

**INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS  
SENSORIAIS E INTERNET  
DAS COISAS PARA  
SUPPORTO À TOMADA DE  
DECISÃO EM MANUTENÇÃO  
PREDITIVA DE  
EQUIPAMENTOS DE  
MINERAÇÃO**

**INTEGRATION OF SENSOR-BASED METHODS AND THE INTERNET OF  
THINGS FOR DECISION SUPPORT IN PREDICTIVE MAINTENANCE OF  
MINING EQUIPMENT**

Engenharias • 12/05/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/778378858](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/778378858)

---

Daniel Magalhães Viegas Junior

---

## RESUMO

A crescente complexidade das operações mineradoras tem exigido abordagens mais precisas e antecipatórias para a gestão de ativos críticos, especialmente no que se refere à manutenção de equipamentos. Nesse contexto, a manutenção preditiva associada à Internet das Coisas desponta como uma alternativa capaz de transformar a forma como falhas são identificadas e tratadas. O presente estudo tem como objetivo analisar a integração entre métodos sensoriais e IoT como suporte à tomada de decisão em manutenção preditiva de equipamentos de mineração. Trata-se de uma pesquisa de natureza qualitativa e caráter bibliográfico, fundamentada em produções científicas e técnicas que abordam sensores industriais, conectividade e análise de dados aplicados à manutenção. Os resultados evidenciam que a utilização de sensores possibilita a coleta contínua de variáveis operacionais, enquanto a IoT permite a integração e o processamento dessas informações em tempo real, favorecendo diagnósticos mais precisos e intervenções mais eficientes. Observa-se que a combinação dessas tecnologias contribui para a redução de falhas inesperadas, otimização de recursos e aumento da disponibilidade dos equipamentos. Conclui-se que o uso inteligente dos dados constitui elemento central para a consolidação de uma manutenção orientada por evidências, capaz de elevar o desempenho operacional e a competitividade no setor mineral.

**Palavras-chave:** Manutenção Preditiva; Internet das Coisas; Sensores Industriais.

## ABSTRACT

The increasing complexity of mining operations has demanded more precise and anticipatory approaches to the management of critical assets, especially regarding equipment maintenance. In this

context, predictive maintenance associated with the Internet of Things emerges as an alternative capable of transforming how failures are identified and addressed. This study aims to analyze the integration between sensory methods and IoT as support for decision-making in predictive maintenance of mining equipment. This is a qualitative and bibliographical research, based on scientific and technical productions that address industrial sensors, connectivity, and data analysis applied to maintenance. The results show that the use of sensors enables the continuous collection of operational variables, while IoT allows the integration and processing of this information in real time, favoring more accurate diagnoses and more efficient interventions. It is observed that the combination of these technologies contributes to the reduction of unexpected failures, optimization of resources, and increased equipment availability. It is concluded that the intelligent use of data is a central element for consolidating evidence-based maintenance, capable of increasing operational performance and competitiveness in the mining sector.

**Keywords:** Predictive Maintenance; Internet of Things; Industrial Sensors.

## 1. INTRODUÇÃO

A manutenção de equipamentos na mineração sempre esteve diretamente ligada à continuidade operacional, à segurança dos trabalhadores e ao desempenho econômico das operações. Trata-se de um setor intensivo em ativos, no qual falhas não representam apenas interrupções pontuais, mas desencadeiam efeitos em cadeia que comprometem produtividade, prazos e custos. Nesse cenário, a forma como a manutenção é concebida deixa de ser um aspecto secundário e passa a ocupar posição estratégica, exigindo

abordagens capazes de lidar com a complexidade e a criticidade dos sistemas envolvidos.

Durante muito tempo, as práticas predominantes estiveram ancoradas em modelos corretivos e preventivos, nos quais a intervenção ocorria após a falha ou em intervalos previamente definidos. Embora esses modelos tenham contribuído para a organização dos processos de manutenção, eles apresentam limitações evidentes em ambientes dinâmicos e de alta exigência operacional, como a mineração. A dificuldade em prever falhas, aliada ao custo elevado de paradas não planejadas, impulsionou a busca por soluções mais precisas e orientadas ao comportamento real dos equipamentos.

É nesse contexto que a manutenção preditiva ganha relevância, especialmente quando associada ao avanço das tecnologias digitais. A possibilidade de monitorar continuamente variáveis operacionais por meio de sensores e de integrar esses dados em sistemas conectados amplia significativamente a capacidade de antecipar falhas e otimizar intervenções. A Internet das Coisas, nesse sentido, emerge como um elemento central, ao permitir a comunicação entre dispositivos, sistemas e plataformas analíticas, criando um fluxo contínuo de informações sobre o estado dos ativos (Evans, 2011; Santos et al., s.d.).

A evolução recente da IoT evidencia que o valor dessa tecnologia não está apenas na conectividade, mas na capacidade de transformar dados em suporte à decisão. Ao integrar métodos sensoriais a arquiteturas digitais, torna-se possível correlacionar múltiplas variáveis, identificar padrões e construir diagnósticos mais consistentes, reduzindo a incerteza associada às operações. Na

mineração, essa capacidade assume importância ainda maior, considerando as condições adversas de operação e a necessidade de garantir alta disponibilidade dos equipamentos (Civerchia et al., 2017).

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo analisar de que maneira a integração entre métodos sensoriais e Internet das Coisas pode contribuir para o suporte à tomada de decisão em manutenção preditiva de equipamentos de mineração. Busca-se compreender não apenas o funcionamento dessas tecnologias, mas, sobretudo, como elas se articulam para produzir informações capazes de orientar intervenções mais eficientes e estratégicas.

