

INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS  
CAMPUS BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

**NATHALYA XAVIER DE CARVALHO**

**O USO DOS SISTEMAS PIMS E MES NO MONITORAMENTO DAS VAZÕES DE  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS COMO ESTRATÉGIA DE  
SUSTENTABILIDADE HÍDRICA**

**Betim**  
**Julho de 2025**

**NATHALYA XAVIER DE CARVALHO**

**O USO DOS SISTEMAS PIMS E MES NO MONITORAMENTO DAS VAZÕES DE  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS COMO ESTRATÉGIA DE  
SUSTENTABILIDADE HÍDRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador(a): Arthur Hermano Rezende Rosa  
Coorientador(a): Âmara Fuccio de Fraga e Silva

**Betim**

**Julho de 2025**

## FICHA CATALOGRÁFICA

C331u Carvalho, Nathalya Xavier de

O uso dos sistemas PIMS e MES no monitoramento das vazões de águas subterrâneas e superficiais como estratégia de sustentabilidade hídrica / Nathalya Xavier de Carvalho. – 2025.

51 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Arthur Hermano Rezende Rosa

Coorientação: Profa. Ma. Âmara Fuccio de Fraga e Silva

1. Sustentabilidade hídrica. 2. Monitoramento de vazões. 3. Sistema de Gerenciamento de Informação de Processos. 4. Engenharia de Controle e Automação. I. Carvalho, Nathalya Xavier de. II. Título.

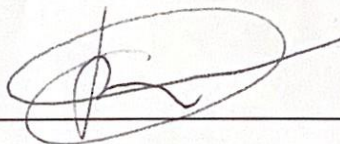
CDU: 681.5

NATHALYA XAVIER DE CARVALHO

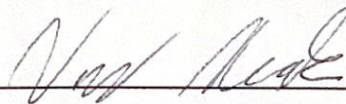
O USO DOS SISTEMAS PIMS E MES NO MONITORAMENTO DAS VAZÕES DE  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS COMO ESTRATÉGIA DE  
SUSTENTABILIDADE HÍDRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

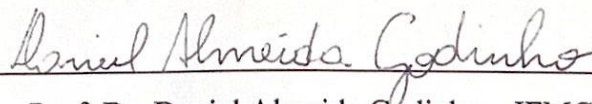
Aprovado em: 04/08/2025 pela banca examinadora:



Prof. Dr. Arthur Hermanno Rezende Rosa (Orientador) – IFMG Campus Betim



Prof. Me. Virgil Del Duca Almeida – IFMG Campus Betim



Prof. Dr. Daniel Almeida Godinho – IFMG Campus Betim

Dedico esta conquista a minha família, sobretudo a minha mãe Conceição, meu padrasto Itamar, meu irmão Ítalo e meu pai Wender.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus que me deu forças para alcançar esse objetivo.

Agradeço aos meus pais que sempre me auxiliaram durante minha vida estudantil e me possibilitaram trilhar o caminho necessário para concluir essa etapa.

Agradeço aos meus amigos de classe que sempre me apoiaram e caminharam ao meu lado.

Agradeço aos colegas de trabalho que sempre se dispuseram a me ajudar para a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador pelo apoio e orientação na realização desta monografia.

*“A gratidão é a memória do coração. Ao olhar para trás e reconhecer o que foi conquistado, alimentamos a esperança e a determinação para o futuro.”*

**Jean-Baptiste Massillon**

## RESUMO

CARVALHO, Nathalya Xavier de. O uso dos sistemas PIMS e MES no monitoramento das vazões de águas subterrâneas e superficiais como estratégia de sustentabilidade hídrica, 2024. (Graduação em Engenharia de Controle e Automação). Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Betim.

Este estudo analisa o uso dos sistemas PIMS (*Plant Information Management System*) e MES (*Manufacturing Execution System*) no monitoramento das vazões de águas subterrâneas e superficiais como estratégia para a sustentabilidade hídrica no setor industrial. A pesquisa baseia-se em um estudo de caso da mineradora Samarco, utilizando informações públicas divulgadas pela própria empresa, como relatórios de sustentabilidade e documentos institucionais. O objetivo é compreender como a integração dessas tecnologias contribui para uma gestão de água mais eficiente, segura e ambientalmente responsável.

Após o rompimento da barragem de Fundão em 2015, a Samarco intensificou o uso de sistemas automatizados para garantir maior controle sobre suas operações, especialmente no que diz respeito à coleta, recirculação e descarte das águas subterrâneas e superficiais. O sistema PIMS é responsável pela coleta e análise em tempo real dos dados dos processos, enquanto o MES integra essas informações à execução operacional, permitindo ações corretivas imediatas. A análise dos dados da empresa revelou melhorias no desempenho hídrico, como aumento nas taxas de recirculação, redução da captação de novas águas e melhor rastreabilidade das medições de vazão. Conclui-se que o uso combinado de PIMS e MES é uma ferramenta eficaz para fortalecer a sustentabilidade hídrica e garantir a conformidade ambiental no contexto minerador.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade hídrica, monitoramento, PIMS, MES, vazões, águas subterrâneas, águas superficiais, Samarco.

## ABSTRACT

CARVALHO, Nathalya Xavier de. The use of PIMS and MES systems in monitoring groundwater and surface water flow rates as a water sustainability strategy, 2024. (Bachelor's in Control and Automation Engineering). Federal Institute of Minas Gerais – Betim Campus.

