

1 Introdução

Durante a Revolução Industrial, os recursos naturais eram considerados inesgotáveis e extraídos sem qualquer preocupação. Na Inglaterra, no século XIX, a fumaça decorrente do crescimento industrial já cobria as cidades (DIAS, 2019). Até o final do século XX, decisões governamentais instigavam o crescimento econômico acelerado a qualquer custo, mesmo que, para isso, florestas inteiras precisassem ser derrubadas (SILVA & PRZYBYSZ, 2014).

Consequentemente, a contaminação do ar, da água e do solo, assim como a desigualdade social e a propagação de vetores de doenças aumentaram. Diante das mudanças climáticas, da atenuação da biodiversidade e dos danos na camada de ozônio, ficou evidente que o consumo e o padrão de industrialização precisavam ser revistos (SILVA & PRZYBYSZ, 2014; TACHIZAWA, 2019).

Nesse período, segundo o modelo de gestão proposto pelo economista e filósofo Adam Smith, o labor deveria ser dividido no maior número de atividades possível e, cada uma deveria ter operários que, de tanto executá-la, se tornassem especialistas, o que resultaria em excelência produtiva. A percepção de que os recursos naturais eram infinitos prevaleceu até a década de 1960, quando uma nova tendência é observada nas organizações, tornando ultrapassada a produção em massa e o sistema de padronização (TACHIZAWA, 2019).

Nos anos 1990, a definição de desenvolvimento sustentável é consolidada a partir da ideia de que os recursos naturais não conseguem acompanhar o ritmo com que são extraídos. Como os referenciais social e ambiental estavam sendo contestados no mundo todo, as empresas passaram a buscar a informação, colocar o cliente em foco, bem como integrar funções entre si, os produtores e os consumidores. O advento das tecnologias na transmissão de dados com o auxílio da Internet permitiu que organizações compartilhassem informações em tempo real (TACHIZAWA, 2019).

Em 2011, com o intuito de recuperar a participação no valor agregado da indústria global, na Feira de Hannover (Alemanha), surgiu um novo conceito como parte da estratégia do governo alemão para o desenvolvimento de alta tecnologia para a manufatura no país. Assim, foi originado o termo Indústria 4.0 (Quarta Revolução Industrial), do alemão *Industrie 4.0* (DRATH, HORCH, 2014).

A Quarta Revolução Industrial é o aperfeiçoamento e a continuação das revoluções industriais anteriores. Com ela, o processo produtivo está altamente aprimorado, elaborado, tecnológico e automatizado. Uma série de benefícios que facilitam as empresas a produzirem de forma rápida e inteligente, tornando o processo mais econômico e autônomo. Uma das principais funções da Indústria 4.0 nas empresas é interligar a automatização das máquinas com a tecnologia da informação, mantendo foco no processo produtivo (TERTULIANO, CÂMARA, SZABO, 2019).

Para implementar a indústria 4.0 de forma efetiva e inteligente, seis princípios devem ser levados em consideração: tempo real; virtualização; descentralização; orientação a serviços; modularidade e interoperabilidade. Todos esses pilares possuem características como coleta e tratamento de dados de forma instantânea para tomada de decisão; rastreamento e monitoramento remoto dos processos fabris; a máquina ainda consegue tomar decisões; os softwares são capazes de disponibilizar soluções; há flexibilidade das tarefas, bem como conexão entre máquinas e sistemas (TERTULIANO, CÂMARA, SZABO, 2019).

Este artigo buscou ferramentas da indústria 4.0, como Inteligência Artificial, *machine learning* e *big data*, com o intuito de incentivar sua implementação na cadeia mineradora, a fim

de que elas forneçam maior controle, segurança, monitoramento em tempo real, evitando assim impactos ambientais.

2 Principais eventos mundiais

No mundo todo, movimentos sociais contestavam a mensuração do desenvolvimento de um país pelo seu Produto Interno Bruto (PIB), já que o modelo econômico adotado aumentava a desigualdade social, gerando insatisfação. Dessa forma, grupos intelectuais e iniciativas políticas buscaram uma mudança de paradigma, que revisasse o conceito de desenvolvimento assim como a relação entre ser humano e meio ambiente (RADOMSKY & PENAFIEL, 2013).

Ano	Evento	Decretado
1972	Conferência de Estocolmo	Na Suécia, esta conferência estabeleceu uma declaração, a qual exigia que os países adotassem medidas para conservar a natureza, dando início a elaboração do conceito de desenvolvimento sustentável.
1987	Comissão Brundtland	Na Noruega, foi publicado o Relatório Brundtland ou Nosso futuro comum, que alertava para o elevado uso de recursos e sua incompatibilidade com os ecossistemas.
1992	Rio-92	Na cidade do Rio de Janeiro, foi criada a Agenda 21, documento que propunha procedimentos inéditos que aliavam o desenvolvimento econômico à conservação ambiental e à justiça social, consagrando o termo desenvolvimento sustentável.
1997	Conferência das Partes (COP3)	No Japão, foi assinado o Protocolo de Kyoto, um acordo no qual diversos países se comprometeram a mitigar a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE).
2002	Rio+10	Em Johannesburgo, foram elaborados princípios para ratificar os compromissos da Agenda 21, além de discutir o desenvolvimento sustentável e o crescimento econômico.
2012	RIO+20	Na cidade do Rio de Janeiro, ela abordou a economia verde, bem como a erradicação da pobreza, alinhando questões sociais ao desenvolvimento sustentável.
2015	Conferência das Partes (COP21)	Em Paris, foram estabelecidos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Figura 1. Principais eventos mundiais

Em 1972, na Suécia, 113 países e 250 organizações ambientais reuniram-se para debater as principais questões e temas referentes ao meio ambiente. A Conferência de Estocolmo teve como resultado uma declaração, a qual estabeleceu que as gerações futuras e a população mundial teriam o direito de viver em um ambiente com saúde e sem degradações (BOFF, 2016).