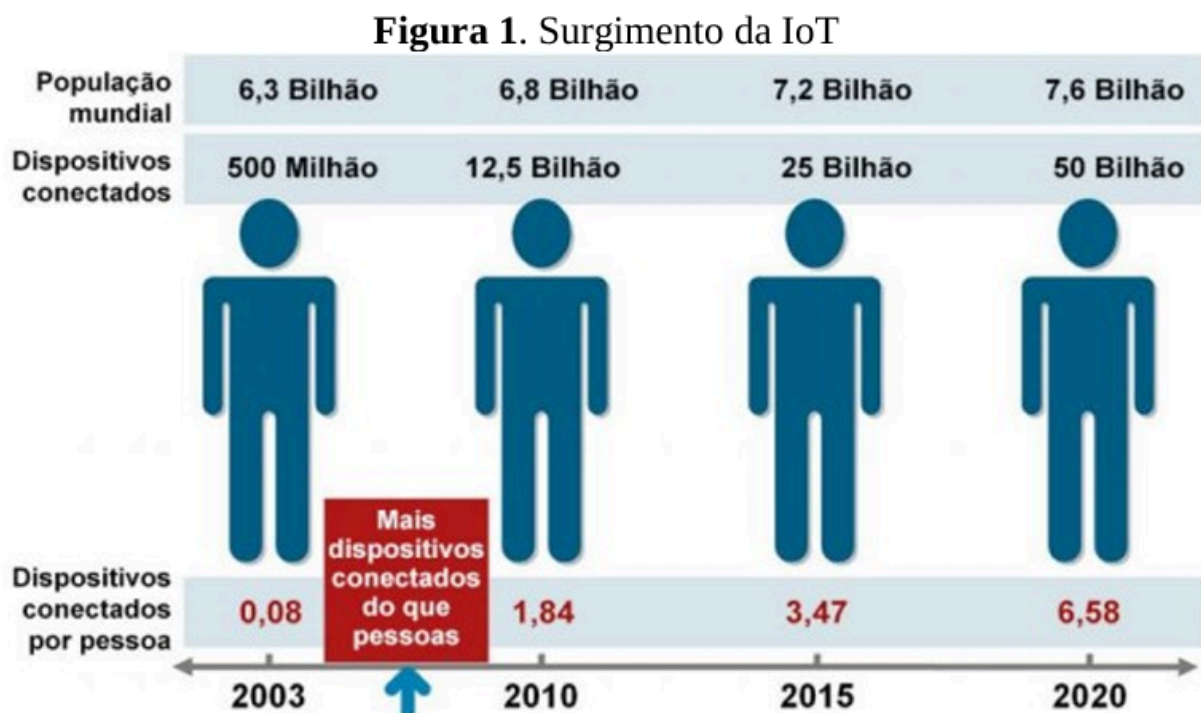
A problemática que orienta a pesquisa parte da seguinte questão: de que forma a utilização integrada de sensores e IoT pode reduzir incertezas e aprimorar a tomada de decisão em contextos de manutenção preditiva no setor mineral? Essa indagação reflete a necessidade de superar modelos tradicionais de manutenção e avançar em direção a práticas baseadas em dados, capazes de responder às exigências contemporâneas de eficiência, segurança e competitividade.

Para responder a essa questão, o estudo adota uma abordagem qualitativa de caráter bibliográfico, fundamentada na análise de produções científicas e técnicas relevantes sobre manutenção preditiva, sensores industriais e Internet das Coisas. Essa opção metodológica permite reunir diferentes perspectivas teóricas e aplicadas, contribuindo para a construção de uma compreensão integrada do fenômeno investigado (Lakatos; Marconi, 2021; Gil, 2019).

## 2. CAMINHOS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA NA MINERAÇÃO CONTEMPORÂNEA

A compreensão dos caminhos da manutenção preditiva na mineração contemporânea exige, antes de qualquer aprofundamento técnico, um olhar atento para a transformação silenciosa que redefiniu a relação entre sistemas físicos e informação ao longo das últimas décadas. A Figura 1 não é apenas ilustrativa, ela é quase uma síntese histórica de uma virada estrutural, na qual o mundo deixa de ser predominantemente humano em termos de geração de dados e passa a ser dominado por dispositivos conectados, deslocando o eixo da decisão para uma lógica orientada por fluxo contínuo de informação, o que altera a forma como ativos industriais são percebidos, monitorados e gerenciados (Evans, 2011).

**Figura 1:** Surgimento da IoT



Fonte: Cisco IBSG (2011)

Quando se observa que, em 2003, havia cerca de 0,08 dispositivos conectados por pessoa e que esse número salta para mais de seis

dispositivos por indivíduo em menos de duas décadas, não se trata apenas de crescimento tecnológico, mas de uma mudança na ontologia da operação industrial. A mineração, tradicionalmente baseada em inspeções periódicas e intervenções corretivas, passa a operar em um ambiente onde o comportamento dos equipamentos pode ser acompanhado em tempo quase real, criando uma nova camada de inteligibilidade sobre processos antes opacos (Santos et al., s.d.).

Esse deslocamento, no entanto, não ocorre de forma homogênea ou trivial. Ele exige a construção de uma infraestrutura que permita não apenas captar dados, mas garantir sua transmissão, armazenamento e processamento com confiabilidade suficiente para sustentar decisões operacionais críticas. Nesse sentido, a mineração enfrenta desafios específicos, sobretudo em ambientes remotos e subterrâneos, onde a conectividade ainda é um fator limitante, exigindo soluções adaptadas de comunicação e redes industriais robustas (Barbosa, 2016).

É nesse ponto que a Internet das Coisas deixa de ser um conceito abstrato e passa a se materializar como uma arquitetura operacional. Não se trata apenas de conectar dispositivos, mas de integrar sensores, sistemas de aquisição de dados e plataformas analíticas em uma lógica contínua de monitoramento. Essa integração redefine o papel da manutenção, que deixa de ser reativa e passa a antecipar falhas com base em padrões detectados ao longo do tempo, aproximando-se de uma lógica preditiva sustentada por dados (Civerchia et al., 2017).

Avançando nessa direção, a manutenção preditiva passa a depender da qualidade e da granularidade das informações coletadas. Isso

significa que o valor não está apenas na quantidade de dados gerados, mas na capacidade de interpretar sinais sutis que indicam degradação de componentes, mudanças de comportamento operacional ou desvios de padrão. Nesse cenário, sensores deixam de ser acessórios e passam a ser protagonistas na construção do conhecimento sobre o estado dos ativos (Sensores Industriais, 2015).