This study analyzes the use of PIMS (Plant Information Management System) and MES (Manufacturing Execution System) in monitoring the flow rates of groundwater and surface water as a strategy for water sustainability in the industrial sector. The research is based on a case study of the mining company Samarco, using public information disclosed by the company itself, such as sustainability reports and institutional documents. The objective is to understand how the integration of these technologies contributes to more efficient, safe, and environmentally responsible water management.

After the Fundão dam collapse in 2015, Samarco intensified the use of automated systems to ensure greater control over its operations, especially regarding the collection, recirculation, and discharge of groundwater and surface water. The PIMS system is responsible for the real-time collection and analysis of process data, while the MES integrates this information into operational execution, enabling immediate corrective actions. The analysis of the company's data revealed improvements in water performance, such as increased recirculation rates, reduced intake of new water, and improved traceability of flow measurements. It is concluded that the combined use of PIMS and MES is an effective tool to strengthen water sustainability and ensure environmental compliance in the mining context.

**Keywords:** Water sustainability, monitoring, PIMS, MES, flow rates, groundwater, surface water, Samarco.

## **ABREVIATURAS, SIGLAS E CONVENÇÕES**

PIMS	Sistema de Gestão de Informações da Planta
MES	Sistema de Execução da Manufatura
ERP	Planejamento de Recursos Empresariais
SAP	Sistemas, Aplicações e Produtos para Processamento de Dados
CMMS	Sistema Computadorizado de Gerenciamento de Manutenção
AMR	Pesquisa Avançada em Manufatura
OLE	Vinculação e Incorporação de Objetos
OPC	OLE para Controle de Processos

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rastro de lama deixado pelo rompimento das barragens em Mariana.....	18
Figura 2 – Pirâmide da automação industrial .....	21
Figura 3 – Arquitetura do sistema PIMS .....	22
Figura 4 – Comparativo após aplicação da compressão de dados.....	23
Figura 5 – Estrutura ISA-95 .....	25
Figura 6 – Caracterização e Objeto do Estudo .....	30
Figura 7 – Delimitação Temporal.....	31
Figura 8 – Coleta de Dados .....	31
Figura 9 – Etapas da Análise de Dados .....	32
Figura 10 – Verificação dos Resultados .....	33
Figura 11 – Integração entre o Sistema de Gestão de Informações da Planta (PIMS) e o Sistema de Execução da Manufatura (MES) na Gestão Hídrica.....	36
Figura 12 – Sistema de Monitoramento Hídrico da Samarco: Comparativo entre Ubu e Germano .....	38
Figura 13 – Volume total de água captada por fonte (ML).....	39
Figura 14 – Volume total de água captada em todas as áreas, por fonte (ML).....	39
Figura 15 – Volume Total de Água Captada por Complexo (2019-2021).....	40
Figura 16 – Volume Total de Água Superficial Captada em Ubu (2019-2021).....	41
Figura 17 – Volume Total de Água Captada em Todas as Áreas (2020-2022).....	41
Figura 18 – Proporção da Captação de Água por Fonte – Complexo de Ubu (2019-2021) ....	42
Figura 19 – Proporção da Captação de Água por Fonte – Complexo de Germano (2019-2021) .....	43

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Detalhamento das Etapas Metodológicas do Estudo .....	33
Tabela 2 – Contribuição da Instrumentação de Campo e Sistemas Telemétricos no Monitoramento Hídrico da Samarco .....	44

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Justificativa .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>15</b>
1.2.1 Objetivo geral .....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
<b>1.3 Estrutura do trabalho .....</b>	<b>16</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Rompimento da barragem da Samarco.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Impactos ambientais.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3 Sustentabilidade hídrica e monitoramento das vazões de águas superficiais e subterrâneas.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 Monitoramento hídrico e práticas sustentáveis na Samarco.....</b>	<b>20</b>
<b>2.5 Camadas da automação industrial.....</b>	<b>21</b>
<b>2.6 PIMS .....</b>	<b>22</b>
2.6.1 Fluxo de dados.....	22
2.6.2 Compressão de dados .....	23
2.6.3 Plataformas .....	24
<b>2.7 MES .....</b>	<b>24</b>
2.7.1 Interface.....	26
2.7.2 Dados mestres.....	26
2.7.3 Ambientes.....	27
2.7.4 Integração com o SAP .....	27
<b>2.8 Integração PIMS com MES .....</b>	<b>28</b>
<b>2.9 O papel dos sistemas PIMS e MES na conformidade regulatória e mitigação de riscos ambientais .....</b>	<b>28</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Caracterização do estudo.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 Delimitação do estudo .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3 Coleta de dados .....</b>	<b>31</b>
<b>3.4 Análise de dados .....</b>	<b>31</b>
<b>3.5 Verificação dos resultados .....</b>	<b>32</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>35</b>

<b>4.1 Contribuição dos sistemas PIMS e MES na eficiência hídrica e gestão sustentável da Samarco .....</b>	<b>35</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A análise de dados na mineração é um fator fundamental para um melhor desempenho das operações. A importância dessa etapa pode ser evidenciada no momento de tomada de decisões, sendo possível obter uma otimização de processos, gestão de riscos e redução dos impactos ambientais.

Até o início dos anos 90, a análise de dados industriais era caracterizada por processos manuais, armazenamento rudimentar e falta de integração. Tal limitação tornava o procedimento mais demorado, propenso a erros e menos eficiente. Um exemplo disso são as “ilhas de automação”, sendo sistemas ou processos de automação isolados ou independentes que operam de forma autônoma, ou seja, não existia um compartilhamento de informações.

Logo, surgiu a necessidade da implantação de sistemas integrados, podendo esses serem definidos como a unificação da base de dados, possibilitando um trabalho conjunto e automatizado, abrangendo diferentes áreas de uma empresa. Essa interação permite que as informações estejam atualizadas e disponíveis em todos os sistemas.