Em 1992, no Rio de Janeiro, a Rio-92 ou Eco-92, ficou conhecida por ter a assinatura de cinco importantes acordos ambientais: a Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento; a Agenda 21; os Princípios para a Administração Sustentável das Florestas; a Convenção da Biodiversidade; e a Convenção do Clima. Ficou marcado que os 172 países envolvidos voltariam a se reunir para discutir os resultados obtidos (BARSANO & BARBOSA, 2014; BOFF, 2016).

A Rio+10, em 2002, foi realizada em Johannesburgo, na África do Sul, e teve como objetivo a consolidação da questão do desenvolvimento sustentável com base no uso e conservação dos recursos naturais renováveis. Porém muitos países continuaram com suas ambições políticas e não apresentaram resultados concretos que favorecessem a preservação ambiental (BOFF, 2016).

A Rio+20, em 2012, sediada no Rio de Janeiro, reuniu 193 países e teve uma das maiores coberturas jornalísticas mundiais. O resultado foi a avaliação das políticas ambientais já adotadas e a produção de um documento final, no qual foi reafirmada uma série de compromissos. Contudo, surgiram críticas novamente, desta vez direcionadas à falta de clareza, objetividade e de metas concretas para que os países reduzissem a emissão de poluentes e preservassem suas áreas naturais (BOFF, 2016).

A Agenda 2030 consiste em um plano de ação global para promover a sustentabilidade, que pode ser compreendida como um guia para orientar os países envolvidos a tornar o planeta mais sustentável até 2030 para as próximas gerações. Nela, estão inseridos os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para discutir o futuro do planeta, do meio ambiente e da sociedade. Na reunião estavam presentes representantes de 193 países, quando uma lista com 17 ODS foi criada. Ela contém as principais metas para amenizar os obstáculos que mundo enfrenta (DIAS, 2019).



Figura 2. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
Fonte: Nações Unidas Brasil.

Esses 17 objetivos estão interligados e mesclam as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental. São metas a serem cumpridas pelos governos, pela sociedade civil, pelo setor privado e por todos os cidadãos até 2030. Elas buscam estimular e apoiar ações em áreas de importância crucial para a humanidade: Pessoas, Planeta, Prosperidade, Paz e Parcerias.

3 Direito Ambiental

Segundo José Afonso Silva (2010), o direito ambiental brasileiro não tem o intuito de frear o desenvolvimento socioeconômico. Caso este seja freado, irá gerar indiretamente uma maior agressão ao meio ambiente, com consequências de aparições de atividades irregulares. A legislação ambiental brasileira visa proteger e preservar o meio ambiente, através de leis.

No Brasil, não havia quem zelasse por ele até meados do século XIX, mesmo porque, pela percepção da época, ele se regenerava, não importava a proporção do estrago. De acordo

com Jaques (2014), “apenas por volta do final do século XIX a humanidade passou a reconhecer – ainda que de forma lenta e gradual – a importância de promover ações contra a degradação do meio ambiente, em razão da preocupação exclusiva que se tinha até então com o progresso a qualquer custo”.

No ano de 1998, foi criada a Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605), que podem ser definidos como aqueles que agridem e degradam o meio ambiente, o ordenamento urbano, a saúde pública e ainda o patrimônio cultural, quando infringem os limites determinados pela lei, ou quando ignoram regras ambientais (SECCO, 2020).

A lei prevê seis tipos de violações: crime contra a fauna, crime contra a flora, poluição, crimes contra o ordenamento urbano e o patrimônio cultural, crimes contra a administração ambiental, e infrações administrativas. Sendo assim, qualquer pessoa jurídica que praticar, ou ver alguém praticando, algum dano ao meio ambiente, estará sujeita a penalidades. Para que a sanção seja imposta, serão verificados: a magnitude do acontecimento, o histórico criminal daquele que infringiu a lei e ainda sua situação financeira.

4 Barragens de Rejeitos

A Lei nº 14.066, de 30/09/2020 define como barragem “qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”.

As barragens de rejeito são estruturas construídas pelas mineradoras com o intuito de armazenar os rejeitos produzidos em larga escala no ato do beneficiamento do minério, e utilizadas para depositar os resíduos e a água gerados a partir do beneficiamento do minério. Elas auxiliam no processo de exploração de minério de ferro, que será transformado em um produto rico e que supra às exigências do mercado internacional, mas para isso, é necessário passar pelo processo de beneficiamento. A formação das barragens ocorre a partir de um barramento maciço que pode ser feito de blocos de rocha, solo compactado ou rejeitos. Sua maior parte é composta por sílica (areia) e não apresenta nenhum elemento químico danoso à saúde. Basicamente existem três formas construtivas para barragens de rejeito: (i) Método à jusante, (ii) Método à montante e (iii) Método da linha de centro.