A própria noção de falha, portanto, sofre uma reconfiguração. Antes percebida apenas no momento em que se manifestava de forma evidente, ela passa a ser entendida como um processo gradual, identificável por meio de pequenas variações em parâmetros físicos como vibração, temperatura e pressão. Esse entendimento amplia o horizonte de intervenção e permite que ações corretivas sejam planejadas antes que a falha comprometa a operação (Silva et al., 2023).

Entretanto, essa capacidade de antecipação só faz sentido quando está ancorada em conceitos sólidos de engenharia de manutenção, que garantem coerência entre diagnóstico e decisão. Nesse contexto, a literatura clássica oferece fundamentos que continuam indispensáveis, especialmente quando se trata de definir critérios de desempenho e operação dos sistemas industriais.

Nesse sentido, a norma técnica estabelece parâmetros que não podem ser ignorados, sobretudo quando se busca integrar tecnologias emergentes a práticas consolidadas. A própria definição de disponibilidade e confiabilidade oferece um referencial que ancora a discussão em bases técnicas rigorosas:

*2.2.5 Disponibilidade: Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. 2.2.6 Confiabilidade: Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições específicas, durante um dado intervalo de tempo (ABNT, 1994, p. 2-3).*

A incorporação dessa definição no debate não é meramente formal. Ela permite compreender que a manutenção preditiva não se resume à detecção antecipada de falhas, mas envolve a garantia de que os sistemas operem dentro de parâmetros aceitáveis ao longo do tempo, considerando não apenas o estado atual dos equipamentos, mas também sua capacidade de manter desempenho sob condições variáveis.

Essa perspectiva aumenta o escopo da manutenção ao integrá-la a uma lógica de gestão de risco e desempenho, na qual decisões são tomadas com base em probabilidades e tendências, e não apenas em eventos consumados. Nesse contexto, a análise de dados assume papel central, pois é a partir dela que se constroem modelos capazes de prever comportamentos futuros (Zhang et al., 2017).

A mineração, ao incorporar essas práticas, passa a operar em um ambiente onde a previsibilidade se torna um ativo estratégico. A

capacidade de antecipar falhas reduz custos operacionais, aumenta a segurança e melhora a eficiência produtiva, criando uma vantagem competitiva que vai além da simples adoção tecnológica (Carr, 2018).

No entanto, essa transição não ocorre sem desafios. A integração de sistemas, a padronização de dados e a interoperabilidade entre diferentes plataformas ainda representam obstáculos significativos. Além disso, a gestão do volume crescente de dados exige soluções robustas de armazenamento e processamento, que garantam não apenas capacidade, mas também segurança e confiabilidade (Martini, 2018).

Ao mesmo tempo, a evolução da IoT evidencia que o valor não está apenas na conectividade, mas na capacidade de transformar dados em conhecimento acionável. Isso implica o desenvolvimento de algoritmos, modelos analíticos e sistemas de suporte à decisão capazes de interpretar padrões complexos e fornecer recomendações operacionais (Kranenburg et al., 2011).

Essa transformação é particularmente relevante em ambientes como a mineração, onde decisões precisam ser tomadas rapidamente e com alto grau de precisão. A possibilidade de acessar informações em tempo real sobre o estado dos equipamentos permite que gestores atuem de forma mais estratégica, evitando paradas não planejadas e otimizando o uso de recursos (Short, 2016).

Além disso, a implementação de sistemas de monitoramento contínuo redefine a relação entre operador e equipamento. O conhecimento deixa de ser baseado exclusivamente na experiência e passa a ser complementado por dados objetivos, criando um

ambiente de decisão mais informado e menos sujeito a incertezas (Espíndula, 2021).

Essa mudança, no entanto, exige também uma adaptação cultural e organizacional. A adoção de tecnologias digitais implica a necessidade de capacitação, revisão de processos e integração entre diferentes áreas, o que pode representar um desafio adicional para empresas que ainda operam em modelos tradicionais (ABECOM, 2023).

Ao mesmo tempo, a expansão da IoT aponta para um futuro em que a manutenção preditiva será cada vez mais automatizada, com sistemas capazes de não apenas identificar falhas, mas também acionar automaticamente intervenções corretivas. Esse cenário, embora ainda em desenvolvimento, já começa a se materializar em operações mais avançadas (CERP IoT, 2009).

Nesse contexto, a mineração se posiciona como um campo privilegiado para a aplicação dessas tecnologias, dada a complexidade de seus processos e a criticidade de seus ativos. A integração entre sensores, redes e sistemas analíticos cria uma base sólida para a construção de operações mais eficientes e resilientes.

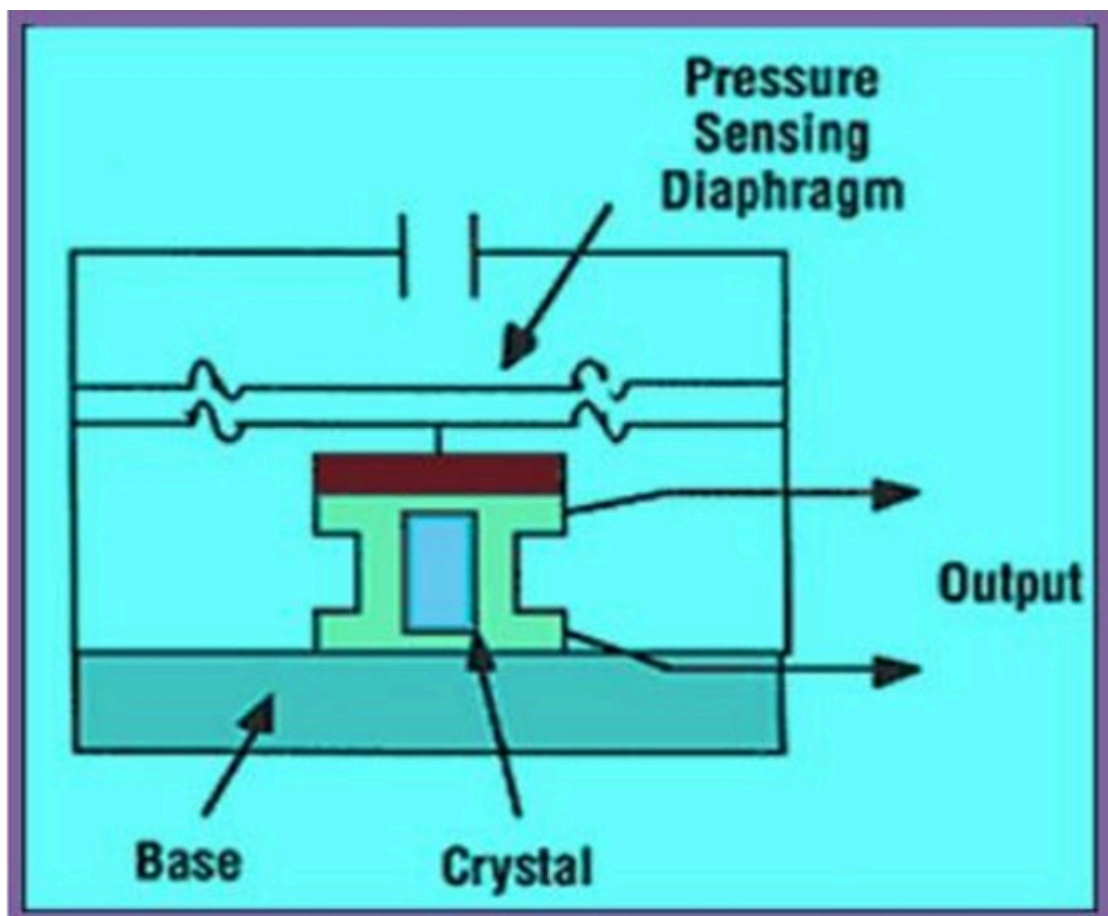
Assim, os caminhos da manutenção preditiva na mineração contemporânea não podem ser compreendidos apenas como uma evolução tecnológica, mas como uma reconfiguração profunda da forma como sistemas industriais são concebidos, monitorados e gerenciados, consolidando um novo paradigma orientado por dados, conectividade e inteligência operacional.