Atualmente, algumas das tecnologias disponíveis para o gerenciamento de informações são o PIMS (*Plant Information Management System*) e o MES (*Manufacturing Execution System*). Os dois sistemas surgiram em períodos diferentes e possuem finalidades específicas na automação industrial e gestão da produção.

Os sistemas PIMS são projetados para gerenciar e armazenar informações relacionadas às operações da planta. Eles fornecem uma plataforma centralizada para coletar, armazenar e analisar dados de várias fontes dentro da planta, incluindo sistemas de controle de processo, sensores e outros dispositivos de aquisição de dados. Dessa forma, os engenheiros podem acompanhar o que está ocorrendo no processo em tempo real.

Segundo Cattaruzzi e Chicaroli (2004), o sistema MES (*Manufacturing Execution System*) é um software industrial que atua no controle e monitoramento da produção, integrando-se a sistemas como o ERP para fornecer informações sobre os processos fabris. Ele gerencia e otimiza as operações de manufatura, desde o planejamento e programação da produção até o monitoramento e controle em tempo real, visando melhorar a eficiência, produtividade e qualidade dos processos industriais. Dessa maneira, há uma interligação entre o chão de fábrica e o sistema de gestão empresarial.

Os benefícios esperados da adoção dessas tecnologias, alinhadas com os conceitos da Indústria 4.0, incluem decisões estratégicas e operacionais mais eficazes, baseadas em dados em tempo real ou históricos (HAMMER *et al.*, 2017). A integração dos sistemas PIMS e MES

para o monitoramento de recursos hídricos em empresas do setor mineral exemplifica uma aplicação estratégica dessas tecnologias. Por meio dessa integração, dados confiáveis são compartilhados em tempo real, contribuindo para decisões sustentáveis e fundamentadas.

Este trabalho utiliza dados públicos de um estudo de caso industrial para analisar como a combinação dos sistemas PIMS e MES pode aprimorar o monitoramento e a gestão sustentável das vazões de águas superficiais e subterrâneas, contribuindo para estratégias efetivas de sustentabilidade hídrica.

## **1.1 Justificativa**

A gestão eficiente da água é essencial para a sustentabilidade industrial. Nesse contexto, os sistemas PIMS (*Plant Information Management System*) e MES (*Manufacturing Execution System*) se destacam como ferramentas estratégicas ao permitirem o monitoramento em tempo real e a análise de dados operacionais, como as vazões de águas superficiais e subterrâneas. No momento de deliberações importantes ao longo dos processos industriais, é necessário ter acesso a informações precisas e confiáveis, sendo imprescindível a escolha adequada das tecnologias que fornecem esses dados.

Compreender como esses sistemas contribuem para a tomada de decisões sustentáveis justifica a relevância deste estudo, que se apoia na realidade da Samarco a partir de informações disponibilizadas publicamente pela própria empresa, como relatórios de sustentabilidade, documentos técnicos e canais institucionais.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo analisar de que forma os sistemas PIMS e MES podem contribuir para o aprimoramento da gestão sustentável dos recursos hídricos na indústria, com foco no monitoramento e controle das vazões de águas superficiais e subterrâneas. A análise é realizada com base em dados e informações públicas disponibilizadas pela Samarco, utilizados como estudo de caso para ilustrar a aplicação dessas tecnologias no contexto industrial.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Compreender os conceitos relacionados aos sistemas PIMS e MES;
- Analisar a contribuição dos sistemas PIMS e MES na coleta e no monitoramento de dados referentes às vazões de águas superficiais e subterrâneas em ambientes industriais;
- Avaliar, a partir de dados públicos disponibilizados pela Samarco, práticas de gestão hídrica aplicadas na empresa, verificando como a integração dos sistemas PIMS e MES pode contribuir para estratégias de sustentabilidade hídrica.

### 1.3 Estrutura do trabalho

A monografia está organizada da seguinte forma: O primeiro capítulo apresenta a motivação para a realização deste trabalho, abordando os objetivos e estrutura. O segundo capítulo corresponde à fundamentação teórica, oferecendo uma contextualização sobre o rompimento da barragem de Fundão, os impactos ambientais, os conceitos de sustentabilidade hídrica e os fundamentos dos sistemas PIMS e MES, além da importância da integração entre eles. O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada, incluindo a caracterização e delimitação do estudo, as etapas de coleta e análise dos dados, e os critérios de verificação dos resultados. O quarto capítulo apresenta e discute os resultados obtidos, com foco na contribuição dos sistemas PIMS e MES para o monitoramento das vazões de águas superficiais e subterrâneas, com base em dados públicos divulgados pela Samarco. Por fim, no quinto capítulo são explicitadas as considerações finais sobre o trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Rompimento da barragem da Samarco

No dia 5 de novembro de 2015 houve o rompimento de uma barragem, conhecida como barragem fundão, de propriedade da mineradora Samarco, localizada em Mariana, município de Minas Gerais, despejando cerca de 55 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro, conforme estimativas do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA.<sup>1</sup>

A Figura 1 ilustra o rastro de lama deixado por essa tragédia, sendo considerada uma das maiores ocorridas no Brasil, que destruiu comunidades, poluiu cursos de água e tirou a vida de diversas pessoas. Desde então, a empresa, além de se comprometer a prestar auxílio às comunidades atingidas, por meio de programas de reparação, também se comprometeu a adotar práticas mais rigorosas de sustentabilidade e proteção ao meio ambiente. A Samarco está implementando tecnologias e processos mais seguros e sustentáveis, melhorando a gestão de resíduos e investindo na recuperação ambiental das áreas afetadas. A empresa também está focada na reabilitação dos ecossistemas impactados, realizando projetos de reflorestamento e monitoramento contínuo da qualidade da água e do solo.<sup>2</sup>

Para isso, a empresa realiza a geração anual de relatórios de sustentabilidade, utilizando sistemas avançados como o MES e o PIMS. Esses relatórios são baseados em dados detalhados e precisos coletados e analisados por esses sistemas, permitindo uma avaliação transparente e abrangente das práticas ambientais e de sustentabilidade da Samarco.