- Método à jusante: essa barragem utiliza rejeitos consolidados para os alteamentos. Vale considerar a possibilidade de aumentar a capacidade da barragem com o mesmo tipo de material do dique inicial ou com pedra e argila. Ela possui os alteamentos subsequentes ao dique de partida feitos para a direção corrente da água até atingir a cota de projeto. Cada alteamento é estruturalmente independente da disposição do rejeito, a fim de melhorar a estabilidade da estrutura. Portanto, a barragem cresce por cima dela mesma, tornando-a mais segura, já que não se trabalha com degraus, mas sim com uma espécie de pirâmide.
- Método à montante: o corpo da barragem é construído com o uso de rejeito através de alteamentos sucessivos sobre o próprio rejeito depositado. Os alteamentos são realizados no sentido contrário ao fluxo de água (montante). A barragem necessita de rejeito grosso para que o maciço possa ser construído.

- Método da linha de centro: é um sistema intermediário em termos de custo, com disposição semelhante ao método à montante. No entanto, um dreno acompanha o alteamento da construção e os rejeitos são lançados a partir da crista do dique inicial.

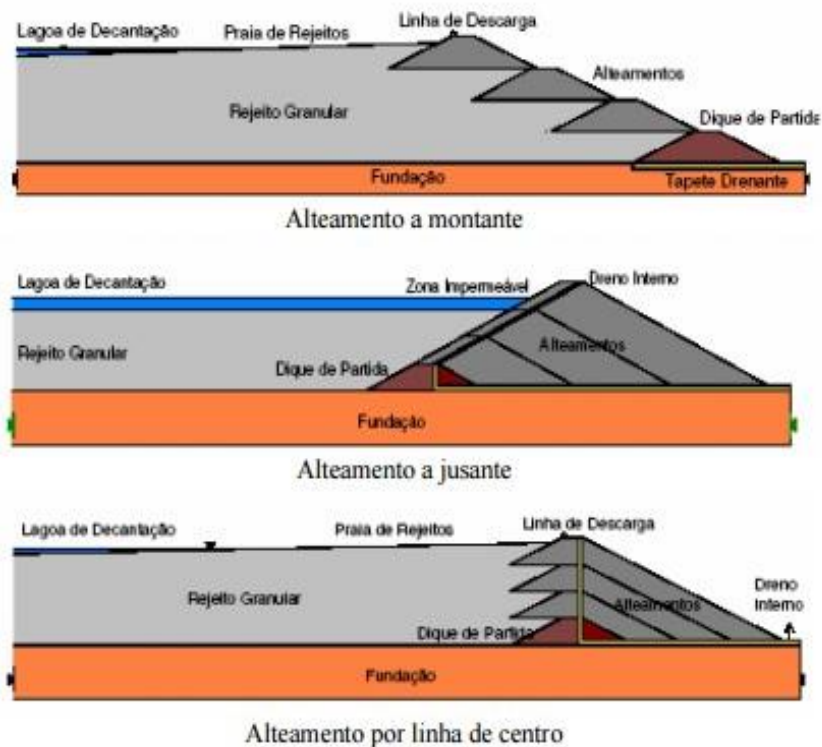


Figura 3. Métodos construtivos para barragens de rejeitos

Fonte: <http://cbdb.org.br/acao-de-esclarecimento-do-cbdb-junto-a-imprensa-quem-e-o-comite-brasileiro-debarragens-cbdb>

De acordo com Barrera, Valenzuela e Campaña (2011), houve a proibição da construção de barragens do tipo montante no Chile, após evento de rupturas de barragens, alguns ocorridos em 1928 na mina El Teniente e em 1965 na Mina El Cobre. Essas rupturas foram decorrentes de abalos da ordem de 7,6 a 8 graus de magnitude que atingiram o país.

Segundo Ávila e Sawaya (2011), as barragens de rejeitos no Brasil foram originadas anteriormente à corrida do ouro nos Estados Unidos, sendo que as atividades de mineração de ouro começaram com a mina de passagem, em Mariana, Minas Gerais.

5 Rompimento de barragens no Brasil

Em 2015, a lama de rejeitos arrastada pelo rompimento da barragem em Mariana impactou cerca de 36 municípios, se estendendo por 663 km e chegando até a foz do Rio Doce. A mineração no município era responsável por 80% da receita (FREITAS et al, 2019).

Já em 2019, o rompimento da barragem em Brumadinho (MG) fez com que aproximadamente 13 milhões de m³ de rejeitos fossem lançados no meio ambiente. O desastre ainda afetou a biodiversidade do local. A lama contaminou o Rio Paraopeba, compreendendo

uma extensão de 250 km. Nesse município, a mineração abrangia 60% da receita (FREITAS et al, 2019).

Essas tragédias provocaram inúmeras perdas, dentre óbitos e desaparecidos, além de materiais, como diversas casas que foram destruídas por causa da lama. Também houve contaminação de rios, afetando pessoas que dependiam dele, e dos solos, devido ao transporte de rejeitos onde se encontram contaminantes. Diante desses desastres, faz-se necessário aumentar o monitoramento, a fiscalização e a segurança na operação de atividades mineradoras, bem como de suas barragens (FREITAS et al, 2019).