## **2.1. Como os Sensores Transformam a Leitura dos Equipamentos**

A entrada dos sensores na lógica da manutenção industrial não representa apenas uma evolução tecnológica, mas uma mudança na própria forma de perceber o comportamento dos equipamentos ao longo do tempo. Aquilo que antes dependia de inspeções visuais, ruídos percebidos ou intervalos programados de manutenção passa a ser continuamente traduzido em sinais mensuráveis, permitindo que o estado operacional deixe de ser interpretado e passe a ser monitorado com precisão. Essa transição desloca o foco da experiência para a leitura sistemática de dados, criando uma nova base para a tomada de decisão técnica.

Esse movimento ganha densidade quando se compreende que sensores não apenas captam informações, mas constroem uma linguagem própria dos sistemas físicos. Pressão, vibração, temperatura e fluxo deixam de ser fenômenos invisíveis e passam a ser convertidos em sinais elétricos, interpretáveis por sistemas digitais. Essa conversão não é neutra, ela define a forma como o equipamento será compreendido, já que cada sensor atua como uma espécie de filtro que seleciona quais aspectos do comportamento serão capturados e analisados (Engerey, 2026).

**Figura 2:** Sensor de pressão



No caso específico dos sensores de pressão, como ilustrado na Figura 2, o princípio de funcionamento revela com clareza essa mediação entre o mundo físico e o digital. A deformação de um diafragma sensível, provocada pela variação de pressão, é convertida em um sinal elétrico por meio de elementos como cristais piezoelétricos ou extensômetros. Esse sinal, por sua vez, não representa apenas um valor instantâneo, mas carrega consigo a dinâmica de funcionamento do sistema ao qual o sensor está acoplado, permitindo identificar padrões de operação e possíveis anomalias (Duchowski; Mannebach, 2006).

Essa capacidade de capturar variações mínimas é o que torna os sensores elementos centrais na manutenção preditiva. Pequenas alterações na pressão de um sistema hidráulico, por exemplo, podem indicar desgaste de componentes, vazamentos incipientes ou mudanças nas condições de operação. O que antes só seria

percebido após a falha passa a ser detectado em estágios iniciais, ampliando o tempo de resposta e reduzindo impactos operacionais.

Aumentando essa lógica para outros tipos de sensores, percebe-se que a leitura dos equipamentos se torna cada vez mais multidimensional. Sensores de vibração, por exemplo, permitem identificar desalinhamentos, falhas em rolamentos e desequilíbrios mecânicos com alta precisão. Já sensores de temperatura indicam sobrecargas térmicas e falhas de lubrificação, enquanto sensores de fluxo e nível ajudam a monitorar a eficiência de sistemas de transporte e processamento (Sensores Industriais, 2015).

Essa diversidade de medições não apenas enriquece o diagnóstico, mas também exige uma integração cuidadosa entre diferentes fontes de dados. A leitura isolada de um sensor pode indicar um comportamento específico, mas é na correlação entre vários parâmetros que se constrói uma compreensão mais robusta do estado do equipamento. Nesse sentido, a manutenção preditiva passa a operar como um sistema interpretativo, no qual dados são analisados em busca de padrões e desvios (Silva et al., 2023).

Na mineração, essa abordagem ganha relevância particular devido à criticidade dos ativos e às condições severas de operação. Equipamentos como correias transportadoras, britadores e sistemas hidráulicos operam sob cargas elevadas e em ambientes agressivos, o que torna a detecção precoce de falhas não apenas desejável, mas essencial para a continuidade das operações. Sensores, nesse contexto, funcionam como extensões do próprio sistema, permitindo que ele “se observe” em tempo real.

Entretanto, a simples instalação de sensores não garante ganhos automáticos. É necessário compreender onde, como e por que medir determinados parâmetros. A escolha inadequada de sensores ou a coleta de dados irrelevantes pode gerar ruído informacional e dificultar a análise. Por isso, a implementação de sistemas de sensoriamento deve ser orientada por uma lógica clara de diagnóstico, alinhada aos modos de falha mais críticos de cada equipamento.

Esse cuidado se estende também à qualidade dos dados coletados. Sensores mal calibrados, sujeitos a interferências ou instalados em posições inadequadas podem comprometer a confiabilidade das informações, levando a interpretações equivocadas. Assim, a manutenção dos próprios sensores passa a ser parte integrante do sistema, reforçando a ideia de que a infraestrutura de monitoramento precisa ser tão robusta quanto os equipamentos que ela observa.