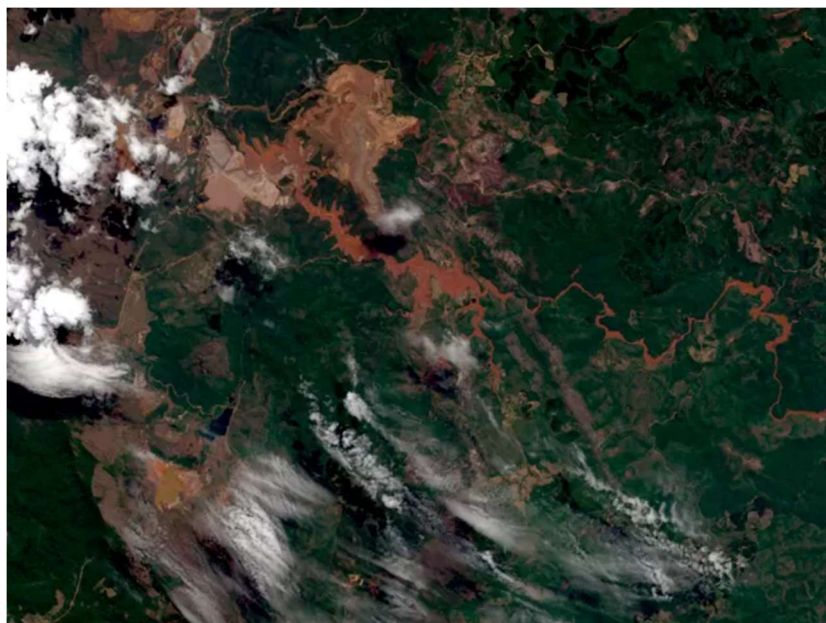
A utilização dos sistemas PIMS e MES é explicitamente mencionada nos próprios relatórios, os quais detalham o processo de coleta, armazenamento e análise dos dados. Os documentos completos e as informações referentes a esses relatórios podem ser consultados nos sites oficiais da empresa e em plataformas de divulgação pública, garantindo o monitoramento contínuo e a documentação rigorosa das ações ambientais, promovendo a responsabilidade corporativa em relação ao meio ambiente e às comunidades impactadas.

---

<sup>1</sup> CONSELHO NACIONAL DOS DIREITOS HUMANOS (CNDH). Relatório sobre o rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Samarco e seus efeitos sobre o Vale do Rio Doce. Brasília: CNDH, 2017. Disponível em: [https://www.gov.br/mdh/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/old/cndh/relatorios/RelatriodaBarragemdoRioDoce\\_FINAL\\_APROVADO.pdf](https://www.gov.br/mdh/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/old/cndh/relatorios/RelatriodaBarragemdoRioDoce_FINAL_APROVADO.pdf). Acesso em: 24 maio 2025.

<sup>2</sup> SAMARCO. Relatório Bienal 2015-2016. Disponível em: <https://www.samarco.com/relatorios/>. Acesso em: 24 maio 2025.

Figura 1 – Rastro de lama deixado pelo rompimento das barragens em Mariana



Fonte: G1 (2015)

## 2.2 Impactos ambientais

Devido a magnitude do acidente, o rompimento da barragem fundão ocasionou sérios danos ao meio ambiente. A lama de rejeitos atingiu diversos rios, como o Rio do Carmo e o Rio Doce, além de afetar o litoral de Espírito Santo. O desastre também ocasionou a destruição da vegetação próxima a região e a desestruturação química do solo, afetando o desenvolvimento das espécies locais.

O rompimento da barragem causou uma extensa devastação ambiental e social. De acordo com dados fornecidos pelo Governo Federal, o desastre afetou 663 km de rios e córregos, 1.469 hectares de vegetação, 207 das 251 edificações do distrito de Bento Rodrigues, em Minas Gerais, e deixou cerca de 600 famílias desabrigadas.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Onda de rejeitos da Samarco atingiu 663 km de rios e devastou 1.469 hectares de terras. Brasília, 2015. Disponível em: [https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/copy\\_of\\_noticias/noticias-2015/onda-de-rejeitos-da-samarco-atingiu-663-km-de-rios-e-devastou-1-469-hectares-de-terras](https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/copy_of_noticias/noticias-2015/onda-de-rejeitos-da-samarco-atingiu-663-km-de-rios-e-devastou-1-469-hectares-de-terras). Acesso em: 24 maio 2025.

### 2.3 Sustentabilidade hídrica e monitoramento das vazões de águas superficiais e subterrâneas

Segundo Silva *et al.* (2020), a sustentabilidade hídrica está relacionada ao uso eficiente dos recursos hídricos, garantindo sua disponibilidade para as gerações futuras. Nesse contexto, o monitoramento das vazões de águas superficiais e subterrâneas é fundamental para promover a gestão eficiente desses recursos.

