seções da mina. As condições atmosféricas agravadas podem ser sentidas e as razões podem ser delineadas de modo que as medidas preventivas possam ser iniciadas. Eventos locais, como um aumento na temperatura ou concentração de gás em uma seção específica da mina, são registrados para que medidas de planejamento adequadas sejam introduzidas.

A estação de monitoramento contínuo pode ser projetada e instalada de forma personalizada em um local específico da mina e pode atender diferentes requisitos em termos de sistemas de monitoramento.

Para as conexões dos sensores ao microcontrolador (Arduino) utilizou-se a matriz de contato (*protoboard*) e fios (*jumper*s). Vale salientar que o protoboard pode ser substituído por uma placa de circuito impresso (PCI) aumentando assim a confiabilidade e evitando mal funcionamento dos sensores.

O posicionamento dos dispositivos deve ser atualizado periodicamente de acordo com o andamento das atividades de lavra ou alguma determinação gerencial. Esses dados são armazenados em tabelas de atributos associadas aos parâmetros de ventilação monitorados com a data e hora das leituras.

Na primeira etapa do projeto construiu-se o novo protótipo para a estação de monitoramento ao longo da mina, o trabalho futuro envolve mais estudos para testar a comunicação com o ambiente externo para receber e transmitir as informações necessárias. Entende-se que as informações necessárias a serem armazenadas no banco de dados serão: mapa de ventilação, localização dos pontos de monitoramento, limites requeridos pela empresa para os parâmetros que serão monitorados.

Variações dos dispositivos

Existem muitas possibilidades de variações relacionadas ao dispositivo que podem ser adaptadas de acordo com os anseios da empresa, localização, infraestrutura e tecnologias disponíveis.

A estação de monitoramento pode sofrer variações de acordo com alguns pontos como:

- Tipologia da mina: pode instalar sensores específicos cuja disponibilidade e confiabilidade deverão ser consultadas no mercado.
- Determinação de limites: os sensores podem sofrer alterações dependendo da legislação vigente do país ou mesmo do controle solicitado pela empresa.
- Transmissão de dados: depende das condições e disponibilidade das redes instaladas ou que se deseja instalar, variando o impacto financeiro dependendo das escolhas. O dispositivo projetado consegue se adaptar a qualquer um dos meios de transmissão de dados, quer seja por banda larga, *wi-fi*, rede ponto a ponto, *bluetooth* ou mesmo sinal de celular. Este é um fator essencial de análise para definir o investimento e a rapidez requerida para a transmissão de dados do interior da mina à superfície. Opcionalmente pode-se gravar somente no cartão Micro SD, porém não será possível a transmissão e visualização *on-line* dos dados.
- Caixa do dispositivo: pode ser adaptada dependendo da definição pela empresa dos sensores e componentes contidos no seu interior e o local de instalação ao longo da mina.
- Alarme sonoro: pode ser instalado dentro da mina ou na sala de controle quando houver alguma anomalia.
- Display: pode-se instalar em cada um dos pontos de monitoramento contínuo; o impacto será financeiro.
- Fonte de energia do dispositivo: dependente das instalações da empresa, podendo ser energia elétrica (estações de monitoramento) ou mesmo baterias diversas. Isso depende das funcionalidades definidas, da periodicidade das leituras, autonomia requerida e da disponibilidade da empresa.

CONCLUSÃO

O monitoramento *on-line* das condições atmosféricas permite prever riscos potenciais e implementar medidas de mitigação apropriadas que, de outra forma, criariam condições desastrosas em minas subterrâneas. Um sistema automatizado de monitoramento da ventilação em mina subterrânea integra novas tecnologias e promove a segurança, a gestão operacional e a relação custo-benefício, permitindo assim coletar um volume maior de dados de forma eficaz, capaz de enviar e analisar de forma *on-line*.

Os dispositivos podem sofrer alterações de acordo com a forma que a empresa deseja apresentar os dados para a análise, tempo de amostragem sugerido e parâmetros solicitados. A estratégia de monitoramento *on-line* para ambientes de trabalho seguros envolve a combinação de modelos de dados e programas no servidor de gerenciamento para monitorar e comunicar a mina subterrânea remotamente. Os dispositivos podem ser configurados de diversas formas e com isto alterar o conteúdo tecnológico a ser instalado nos mesmos. Exemplo: existência de rede de transmissão nos pontos que se deseja medir, periodicidade diária determinada para as medições, dentre outros. As mudanças podem ser provenientes de experimentação ou mesmo otimização do processo dentro da mina subterrânea.