À medida que os sistemas evoluem, os sensores deixam de operar de forma isolada e passam a integrar redes de monitoramento mais amplas. Essa integração permite que dados sejam coletados, transmitidos e analisados em tempo real, criando uma base contínua de informações sobre o comportamento dos ativos. Nesse cenário, o sensor não é mais apenas um dispositivo de medição, mas um ponto de entrada para um sistema mais complexo de análise e decisão (Civerchia et al., 2017).

Essa transformação redefine o papel do profissional de manutenção, que passa a atuar menos como executor de intervenções e mais como analista de sistemas. A interpretação dos dados coletados exige conhecimento técnico, mas também capacidade de

compreender padrões e tendências, integrando informações de diferentes fontes para construir diagnósticos precisos.

Além disso, a presença de sensores permite a construção de históricos detalhados de operação, fundamentais para o desenvolvimento de modelos preditivos. Ao longo do tempo, esses dados possibilitam identificar comportamentos recorrentes, antecipar falhas e otimizar estratégias de manutenção, reduzindo custos e aumentando a eficiência operacional (Zhang et al., 2017).

Esse acúmulo de informação, no entanto, traz consigo o desafio do armazenamento e processamento de grandes volumes de dados. A escolha de sistemas adequados para gerenciar essas informações torna-se um fator crítico, pois impacta a capacidade de análise e a velocidade de resposta das operações (Martini, 2018).

Ao mesmo tempo, a integração entre sensores e sistemas digitais abre caminho para a automação de processos de diagnóstico. Algoritmos podem ser treinados para reconhecer padrões específicos e gerar alertas automáticos, reduzindo a dependência de intervenção humana e aumentando a precisão das análises.

Essa automação, contudo, não elimina a necessidade de supervisão humana, mas a redefine. O profissional passa a atuar em níveis mais estratégicos, validando interpretações, ajustando modelos e tomando decisões com base em informações mais robustas e contextualizadas.

Na prática, isso significa que a leitura dos equipamentos deixa de ser episódica e passa a ser contínua, criando um fluxo constante de informações que alimenta o sistema de manutenção. Esse fluxo

permite não apenas reagir a falhas, mas antecipá-las, transformando a manutenção em um processo proativo.

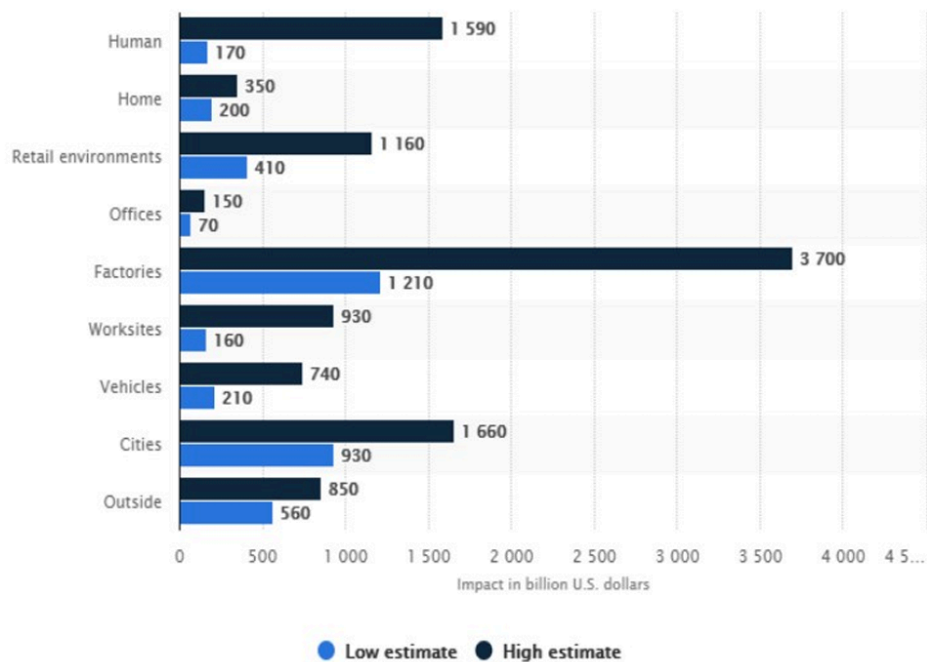
Essa mudança de paradigma é significativa na mineração, onde o custo de uma falha pode ser elevado e as condições de operação dificultam intervenções rápidas. Sensores, nesse contexto, funcionam como mecanismos de antecipação, permitindo que decisões sejam tomadas com base em evidências e não apenas em suposições.

## **2.2. IoT e o Uso Inteligente dos Dados na Tomada de Decisão**

Se no tópico anterior os sensores revelaram como os equipamentos passam a “falar”, aqui o movimento é outro, mais decisivo: entender como esses dados, uma vez coletados, deixam de ser apenas registros técnicos e passam a orientar escolhas concretas dentro da operação. A Internet das Coisas não se limita à conectividade, ela reorganiza a forma como a informação circula, é interpretada e, sobretudo, é transformada em ação. O ponto central não está no volume de dados, mas na capacidade de extrair sentido deles em tempo oportuno.

Esse deslocamento é fundamental porque, historicamente, a indústria sempre lidou com uma lacuna entre informação disponível e decisão efetiva. Dados existiam, mas estavam fragmentados, atrasados ou desconectados dos processos críticos. Com a IoT, essa lacuna começa a ser reduzida, uma vez que sensores, sistemas e plataformas passam a operar de forma integrada, criando um fluxo contínuo que conecta o chão de fábrica aos níveis estratégicos da gestão (Civerchia et al., 2017).

**Figura 3:** Impacto estimado da IoT em diversos mercados



Fonte: Statista

Ao observar a Figura 3, percebe-se que o impacto da IoT não é homogêneo, mas se distribui de maneira desigual entre setores, com destaque expressivo para ambientes industriais e produtivos. O setor de fábricas, por exemplo, apresenta os maiores valores estimados de impacto econômico, o que evidencia o potencial da integração entre dados e operação em contextos onde ativos físicos têm papel central. Ainda que a mineração não esteja explicitamente isolada no gráfico, sua proximidade com o ambiente industrial permite inferir que os ganhos projetados são igualmente significativos.