As águas superficiais correspondem aos corpos de água expostos na superfície terrestre, como rios, lagos, reservatórios e córregos. Elas desempenham um papel vital no abastecimento humano, na irrigação agrícola, em diversos setores da indústria e na manutenção da biodiversidade dos ecossistemas. A qualidade e a quantidade dessas águas são diretamente influenciadas por fatores como condições climáticas, o uso e ocupação do solo, e as atividades humanas. Diante disso, o acompanhamento constante das vazões e das características da água é fundamental para prevenir desequilíbrios ambientais e garantir a sustentabilidade desses recursos.<sup>4</sup>

Por outro lado, as águas subterrâneas estão armazenadas em aquíferos, que são formações geológicas permeáveis capazes de acumular e transmitir água da infiltração do solo. Elas representam uma reserva estratégica de grande importância, especialmente em períodos de estiagem ou em regiões onde a disponibilidade de água superficial é limitada. No entanto, a exploração inadequada desses aquíferos pode acarretar problemas como o rebaixamento do nível do lençol freático e a contaminação do recurso, comprometendo severamente a sustentabilidade hídrica a longo prazo.<sup>5</sup>

O monitoramento das vazões de águas superficiais e subterrâneas permite o controle da quantidade disponível, a detecção de variações sazonais e o planejamento de ações para a conservação e recuperação dos recursos hídricos. Em ambientes industriais, como o da mineração, essa prática é ainda mais crítica para minimizar impactos ambientais, garantir conformidade legal e promover a sustentabilidade das operações.

---

<sup>4</sup> TCL RESERVATÓRIOS. Águas Superficiais: Importância e Gestão Eficiente. Disponível em: <https://tclreservatorios.com.br/glossario/aguas-superficiais-importancia-e-gestao-eficiente/>. Acesso em: 25 maio 2025.

<sup>5</sup> ETHOS ENGENHARIA. Água Subterrânea: Como Proteger esse Recurso Estratégico?. Disponível em: <https://ethosengenharia.com.br/agua-subterranea-protecao/>. Acesso em: 25 maio 2025.

## 2.4 Monitoramento hídrico e práticas sustentáveis na Samarco

De acordo com o Estado de Minas (2016), o rompimento da barragem ocorreu devido a falhas no sistema de drenagem, incluindo a construção sobre uma base instável, além da ocorrência de três abalos sísmicos na região que aceleraram o colapso.<sup>6</sup>

Após o acidente, a Samarco, além de se comprometer a prestar auxílio às comunidades afetadas, também se comprometeu a adotar práticas mais rigorosas de sustentabilidade. Uma importante frente de atuação na área ambiental diz respeito ao monitoramento permanente da qualidade da água.

Atualmente, de acordo com informações fornecidas pela Samarco, há mais de 118 pontos de monitoramento ao longo de toda a extensão do rio Doce, um trabalho que já gerou mais de 500 mil análises e 25 mil laudos.<sup>7</sup> Para viabilizar esse amplo monitoramento, a mineradora emprega sistemas automatizados, como o PIMS e o MES, que possibilitam a coleta, armazenamento e análise em tempo real das vazões de águas superficiais e subterrâneas. A integração dessas tecnologias garante dados precisos e contínuos, fundamentais para a gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos na região.

O consumo de água inerente aos processos da Empresa motiva uma série de ações voltadas à redução de consumo, aumento de reutilização e busca de alternativas operacionais para atuar com o mínimo impacto ambiental possível. No pilar de água, existe o Plano de Gestão de Recursos Hídricos, que abrange os monitoramentos da qualidade das Águas Superficiais, Águas Subterrâneas e Efluentes Líquidos.<sup>8</sup>

Uma premissa histórica da Samarco é trabalhar sempre priorizando o reuso do recurso, o que é possível em seu modelo produtivo com minerodutos e por meio do Sistema de Filtragem de Rejeito Arenoso, que viabiliza a recirculação de até 80% da água.<sup>6</sup>

Algumas das razões que justificam a importância desse monitoramento são: recuperação ambiental, restaurando os rios e áreas contaminadas, segurança e prevenção de novos desastres, cumprimento nas normas ambientais e o impacto na tomada de decisões estratégicas, especialmente na implementação de iniciativas relacionadas à sustentabilidade.

---

<sup>6</sup> ESTADO DE MINAS. Samarco admite falha na barragem que causou tragédia em Mariana. Disponível em: [https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/08/30/interna\\_gerais,798841/samarco-admite-falha-na-barragem-que-causou-tragedia-em-mariana.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/08/30/interna_gerais,798841/samarco-admite-falha-na-barragem-que-causou-tragedia-em-mariana.shtml). Acesso em: 24 mai. 2025

<sup>7</sup> SAMARCO. Ações de recuperação apresentam resultados. Disponível em: <https://www.samarco.com/acoes-de-recuperacao-apresentam-resultados/>. Acesso em: 24 mai. 2025.

<sup>8</sup> SAMARCO. Relatório de Sustentabilidade 2021. Disponível em: <https://www.samarco.com/relatorios/>. Acesso em: 24 maio 2025.