Os dispositivos desenvolvidos (*wearable* e estação de monitoramento contínuo) foram montados dentro de uma caixa de plástico personalizável impressa trazendo assim uma flexibilidade ao projeto. O custo unitário dos dispositivos tem uma variação de acordo com as necessidades requeridas pela empresa, considerando-se somente as peças e dispositivos comprados no mercado (microcontrolador, sensores apresentados, placas de transmissão de dados, leitor de cartão Micro SD e conexões) o investimento foi de aproximadamente US\$ 50,00 devendo-se avaliar posteriormente os custos fixos e variáveis para cada situação/demanda e obter custo unitário de cada dispositivo.

Conclui-se que a tecnologia vestível (*wearable*) é um dispositivo inteligente que o usuário literalmente veste como se fosse um acessório. No caso deste trabalho esta tecnologia possibilita o aumento da segurança do funcionário na operação em minas subterrâneas e possibilidade de leituras *on-line* dos parâmetros relacionados à ventilação.

Através da estação de monitoramento contínuo aumenta-se a capacidade de coletar e analisar a quantidade e qualidade dos dados durante o processo mineiro, reduz-se o custo para realizar um levantamento de ventilação além de diminuir a medição manual e facilitar a análise de dados.

A criação dos dispositivos contempla uma inovação na mineração subterrânea proporcionando aumento da segurança operacional do colaborador e com isto condições mais seguras para todos. Ambos os dispositivos de monitoramento de parâmetros relacionados à ventilação de mineração subterrânea têm baixo custo e possuem grande flexibilidade quanto ao uso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Driscoll, T. 2018. “The 2016 global burden of disease arising from occupational exposures” in Occupational and Environmental Medicine, 75 (Supl. 2): A1–A650.
- [2] OIT - Organização Internacional do Trabalho (2019), Segurança e saúde no centro do futuro do trabalho: Tirando partido de 100 anos de experiência. Disponível em: <http://biblioteca.cofen.gov.br/wp-content/uploads/2020/05/segurancaesaude.pdf> em 12/02/2021. 82p.
- [3] ALMEIDA, J.S.G, CAGNIN R.F., (2019). A indústria do futuro no Brasil de no Mundo. IEDI – Instituto de Estudos para o desenvolvimento industrial. 622p.
- [4] MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. (2015) The Internet Of Things: Mapping The Value Beyond The Hype. Disponível em: http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/the_internet_of_things_the_value_of_digitizing_the_physical_world. Acesso em: 19 out. 2020.
- [5] Schwab, K. 2016. The fourth industrial revolution (World Economic Forum, Cologny). 173p.
- [6] Stacey, N.; Bradbrook S.; Reynolds J.; Williams, H. 2016. Review of trends and drivers of change in information and communication technologies and work location (EU-OSHA, Bilbao).
- [7] Xu, L. Da, He, W., & Li, S. (2014). Internet of things in industries: A survey. In IEEE Transactions on Industrial Informatics (Vol. 10, Issue 4).

- [8] MELFI, A.J.; MISI, A.; CAMPOS, D.A.; CORDANI, U.G.; (2016) Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios. Academia Brasileira de Ciências e Vale S.A., Rio de Janeiro. 422p.
- [9] RAMESH V. (2020). Introduction – Internet of Things in Mining- Disponível em: <https://www.infosysbpm.com/blogs/sourcing-procurement/Pages/iot-in-mining.aspx>, acessado em 14/02/2021.
- [10] Moridi, M. A., Kawamura, Y., Sharifzadeh, M., Chanda, E. K., Wagner, M., Jang, H., & Okawa, H. (2015). Development of underground mine monitoring and communication system integrated ZigBee and GIS. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(5), 811–818. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.07.017>
- [11] Parra, M. T., Villafruela, J. M., Castro, F., & Méndez, C. (2006). Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines. *Building and Environment*, 41(2). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.002>
- [12] Appio, F. P., De Luca, L. M., Morgan, R., & Martini, A. (2019). Patent portfolio diversity and firm profitability: A question of specialization or diversification? *Journal of Business Research*, 101(April), 255–267.
- [13] Ghisetti, C., Marzucchi, A., & Montresor, S. (2015). The open eco-innovation mode. An empirical investigation of eleven European countries. *Research Policy*, 44(5), 1080–1093.
- [14] SANTOS, R.C.P.; (2020). Desenvolvimento de soluções de baixo custo para monitoramento de minas subterrâneas e de laboratório de ventilação utilizando o conceito de internet das coisas. Tese de Doutorado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - Universidade Federal de Minas Gerais. 170p.
- [15] FINANCIAL TIMES, 2016. “Wearable devices aim to reduce workplace accidents”. Disponível em: <https://www.ft.com/content/d0bfea5c-f820-11e5-96db-fc683b5e52db> em 30/11/2020.
- [16] FINANCIAL TIMES, 2017. “IoT-linked wearables will help workers stay safe”. Disponível em: <https://www.ft.com/content/944e6efe-96cb-11e7-8c5c-c8d8fa6961bb> em 30/11/2020.