Essa leitura não deve ser superficial. O impacto econômico representado na figura não decorre apenas da adoção de tecnologias, mas da capacidade de reorganizar processos com base em dados confiáveis e continuamente atualizados. Isso significa que o valor da IoT emerge quando a informação deixa de ser reativa e passa a ser preditiva, permitindo antecipar cenários e reduzir incertezas operacionais (Zhang et al., 2017).

Na prática, isso se traduz em decisões mais bem fundamentadas. A identificação precoce de anomalias, a previsão de falhas e a otimização de intervenções deixam de depender exclusivamente da experiência acumulada e passam a ser sustentadas por evidências empíricas geradas em tempo real. Esse processo não elimina o conhecimento humano, mas o reposiciona, integrando-o a uma base informacional mais robusta.

No contexto da mineração, essa transformação ganha contornos ainda mais relevantes. Trata-se de um setor onde o custo de parada é elevado, a logística é complexa e os riscos operacionais são significativos. Nesse cenário, a capacidade de tomar decisões rápidas e precisas não é apenas uma vantagem competitiva, mas uma necessidade operacional. A IoT, ao fornecer dados contínuos e confiáveis, reduz o tempo entre a identificação de um problema e a ação corretiva.

Entretanto, essa capacidade de decisão depende diretamente da qualidade da arquitetura de dados implementada. Não basta coletar informações, é preciso organizá-las, armazená-las e processá-las de forma eficiente. A escolha de sistemas adequados de armazenamento e análise torna-se, portanto, um elemento estratégico, pois impacta diretamente a velocidade e a precisão das decisões (Martini, 2018).

Além disso, a integração entre diferentes fontes de dados exige padrões e protocolos que garantam interoperabilidade. Em ambientes complexos como a mineração, onde equipamentos de diferentes fabricantes coexistem, a ausência de padronização pode comprometer a eficácia do sistema como um todo. Nesse sentido, a

construção de uma infraestrutura digital coesa é tão importante quanto a instalação dos sensores em si (Cisco, 2014).

À medida que o número de dispositivos conectados cresce, como já indicado anteriormente na evolução da IoT, o sistema precisa ser capaz de lidar com volumes cada vez maiores de dados sem perder desempenho. Isso implica não apenas investimento em tecnologia, mas também em estratégias de gestão da informação que permitam filtrar, priorizar e interpretar dados de forma eficiente (Evans, 2011).

Ao mesmo tempo, a análise desses dados passa a incorporar técnicas mais sofisticadas, incluindo modelos estatísticos e algoritmos de aprendizado de máquina. Essas ferramentas ampliam a capacidade de identificar padrões complexos e prever comportamentos futuros, elevando o nível de precisão das decisões e reduzindo margens de erro.

Contudo, é importante reconhecer que a automatização da análise não elimina a necessidade de julgamento humano. Pelo contrário, ela exige profissionais capazes de interpretar resultados, validar hipóteses e ajustar modelos conforme as especificidades do contexto operacional. A tomada de decisão, portanto, torna-se um processo híbrido, que combina inteligência artificial e expertise técnica.

Essa combinação é particularmente valiosa em cenários onde as variáveis são múltiplas e interdependentes. Na mineração, fatores como condições ambientais, carga operacional e desgaste de componentes interagem de maneira complexa, exigindo uma análise que vá além de indicadores isolados. A IoT, ao integrar

diferentes fontes de dados, permite construir uma visão mais holística do sistema.

Além disso, a capacidade de monitoramento contínuo abre espaço para a implementação de estratégias mais avançadas, como a manutenção baseada em condição e a manutenção prescritiva. Nessas abordagens, a decisão não se limita a prever falhas, mas inclui recomendações específicas de intervenção, considerando custos, riscos e impacto operacional.

Esse nível de sofisticação, no entanto, só é alcançado quando há alinhamento entre tecnologia, processo e estratégia. A adoção isolada de soluções digitais, sem integração com a lógica operacional da empresa, tende a gerar resultados limitados. Por isso, a implementação da IoT deve ser pensada de forma sistêmica, considerando não apenas aspectos técnicos, mas também organizacionais e culturais (ABECOM, 2023).

A própria cultura organizacional, aliás, desempenha papel decisivo nesse processo. A transição para uma gestão orientada por dados exige mudança de mentalidade, abertura para novas formas de trabalho e valorização da análise como instrumento de decisão. Sem esse alinhamento, o potencial da IoT pode ser subaproveitado.

Ao mesmo tempo, a experiência prática demonstra que a adoção da IoT já começa a gerar resultados concretos. Empresas do setor mineral têm investido em redes de comunicação subterrâneas, sistemas de monitoramento remoto e plataformas de análise de dados, buscando aumentar eficiência e reduzir custos operacionais (Solomon, 2026).

Esse movimento reforça a ideia de que a IoT não é uma tendência futura, mas uma realidade em consolidação. Sua capacidade de transformar dados em decisões efetivas redefine o papel da manutenção e amplia o horizonte de atuação das organizações, criando novas possibilidades de gestão e operação (Short, 2016).

Assim, ao amarrar o percurso iniciado com os sensores e aprofundado na lógica da conectividade, percebe-se que a manutenção preditiva na mineração contemporânea se sustenta em uma tríade fundamental: coleta de dados, integração de sistemas e inteligência analítica. É dessa combinação que emerge a capacidade de decidir melhor, mais rápido e com maior precisão.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos a partir da análise teórica e aplicada evidenciam que a integração entre métodos sensoriais e Internet das Coisas redefine o papel da manutenção no contexto da mineração, deslocando-a de uma prática essencialmente reativa para uma abordagem orientada por dados e antecipação de falhas. Esse movimento não ocorre apenas pela adoção de novas tecnologias, mas pela reorganização da forma como os ativos são compreendidos ao longo do tempo, permitindo que o comportamento operacional seja monitorado continuamente, e não apenas em momentos específicos de inspeção, o que amplia a capacidade de intervenção estratégica (Evans, 2011; Santos et al., s.d.).