Os impactos ambientais, danos, doenças, riscos e respostas da área de saúde de Mariana ficaram como uma lição aprendida, o que possibilitou uma série de ações do Sistema Único de Saúde (SUS) em Brumadinho, o que reduziu o risco de doenças e aumentou a vigilância e os cuidados referentes à saúde (FREITAS et al, 2019).

6 Empilhamento a seco

Após alguns rompimentos de barragens no Brasil, tornou-se alarmante a necessidade de revisar o processo produtivo e as demais tecnologias empregadas na disposição dos rejeitos para as mineradoras que se destinam a evoluir de forma sustentável e, com isso, ganhou destaque como uma forma alternativa o empilhamento a seco, *dry stacking*, além de estar se tornando bastante atraente para o mercado (TESSAROTTO, 2015).

A técnica permite filtrar e reutilizar a água do rejeito, e assim, possibilita que este último seja empilhado, reduzindo o uso das barragens. Uma das vantagens é que não há necessidade de utilizar água para processar o minério extraído, desse modo, não há necessidade de construção de barragens de rejeito. Também há ganhos como maior economia de recursos, menor consumo de energia, etapas reduzidas na produção, menos equipamentos e uma operação mais simples e segura.

7 Gestão Ambiental

A gestão ambiental pode ser definida como a gerência de ações sociais e econômicas com o intuito de utilizar de forma racional os recursos naturais, sejam eles renováveis ou não, a fim de preservar o meio ambiente para as gerações futuras. Ela busca implementar práticas que assegurem a preservação e a conservação da biodiversidade, o reaproveitamento de matérias-primas e a diminuição do impacto ambiental (BARSANO & BARBOSA, 2014).

Para que sua adoção seja efetiva, é fundamental que haja uma área dentro da empresa que fique encarregada do envolvimento ambiental da organização, composta por um gestor e sua equipe. O responsável pelo setor deve ter uma rede de contatos bastante ampla, tanto no nível interno quanto no externo (DONAIRE & OLIVEIRA, 2018).



Figura 4. Rede de contatos.

Fonte: DONAIRE & OLIVEIRA (2018)

Quando a cúpula administrativa da empresa compreende que a variável ecológica é importante e que deve ser considerada na política organizacional, há necessidade de uma equipe especializada para sua monitoração. Diante disso, ela pode contratar assessoria específica para firmar este compromisso. Já o amadurecimento da sustentabilidade nas organizações que buscam a excelência ambiental é evidenciado quando interfere na estrutura da empresa e se torna um dos pilares da cultura organizacional (DONAIRE & OLIVEIRA, 2018).

Os colaboradores são cruciais para que a imagem ambiental da empresa seja garantida internamente e disseminada junto à comunidade local onde vivem. De modo similar, empresários e a alta administração possuem um papel de suma importância para a transmissão dessa imagem para o mundo exterior da empresa, como a sociedade, o governo e os órgãos de controle ambiental (DONAIRE & OLIVEIRA, 2018).

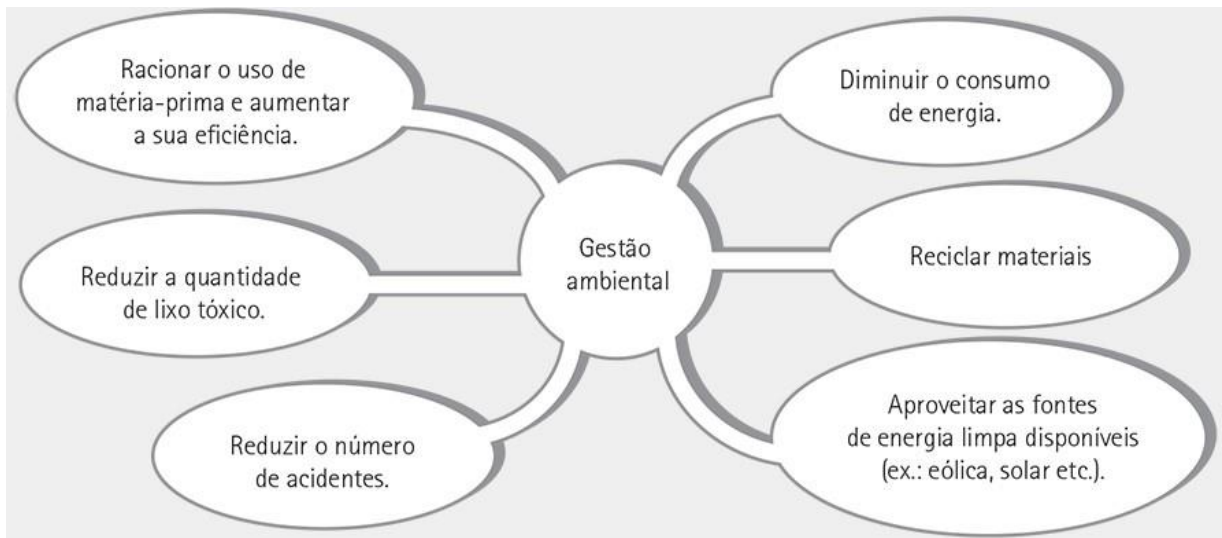


Figura 5. Estratégias para adotar a gestão ambiental
 Fonte: CURI (2011)

É de suma importância elaborar um plano, como ilustra a Figura 5, para descobrir como os recursos podem atingir um desempenho melhor e se existem alternativas. Também deve ser considerada a quantidade de lixo tóxico gerado pela empresa e se ele pode ser substituído, para isso, é necessária uma reestruturação de processos.