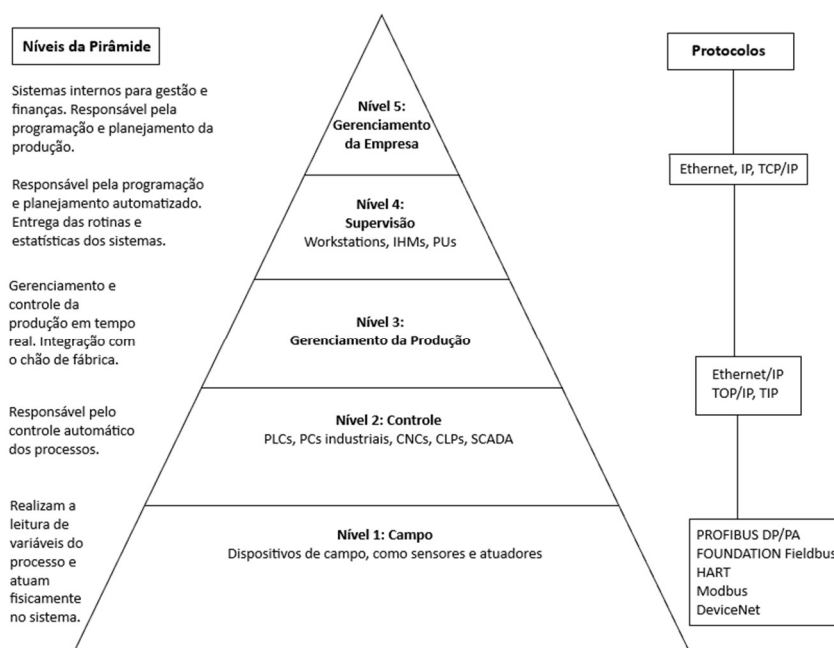
## 2.5 Camadas da automação industrial

Na Automação Industrial existe uma estrutura hierárquica de controle e supervisão. Tal estrutura é dividida em níveis hierárquicos, sendo que essa organização permite um melhor monitoramento e controle dos processos durante a operação.

Conforme indicado na figura 2, o nível mais baixo da hierarquia é o de controle de campo, o qual envolve dispositivos como atuadores e sensores para o monitoramento de variáveis como temperatura e pressão. Acima dele estão os sistemas de supervisão e controle, responsáveis por gerenciar múltiplos processos produtivos, e o nível gerencial, que inclui sistemas de gestão da produção, planejamento de recursos empresariais (ERP), gerenciamento de manutenção (CMMS), entre outros.

O PIMS e o MES ocupam posições estratégicas nessa hierarquia, mas com alcances distintos. O PIMS atua de forma transversal entre os níveis 2 e 3, sendo responsável pela coleta, armazenamento e disponibilização de dados consolidados, permitindo análises históricas e em tempo real a partir de informações obtidas dos sistemas de controle e instrumentação de campo. Já o MES está localizado no nível 3, coordenando a execução das ordens de produção, monitorando o status dos processos, rastreando o fluxo de materiais e fornecendo visibilidade sobre o desempenho produtivo.

Figura 2 – Pirâmide da automação industrial



Fonte: Adaptado de Castrucci (2010)

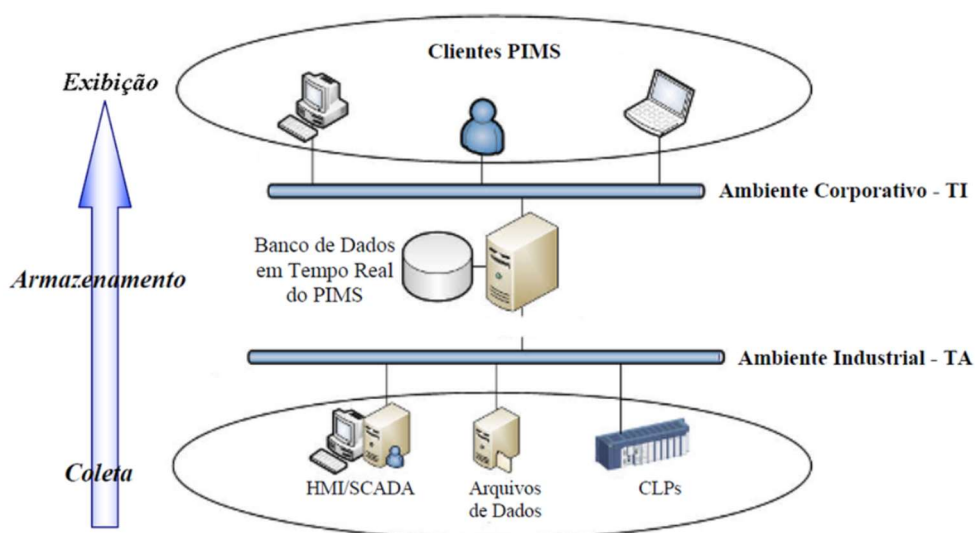
## 2.6 PIMS

PIMS são sistemas de aquisição dados que, basicamente, recuperam os dados do processo residentes em fontes distintas, os armazenam num banco de dados único e os disponibilizam através de diversas ferramentas (SEIXAS FILHO, 2005). Pode ser definido também como um sistema de gerenciamento de informações em plantas industriais. Ele coleta, armazena e analisa dados de processos em tempo real. Algumas das suas funções são: acompanhar o desempenho dos equipamentos, fornecer informações para análise de dados, manter registros para análises futuras e se conectar com outros sistemas.

### 2.6.1 Fluxo de dados

A coleta no sistema PIMS é realizada por meio de dispositivos de campo presentes em determinados pontos da planta, os quais realizam a medição das variáveis, como temperatura, nível, pressão, entre outras. Após a aferição, os dados seguem o seguinte fluxo:

Figura 3 – Arquitetura do sistema PIMS



Fonte: Urbano (2009)

- CLP's: Os controladores lógicos programáveis são responsáveis por coletar os dados dos dispositivos de campo e iniciar o processamento dessas informações.
- Redes de Comunicação: As redes de comunicação realizam a transmissão dos dados entre os componentes do PIMS, utilizando uma padronização para que a comunicação

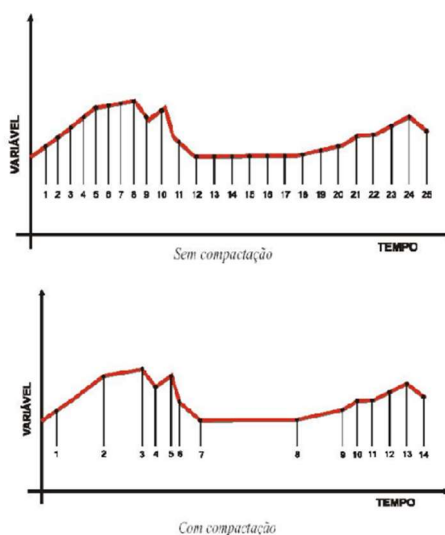
seja eficiente, como por meio de endereço OPC (*OLE for Process Control*), sendo um ponto de dados específico que pode ser acessado e monitorado dentro do sistema.