Ao observar os sistemas de sensoriamento aplicados, percebe-se que o principal ganho está na transformação de variáveis físicas em sinais interpretáveis, criando uma base objetiva para análise. Em equipamentos de mineração, onde condições severas de operação

são comuns, sensores de vibração, pressão e temperatura passam a atuar como elementos críticos na identificação de padrões de degradação. Essa leitura contínua permite que pequenas variações sejam detectadas antes de se tornarem falhas funcionais, reduzindo o tempo de resposta e ampliando a eficiência das intervenções (Duchowski; Mannebach, 2006; Sensores Industriais, 2015).

Os resultados também indicam que a simples coleta de dados não é suficiente para gerar valor operacional. O diferencial emerge quando esses dados são integrados por meio da IoT, formando uma rede capaz de correlacionar múltiplas variáveis e construir diagnósticos mais robustos. Nesse cenário, a informação deixa de ser isolada e passa a ser contextualizada, permitindo compreender o comportamento dos equipamentos como sistemas interdependentes, o que fortalece a tomada de decisão baseada em evidências (Civerchia et al., 2017; Kranenburg et al., 2011).

A análise evidencia ainda que a manutenção preditiva, quando estruturada sobre essa base tecnológica, promove uma ruptura com modelos tradicionais baseados em periodicidade fixa. A lógica preventiva, embora eficiente em determinados contextos, tende a gerar intervenções desnecessárias ou tardias. Já a abordagem preditiva permite alinhar o momento da intervenção com o real estado do equipamento, reduzindo custos e evitando paradas não planejadas, o que é particularmente relevante em operações mineradoras de alta criticidade (Silva et al., 2023).

No contexto específico da mineração, os resultados ganham maior relevância devido à natureza integrada dos processos produtivos. A falha de um único componente pode comprometer cadeias inteiras de operação, tornando essencial a capacidade de antecipar

problemas. A IoT, ao fornecer dados contínuos, reduz a incerteza e permite decisões mais rápidas e assertivas, o que impacta diretamente na disponibilidade dos ativos e na produtividade do sistema (Carr, 2018; Barbosa, 2016).

A utilização de modelos analíticos e algoritmos permite identificar padrões complexos e prever comportamentos futuros, elevando o nível de precisão das decisões. Esse avanço transforma a manutenção em um processo analítico, no qual a interpretação dos dados se torna tão importante quanto sua coleta (Zhang et al., 2017).

Os dados também reforçam a importância de conceitos clássicos como confiabilidade e disponibilidade, que passam a ser monitorados de forma mais objetiva a partir das informações coletadas pelos sensores. A capacidade de um equipamento desempenhar sua função ao longo do tempo deixa de ser estimada de forma genérica e passa a ser acompanhada por indicadores reais, permitindo ajustes mais precisos nas estratégias de manutenção (ABNT, 1994).

A discussão aponta ainda que a implementação de sistemas baseados em IoT exige uma infraestrutura adequada de armazenamento e processamento de dados. O aumento significativo no volume de informações geradas demanda soluções capazes de garantir não apenas capacidade, mas também velocidade e segurança na análise. Sem essa estrutura, o potencial da manutenção preditiva pode ser comprometido, limitando os ganhos esperados (Martini, 2018).

Além disso, a integração entre diferentes dispositivos e plataformas destaca a necessidade de padronização e interoperabilidade. Em

ambientes complexos como a mineração, onde equipamentos de múltiplos fabricantes coexistem, a ausência de padrões pode dificultar a comunicação entre sistemas e reduzir a eficácia das análises. Nesse sentido, a arquitetura de rede assume papel estratégico na consolidação da IoT como ferramenta de decisão (Cisco Networking Academy, 2014).

Os resultados também indicam que a adoção da IoT contribui para a redução de custos operacionais, especialmente ao evitar falhas críticas e otimizar o uso de recursos. A capacidade de prever intervenções reduz desperdícios, melhora o planejamento e aumenta a vida útil dos equipamentos, criando um ciclo de eficiência que impacta diretamente na competitividade das empresas do setor (ABECOM, 2023).

No entanto, a análise evidencia que a tecnologia, por si só, não garante resultados. A eficácia da manutenção preditiva depende de fatores organizacionais, como capacitação das equipes, definição de processos e integração entre áreas. Sem esse alinhamento, há risco de subutilização dos sistemas implementados, o que limita os benefícios esperados (Espíndula, 2021).

A discussão também mostra que a IoT amplia a capacidade de monitoramento remoto, permitindo que operações sejam acompanhadas em tempo real, mesmo em ambientes de difícil acesso. Isso é particularmente relevante na mineração, onde a logística pode dificultar intervenções rápidas. A conectividade permite antecipar problemas e planejar ações com maior eficiência (Solomon, 2026).

Além disso, a análise evidencia que o uso inteligente dos dados contribui para a melhoria da segurança operacional. A identificação precoce de falhas reduz riscos de acidentes, protegendo trabalhadores e equipamentos. Esse aspecto reforça a importância da manutenção preditiva não apenas como estratégia econômica, mas também como ferramenta de gestão de risco.

Os resultados indicam ainda que a evolução da IoT tende a ampliar ainda mais o potencial da manutenção preditiva, especialmente com o avanço de tecnologias como inteligência artificial e aprendizado de máquina. Essas ferramentas permitem análises mais complexas e decisões mais precisas, consolidando a tendência de uma manutenção cada vez mais automatizada e inteligente (Short, 2016).

Dessa forma, a discussão demonstra que a integração entre sensores e IoT cria uma nova lógica operacional, na qual dados são continuamente transformados em informação e, posteriormente, em decisão. Esse fluxo contínuo redefine a forma como os ativos são gerenciados, permitindo uma abordagem mais proativa e eficiente.

#### **4. CONCLUSÃO**

A análise desenvolvida permite afirmar que a integração entre métodos sensoriais e Internet das Coisas não representa apenas um avanço tecnológico incremental, mas uma reconfiguração profunda da lógica de manutenção na mineração. Ao transformar sinais físicos em dados contínuos e estes em informação interpretável, cria-se uma base sólida para decisões mais precisas, oportunas e sustentadas por evidências. Esse movimento desloca a manutenção do campo da reação para o da antecipação, reduzindo incertezas

operacionais e ampliando a capacidade de intervenção estratégica sobre ativos críticos, especialmente em ambientes marcados por alta complexidade e severidade de operação.