Vale ressaltar que a segurança do trabalho é extremamente relevante e, para isso, recomenda-se o uso de Equipamento de Proteção Individual (EPI). Os materiais utilizados na empresa podem ser reciclados ou até mesmo reutilizados por outras empresas. Se a empresa não conseguir adotar alguma fonte de energia limpa, ela pode fazer um estudo para que a sua energia seja reduzida ou reaproveitada.

8 As Revoluções Industriais

Schules e Cleto (2017) apontam os possíveis impactos da Indústria 4.0 sobre o meio ambiente, dentre eles: redução no consumo de recursos; melhor eficiência no uso da energia; menores índices de poluição; menor degradação do meio ambiente; redução nas taxas de erro (retrabalho); redução nos custos de *setup*; minimização dos defeitos de qualidade; custo da produção independente do tamanho do lote; respostas mais rápidas nas demandas do mercado; e menores prazos de entrega. Porém, para chegar à quarta revolução industrial é preciso abordar as precedentes.

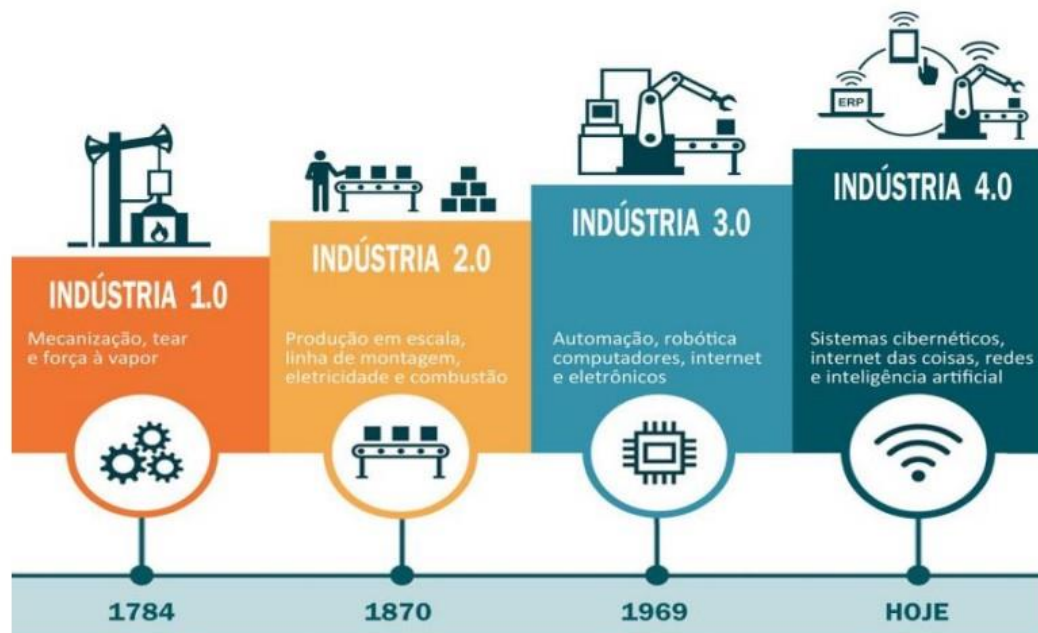


Figura 6. Revoluções industriais

Fonte: TERTULIANO, CÂMARA, SZABO (2019)

A Primeira Revolução Industrial ocorreu na Inglaterra, no século XVIII (1780-1830). Este país foi o primeiro país a passar por esta revolução. Com ela, a vida das pessoas foi totalmente transformada, visto que o modo de vida sofreu alterações, deixando-os livres para descobrir ou criar novos caminhos, se soubessem ou pudessem (HOBSBAWM, 1983).

Segundo Decicino (2011), a Indústria 1.0 foi caracterizada pelo uso de novas fontes de energia, pela utilização de máquinas movidas a vapor, pelo desenvolvimento dos meios de comunicação, como o telégrafo, e pela divisão e especialização do trabalho. Estas alterações fizeram com que os artesãos perdessem sua autonomia.

A Revolução Industrial 2.0, no final do século XIX, teve início com o Fordismo, modelo que revolucionou a indústria automobilística, quando Ford introduziu a primeira linha de montagem automatizada e produção em massa (ERA, 2008 *apud* BONILLA, 2019).

O filme *Tempos Modernos*, dirigido por Charlie Chaplin, elucida essa época e faz uma crítica ao modelo fordista, já que os trabalhadores desempenhavam uma única função na linha de montagem, executando a mesma ação diversas vezes. Com isso, não tinham conhecimento das outras etapas do processo produtivo ou do produto final.

Nesta época, entre 1850 a 1910, outros países europeus, entre eles Bélgica, Itália e Alemanha, entram no processo de industrialização, assim como Rússia e Japão, no Oriente, e Estados Unidos, na América (CUOGO, 2012).