- Servidores: Os servidores de dados armazenam os dados coletados. Eles utilizam bancos de dados históricos para arquivar grandes volumes de dados ao longo do tempo, permitindo a análise e o rastreamento de tendências.
- Camada de aplicação: Na camada de aplicação é realizada a análise dos dados e gerados os relatórios, sendo possível identificar padrões, falhas e otimizar os processos.
- Interface com o usuário: A interface com o usuário permite que os operadores possam ter acesso às informações da planta em tempo real, sendo possível interagir com o sistema.

### 2.6.2 Compressão de dados

Devido ao grande volume de dados que é coletado periodicamente durante o processo industrial, o PIMS utiliza uma técnica essencial denominada como compressão de dados. A partir dessa técnica é possível tornar a transmissão dos dados mais eficiente e assertiva, utilizando um menor espaço. Para isso, é analisado o tipo de variável que está sendo medida e sua variação dentro de um intervalo de tempo, sendo possível definir seu valor de compressão.

Figura 4 – Comparativo após aplicação da compressão de dados



Fonte: Souza (2005)

Durante o monitoramento podem existir lacunas nos dados, como, por exemplo, devido a interrupções na comunicação. Com o PIMS, também é possível realizar o processo de

interpolação, que consiste em estimar valores intermediários em uma série temporal, com base em informações conhecidas. Durante esse processo, valores redundantes podem ser descartados, contribuindo para compressão de dados.

### 2.6.3 Plataformas

Atualmente, ferramentas como o OSIsoft PI System e o Aspen InfoPlus são amplamente utilizadas no contexto dos sistemas PIMS, auxiliando na otimização dos processos industriais (SEIXAS FILHO, [s.d.]).

O PI System é uma plataforma, inicialmente, desenvolvida e disponibilizada pela OSIsoft, a qual agora faz parte da AVEVA. Esse sistema permite a coleta, armazenamento e análise em tempo real de dados operacionais, auxiliando na melhoria da eficiência e suporte à tomada de decisões estratégicas baseadas em informações precisas e atualizadas.<sup>9</sup>

Assim como a plataforma supracitada, o IP.21, da AspenTech, também é uma ferramenta robusta para o gerenciamento de dados industriais. Essa solução atende a diversos setores, como petróleo e gás, mineração e manufatura, destacando-se pela escalabilidade e capacidade de integração com múltiplas fontes de dados.<sup>10</sup> Ambas as ferramentas são muito utilizadas na indústria para melhorar a eficiência operacional, otimizar processos e suportar decisões estratégicas com base em dados reais.

## 2.7 MES

O termo MES, *Manufacturing Execution Systems*, foi utilizado pela primeira vez pela AMR (*Advanced Manufacturing Research*), no início da década de 1990. Anos após foi possível integrá-lo com o ERP (*Enterprise Resource Planning*) através da norma ISA-95.<sup>11</sup> O sistema MES é utilizado na automação industrial para gerenciar e controlar a produção no chão de fábrica, ou seja, é feita a conexão entre o planejamento e o controle da produção. Por meio dele é possível planejar e controlar as ordens de produção, monitorar o fluxo de materiais e

---

<sup>9</sup> AVEVA. PI System. Disponível em: <https://www.aveva.com/en/solutions/data-management/pi-system/>. Acesso em: 25 maio 2025.

<sup>10</sup> ASPENTECH. IP.21 Data Historian. Disponível em: <https://www.aspentech.com/en/products/data-historian/ip21>. Acesso em: 25 maio 2025.

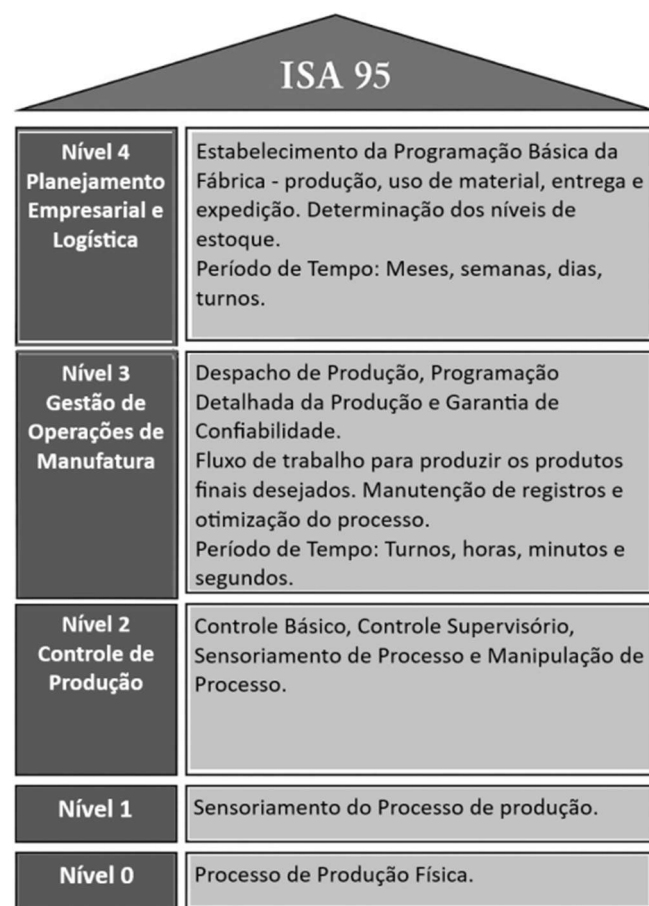
<sup>11</sup> PPI MULTITASK. O papel do MES na gestão do Supply Chain: entrevista com o especialista Marcelo Pinto. Disponível em: <https://www.ppi-multitask.com.br/ppi/blog/o-papel-do-mes-na-gestao-do-supply-chain-entrevista-com-o-especialista-marcelo-pinto/>. Acesso em: 25 maio 2025.