Dessa forma, a manutenção preditiva apoiada em IoT consolida-se como um vetor de eficiência, segurança e competitividade no setor mineral, ao articular coleta de dados, integração sistêmica e inteligência analítica em um fluxo contínuo de decisão. O desafio que se impõe, contudo, não reside apenas na adoção das tecnologias, mas na capacidade de incorporá-las de maneira coerente aos processos organizacionais, garantindo que o dado captado seja efetivamente convertido em ação. É nessa capacidade de transformar informação em decisão qualificada que se estabelece o verdadeiro diferencial das operações contemporâneas orientadas por dados.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**ABECOM.** IoT na manutenção industrial. Abecom, 09 jun. 2023. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/iot-na-manutencao-industrial/>. Acesso em: 20 abr. 2026.

ABNT. Associação Brasileira SSO CIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: 1994. Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

BARBOSA, Viviane da Silva Borges. Análise de cobertura e capacidade da comunicação móvel para automação em minas inteligentes a céu aberto. 2016.

CARR, Joe. Empresas de mineração consideram IoT essencial para garantir vantagem competitiva, diz pesquisa. Bit Magazine, 2018.

Disponível em: <http://www.bitmag.com.br/2018/01/empresas-de-mineracao-consideram-iot-essencial-para-garantir-vantagem-competitiva-diz-pesquisa/>. Acesso em: 21 abr. 2026.

CISCO NETWORKING ACADEMY. Connecting Networks Companion Guide. Pearson Education, 2014. Disponível em: <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=2202410&seqNum=4>. Acesso em: 18 abr. 2026.

CERP IoT – Internet of Things European Research Cluster. Internet of Things: Strategic Research Roadmap. 2009. Disponível em: [http://www.internet-of-thingsresearch.eu/pdf/IoT\\_Cluster\\_Strategic\\_Research\\_Agenda\\_2011.pdf](http://www.internet-of-thingsresearch.eu/pdf/IoT_Cluster_Strategic_Research_Agenda_2011.pdf). Acesso em: 02 abr. 2026.

CIVERCHIA, F. et al. Industrial Internet of Things monitoring solution for advanced predictive maintenance applications. Journal of Industrial Information Integration, 7, pp. 4–12. 2017.

DUCHOWSKI, J. K.; MANNEBACH, H. A novel approach to predictive maintenance: a portable, multi-component MEMS sensor for on-line monitoring of fluid condition in hydraulic and lubricating systems. Tribology Transactions, 49(4), pp. 545–553. 2006.

ENEREY. Tipos e aplicações de sensores na indústria. Disponível em: <http://www.enerrey.com.br/blog/tipos-e-aplicacoes-de-sensores-na-industria>. Acesso em: 15 abr. 2026.

ESPINDULA, L.G. Manutenção preditiva e a indústria 4.0 um estudo de caso da implementação de um sistema de monitoramento on-line de ativos. Trabalho de conclusão Curso (Graduação em Engenharia mecânica) – Faculdade Evangélica de Goianésia,

GoianésiaGO, 2021. Disponível em: <http://repositorio.aee.edu.br/jspui/handle/aee/18342>. Acesso em: 20 abr. 2026.

EVANS, Dave. A Internet das Coisas: como a próxima evolução da Internet está mudando tudo. Cisco Internet Business Solutions Group, 2011. Disponível em: [https://www.cisco.com/c/dam/global/pt\\_br/asets/executives/pdf/internet\\_of\\_things\\_iiot\\_ibsg\\_0411final.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/global/pt_br/asets/executives/pdf/internet_of_things_iiot_ibsg_0411final.pdf). Acesso em: 20 abr. 2026.

GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

KRANENBURG, Rob van et al. The Internet of Things. 1st Berlin Symposium on the Internet and Society, 2011. Disponível em: <https://www.theinternetofthings.eu/sites/default/files/Rob%20van%20Kranenburg/Internet%20of%20Things%20Institute%20for%20Internet%20&%20Society%20Discussion%20Paper.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2026.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. Fundamentos de metodologia científica. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

MARTINI, Ramiro Guerra. Como escolher o servidor de armazenamento de dados para a sua empresa. Disponível em: <http://www.administradores.com.br/artigos/tecnologia/como-escolher-o-servidor-de-armazenamento-de-dados-para-a-sua-empresa/98561/>. Acesso em: 21 abr. 2026.

SANTOS, Bruno P. et al. Internet das Coisas: da teoria à prática. Belo Horizonte: Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, [s.d.]. Disponível em:

<http://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2026.

SENSORES INDUSTRIAIS. Material de Engenharia de Controle e Automação, Politécnica PUCRS, 2015. Disponível em: [http://www.politecnica.pucrs.br/professores/tergolina/Automacao\\_e\\_Control/APRESENTACAO\\_-\\_Aula\\_03\\_Sensores\\_Industriais.pdf](http://www.politecnica.pucrs.br/professores/tergolina/Automacao_e_Control/APRESENTACAO_-_Aula_03_Sensores_Industriais.pdf).

Acesso em: 18 abr. 2026.

SILVA, D. O. et al. Manutenção preditiva. Análise de vibrações na Indústria 4.0. Revista Foco, 16(11), e3628. <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n11-104>. 2023.

SINGER, Talita. Tudo conectado: conceitos e representações da internet das coisas. Simpósio em Tecnologias Digitais e Sociabilidade, v. 2, p. 1-15, 2012.

SHORT, Taylor. 5 Lessons from Advanced Mining IoT. Software Advice, 2016. Disponível em: <https://www.softwareadvice.com/resources/5-lessons-advanced-mining-iot/>. Acesso em: 23 abr. 2018.

SOLOMON, Howard. How a Canadian mining company put a Wi-Fi network underground. Disponível em: <https://www.itworldcanada.com/article/how-a-canadian-mining-company-put-a-wi-fi-network-underground/87122>. Acesso em: 21 abr. 2026.

ZHANG, Y. et al. (2017). A big data analytics architecture for cleaner manufacturing and maintenance processes of complex products. Journal of Cleaner Production, 142, pp. 626–641.