Para Almeida (2005), a Segunda Revolução Industrial proporcionou enorme impacto na economia com o surgimento da eletricidade e da química. Estes processos impulsionaram a criação dos novos tipos de motores, elétricos e à explosão, de novos materiais e processos de fabricação em grandes empresas, do telégrafo sem fio e do rádio (CAVALCANTE, 2019).

Medeiros e Rocha (2004) resumem que a Terceira Revolução Industrial constitui um processo difuso que repercute na dimensão cultural, o pós-modernismo influencia a arte e os costumes. No que tange à política e à economia gerou o chamado neoliberalismo e a era da

globalização. Também esclarecem que esta traz como um dos seus desdobramentos mais visíveis as novas tecnologias, o desemprego e as novas formas de organização do trabalho.

A Quarta Revolução Industrial está fundamentada em tecnologias como a Internet das coisas (IoT) e objetos inteligentes, construindo sistemas com maior capacidade de autogestão, possibilitando maior customização dos produtos sem que haja perda das vantagens da produção em massa (LASI et al., 2014). A Indústria 4.0 antevê a colaboração entre humanos e máquinas, mesmo que em posições geográficas distantes, formando grandes redes e fornecendo produtos e autonomia em serviços (SILVA; SANTOS FILHO; MIYAGI, 2015).

O que distingue a indústria 4.0 das demais é que o processo de fabricação sofre evolução em uma célula única automatizada voltada para sistemas que possuem automatização e integração que se comunicam com outros, assim, cooperando para uma flexibilidade maior, produtividade, qualidade dos sistemas produtivos e velocidade.

8.1 Indústria 4.0

Um dos ramos da Indústria 4.0 é a inteligência artificial (IA), que é definida como a capacidade dos programas computacionais de operar de forma similar aos processos de pensamento humano (COLLINS, 2018).

O processo de lógica da IA é dividido em seis tipos: aprendizado de máquina; processamento de linguagem natural; reconhecimento de fala; reconhecimento de imagens; robótica; e planejamento. Eles compreendem o desenvolvimento de algoritmos que permitem que o sistema aprenda com experiências passadas, identifique padrões através de métodos estatísticos, faça uma determinação ou predição e melhore seu desempenho automaticamente (JAVAPOINT, 2019).

Uma grande contribuição da IA na mineração é a aplicação de Sistemas de Transporte Autônomos (AHS), que possibilitam melhor controle dos veículos, favorecendo a segurança dos funcionários, prolongando a vida útil do equipamento e proporcionando maior eficiência produtiva (KLEIN, 2019).

A IA também pode ser empregada para identificar corpos de minério em áreas inexploradas, mesmo sem dados geológicos prévios daquela região. Para isso, a plataforma Earth AI utiliza *machine learning* para que dados geofísicos sejam analisados a fim de revelar possíveis mineralizações, possibilitando explorações viáveis, econômica e geologicamente (TIAGO, 2019b).

Com o auxílio do *machine learning*, as mineradoras conseguirão encontrar mais depósitos minerais com facilidade, aprimorar a fragmentação do minério, fazer manutenções de modo mais eficiente, além de estender a vida útil dos equipamentos. Essas empresas ainda poderão regular o fluxo de entrada de matérias-primas quase instantaneamente, contribuindo para a pureza do material (NETO, 2019).

Já a geometurgia automatizada permite maior controle de monitoramento de beneficiamento do minério. Seu uso pode ser combinado ao de *SmartTags*, desse modo, os dados são recolhidos automaticamente de forma contínua, permitindo a avaliação de cada tipo de minério e o refino de classificações, favorecendo o ajuste do plano da lavra para que o desempenho geral ideal seja mantido (GEOMETALURGIA, 2018).

E o instrumento Ore Sorting faz a separação dos materiais de modo automatizado através dos seus sensores que distinguem cor, tamanho, transparência e ainda, o formato. Nele, jatos de

ar comprimido são empregados, contribuindo para um aumento da eficiência energética, já que ele não utiliza água, como é feito geralmente por esse setor (A TECNOLOGIA, 2018).

O emprego dessas tecnologias pode ser considerado uma estratégia que mitiga os danos ambientais, a retirada de matérias-primas, bem como a geração de resíduos e ainda reduz custos, como combustível e de manutenção de veículos (NETO, 2019).

Cabe destacar que, mesmo com essas tecnologias, as empresas ainda têm por hábito manter maquinistas a bordo dos veículos autônomos, para supervisionar colaboradores em centrais de controle, caso haja alguma falha sistêmica; e ainda analistas, para melhor análise e interpretação dos dados coletados. Tais atitudes demonstram que, embora a indústria 4.0 traga diversos benefícios, ainda há incerteza sobre seus resultados (NETO, 2019).

Também vale ressaltar que com o avanço da tecnologia, muitos trabalhadores perderam seus empregos, logo, cabe às empresas fornecer treinamentos para seus funcionários, por exemplo, através de cursos voltados para a tecnologia que está sendo empregada.

A IoT pode ser compreendida como a “interconexão, por meio da Internet, de dispositivos de acesso à rede embutidos em máquinas, equipamentos e objetos, permitindo que eles enviem e recebam dados” (NETO, 2019). Seu emprego permite mais controle da produção. A Deloitte sugere que as empresas incorporem em seus sistemas produtivos a Rede de Suprimento Digital (DSN), a fim de impulsionar algoritmos complexos, IA e *machine learning* para que os dados dos integrantes da cadeia produtiva sejam transformados em soluções para resolver problemas enfrentados (BRIGHTMORE, 2019d).

Outro componente fundamental na Quarta Revolução Industrial é a computação em nuvem, que se baseia em um modelo que permite acesso onipresente, conveniente e de rede sob demanda a um conjunto compartilhado de recursos de computação que podem ser rapidamente providos com o mínimo esforço de gerenciamento ou interação com o provedor de serviços (CORREIA, 2011).

9 Metodologia

Para a realização deste artigo, foi feito um estudo qualitativo, no qual buscou-se embasamento em livros e publicações científicas que abordassem as seguintes palavras-chave: indústria 4.0 e mineração. Os resultados encontrados foram filtrados por título, de modo que restassem apenas os mais relevantes. Em seguida, foi feita a leitura dos resumos para que fossem escolhidos aqueles que atendessem aos pilares ambiental, social e econômico, a fim de compor uma pesquisa exploratória que incentivasse a implementação de ferramentas da indústria 4.0 para uma mineração mais sustentável no Brasil.

10 Considerações finais

No Brasil, acontecem impactos ambientais anualmente. Contudo, vale ponderar se eles poderiam ter sido mitigados ou evitados. Com esse intuito, o artigo apresentou uma fundamentação teórica sobre aplicações da indústria 4.0, como inteligência artificial, *machine learning*, IoT e *big data*, para auxiliar nos processos de mineração, proporcionando mais segurança para os operadores, menos danos ao meio ambiente e até mesmo reduzindo custos.

Apesar da mineração ser uma das principais atividades econômicas no Brasil, a literatura que a associa à indústria 4.0 ainda é escassa, devido ao crescimento gradual desta no país. Desse

modo, é atribuição das empresas fornecer treinamentos ou subsídios para seus colaboradores, para que eles adquiram conhecimento sobre os equipamentos e tecnologias envolvidas.

O estudo revelou que a barragem de rejeitos é algo preocupante por conta dos diversos acidentes que ocorreram no Brasil. Com isso, o empilhamento a seco vem se tornando uma opção atraente com o intuito de mitigar possíveis impactos ambientais.

Referências

ALMEIDA, P. R. O Brasil e a nanotecnologia: rumo à quarta revolução industrial. Espaço Acadêmico, Maringá, a. VI, n.52, set. 2005.

A TECNOLOGIA do Ore Sorting. Revista Brasil Mineral. Ano XXXV, n.385, p.16-16. out. 2018.

ÁVILA, J. P. & SAWAYA, M. (2011). As barragens de rejeitos no Brasil: Sua evolução nos últimos anos. In DeMello, F. M. & Piasentin, C. (Orgs). História das barragens do Brasil: Séc. XIX, Séc XX e Séc. XXI. (1ª ed., s/cap., pp.369-395). Rio de Janeiro, Brasil: CBDB, 524p.

BARRERA, S.; VALENZUELA, L.; CAMPAÑA, J. Sand Tailings Dams: Design, Construction and Operation. In: 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TAILINGS AND MINE WASTE, 15., 2011, Vancouver. Proceedings... Tailings and Mine Waste. Vancouver: Institute Of Mining Engineering. p. 1 – 6. 2011.

BARSAÑO, Paulo Roberto & BARBOSA, Rildo Pereira. Gestão ambiental. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

BOFF, LEONARDO. Sustentabilidade: o que é: o que não é. 5. ed. revista e ampliada – Petrópolis, RJ: Vozes, 2016.

BRIGHTMORE, D. Chile: A country of opportunities in investment and development. Mining Global Magazine. p.62-71, jul. 2019a.

COLLINS. Collins English Dictionary. (2018). Disponível em: <<https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/artificial-intelligence>>. Acessado em 26 jul. 2021.

CORREIA, F. Definição de computação em nuvem segundo o NIST. Plataforma Nuvem, 2011. Disponível em: <<https://plataformanuvem.wordpress.com/2011/11/21/definicao-decomputacao-em-nuvem-segundo-o-nist/>>. Acessado em 28 jul. 2021.

COTA, Eduardo et al. Robótica na mineração. Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração, v.47, num.2, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Marcos-Torre/publication/320725502_ROBOTICA_NA_MINERACAO/links/5a00a412a6fdcc82a3131ae7/ROBOTICA-NA-MINERACAO.pdf>. Acessado em 31 jul. 2021.

CUOGO, F. C. Reflexo da terceira revolução industrial na sociedade informacional e sua relação com a educação à distância. - Rio Grande do Sul: Universidade Regional do Noroeste de Estado do Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em:
<http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2832/Monografia_UNIJUI_Francisco.pdf?sequence=1>. Acessado em 30 jul. 2021.

CURI, Denise. Gestão ambiental. - São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

DIAS, Reinaldo. Gestão ambiental: responsabilidade social e sustentabilidade. - 3. ed. - São Paulo: Atlas, 2019.

DONAIRE, Denis & OLIVEIRA, Edenis Cesar de. Gestão ambiental na empresa. - 3. ed. rev. e atual. - São Paulo: Atlas, 2018.

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or hype? IEEE industrial electronics magazine, v. 8, n. 2, p. 56–58, 2014.

ERA, P. Patterns of Work in the Post-Fordist Era: Fordism and PostFordism. Capital & Class, 32(3), 152–157, 2008.

FREITAS, Carlos Machado de et al. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e saúde coletiva. Espaço temático: mineração e desastres ambientais. Cad. Saúde Pública 35 (5), 2019. Disponível em
<<https://www.scielo.br/j/csp/a/5p9ZRBrGkfrmtPBtSLcs9j/?lang=pt&format=html>>. Acessado em 30 jul. 2021.

GEOMETALURGIA automatizada. Revista Brasil Mineral. Ano XXXV, n.385, p.12-13. out. 2018.

HOBBSAWM, Eric. J. Da Revolução Industrial inglesa ao imperialismo. 3. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1983.

JAQUES, Marcelo Dias. A tutela internacional do meio ambiente: um contexto histórico. Belo Horizonte, 2014. Disponível em:
<<https://pdfs.semanticscholar.org/28c1/776609b08dea461d5fff397a9948158f0ab5.pdf>>
Acessado em 28 jul. 2021.

JAVAPOINT. Subsets of AI. Javatpoint, 2019. Disponível em:
<<https://www.javatpoint.com/subsets-of-ai>>. Acessado em 26 jul 2021.

KLEIN, P. The frontier of analytics and artificial intelligence. In: DELOITTE. Tracking the trends 2019: The top 10 issues transforming the future of mining. p.10-15. 2018.

LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H.-G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering, Springer, v. 6, n. 4, p. 239–242, 2014.

LEI Nº 14.066, de 30/09/2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Disponível em <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982>>. Acessado em 30 jul. 2021.

MACHADO, Vanessa de Souza & SACCOL, Juliana. Introdução à gestão ambiental. - Porto Alegre: SAGAH, 2016.

MEDEIROS, S.M. & ROCHA, S. M. M. Considerações sobre a terceira Revolução Industrial e a força de trabalho em saúde em Natal. *Ciência & Saúde Coletiva*, 9(2): 399-409, 2004.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acessado em 25 jul. 2021.

NETO, Euler Daltro Cesáreo. Os impactos da indústria 4.0 na mineração. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/28296/4/ImpactosInd%C3%BAstriaMinera%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acessado em 29 jul. 2021.

RADOMSKY, Guilherme & PENAFIEL, Adriana. Desenvolvimento e sustentabilidade. Curitiba: InterSaberes, 2013.

SCHULES, M.V., CLETO, Marcelo Gechele. Impactos da Indústria 4.0 em sustentabilidade: uma revisão da literatura. Artigo apresentado e publicado nos anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Ponta Grossa, Brasil, 6 a 8 de Dezembro de 2017.

SECCO, Rubens Corrêa. Legislação ambiental e da saúde no Brasil. - Curitiba: Contentus, 2020.

SILVA, Cesar & PRZYBYSZ, Leane Chamma Barbar. Sistema de gestão ambiental. Curitiba: InterSaberes, 2014.

SILVA, José Afonso da. Direito ambiental constitucional. 8. ed. atual. São Paulo: Malheiros, 2010.

SILVA, R. M. da; SANTOS FILHO, D. J.; MIYAGI, P. E. Modelagem de Sistema de Controle da Indústria 4.0 Baseada em Holon, Agente, Rede de Petri e Arquitetura Orientada a Serviços. In: XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Natal, 2015.

TACHIZAWA, Takeshy. Gestão ambiental e responsabilidade social corporativa: os paradigmas do novo contexto empresarial. - 9. ed. - São Paulo: Atlas, 2019.



TERTULIANO, Ian; CÂMARA, Marina; SZABO, Victor. Indústria 4.0: a inovação aliada à sustentabilidade. São Paulo: Pontifícia Universidade Católica, 2019. Disponível em: <https://www.pucsp.br/sites/default/files/download/eventos/bisus/14-industria_inovacao_infraestrutura.pdf>. Acessado em 28 jul. 2021.

TESSAROTTO, C. Empilhamento a seco para rejeitos de processos minerais (dry stacking). Minas Gerais, 2015. Disponível em: <[https://www.artigos.entmme.org/download/2015/separa%C3%87%C3%83o_s%C3%93lidol%C3%8Dquido/TESSAROTTO,%20C.%20-%20EMPILHAMENTO%20A%20SECO%20PARA%20REJEITOS%20DE%20PROCESSOS%20MINERAIS%20\(DRY%20STACKING\).pdf](https://www.artigos.entmme.org/download/2015/separa%C3%87%C3%83o_s%C3%93lidol%C3%8Dquido/TESSAROTTO,%20C.%20-%20EMPILHAMENTO%20A%20SECO%20PARA%20REJEITOS%20DE%20PROCESSOS%20MINERAIS%20(DRY%20STACKING).pdf)>. Acessado em 30 jul. 2021.

TIAGO, E. Transformação digital está em curso nas mineradoras. Valor Econômico. 09 de set. de 2019b. Disponível em: <<https://valor.globo.com/empresas/noticia/2019/09/09/transformacao-digital-esta-emcurso-nas-mineradoras.ghtml>>. Acessado em 25 jul. 2021.