produtos, obter informações em tempo real e gerar relatórios para análise de desempenho. Por meio do planejamento de produção, é possível ter uma visão completa e em tempo real de toda a sua cadeia de produção, desde a previsão de demanda até a alocação de recursos.

O ISA-95<sup>12</sup>, o qual representa um padrão internacional para a integração de sistemas de controle de processos e sistemas de gestão empresarial, define a interface entre o controle e as funções empresariais para criar níveis de tecnologia e processos de negócios, sendo o modelo simplificado dessa hierarquia:

- Nível 4 – ERP: planejamento e logística empresarial
- Nível 3 – MES: gestão de execução da produção
- Nível 2 – Sistemas de controle de processos: controle de lotes
- Nível 1 – Sistemas de controle de processos: controle contínuo
- Nível 0 – Sistemas de controle de processos: controle discreto

Figura 5 – Estrutura ISA-95



Fonte: Adaptado de APS3 (2024)

<sup>12</sup> APS3. O que é ISA-95 e em que camada está o APS? Disponível em: <https://aps3.com.br/o-que-e-isa-95-e-em-que-camada-esta-o-aps/>. Acesso em: 25 maio 2025.

### 2.7.1 Interface

O sistema MES possui uma interface simples e intuitiva, que facilita a visualização das informações pelos operadores e supervisores em tempo real. Um dos principais módulos é o de produção, responsável por permitir o acompanhamento das ordens de produção em andamento, registrar a produção realizada e apontar paradas de máquinas e seus motivos, promovendo maior controle e agilidade na gestão do processo produtivo.<sup>13</sup>

Além do gerenciamento da produção, o MES frequentemente integra outros módulos essenciais que ampliam o controle operacional. Entre eles, destacam-se os módulos de gerenciamento de qualidade, que monitoram as especificações do produto e processos de inspeção; gestão de manutenção, que otimiza a disponibilidade de equipamentos através de acompanhamento de paradas e planejamento de ações preventivas e corretivas; e rastreabilidade, que permite o acompanhamento detalhado de materiais e produtos ao longo de toda a cadeia produtiva, garantindo conformidade e auxiliando em auditorias. Essa estrutura modular garante uma visão completa e em tempo real do chão de fábrica, otimizando a eficiência e a tomada de decisões.<sup>14</sup>

### 2.7.2 Dados mestres

No contexto industrial, os dados mestres representam informações essenciais e estruturadas sobre produtos, etapas do processo, equipamentos e áreas de produção.<sup>15</sup> Esses dados são compartilhados entre diversos sistemas, como ERP, MES e PIMS, e servem como base para o planejamento, rastreamento e controle das operações.

A padronização e governança desses dados são fundamentais para assegurar a consistência entre setores. Isso viabiliza um planejamento mais eficiente, o rastreamento confiável das atividades produtivas e análises operacionais mais precisas, contribuindo diretamente para a tomada de decisões estratégicas com base em informações confiáveis.

---

<sup>13</sup> DIRECTA AUTOMAÇÃO. Sistema MES: Módulo Produção. Disponível em: <https://directaautomacao.com.br/sistema-mes/producao/>. Acesso em: 25 maio 2025.

<sup>14</sup> TOTVS. Sistema MES: o que é, para que serve e quais seus benefícios. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/sistema-mes/>. Acesso em: 25 maio 2025.

<sup>15</sup> SAP. O que é gestão de dados mestres (MDM)? Disponível em: <https://www.sap.com/brazil/products/data-cloud/master-data-governance/what-is-mdm.html>. Acesso em: 25 maio 2025.

### 2.7.3 Ambientes

No sistema MES existem os ambientes de Homologação e Produção. O primeiro é utilizado para testes e o segundo é onde é realizada a operação final.

O ambiente de homologação é uma réplica controlada e separada do ambiente de produção, projetado para que desenvolvedores e testadores realizem testes e validações rigorosas do software. Seu objetivo principal é garantir que o sistema esteja pronto e estável antes de ser implantado para uso real. O ambiente de produção, por sua vez, é o local onde o software é executado em seu ambiente real, disponibilizando o produto para uso pelos usuários finais e para as operações diárias da empresa. Essa distinção é fundamental para garantir a qualidade e a confiabilidade do sistema.<sup>16</sup>

### 2.7.4 Integração com o SAP

O MES (*Manufacturing Execution System*) permite o envio de dados essenciais para o SAP, um software empresarial integrado fundamental para a gestão de negócios. Informações cruciais, como a quantidade produzida de um produto ou insumo, são transmitidas a partir das ordens de produção, proporcionando uma visão integrada e em tempo real das operações de manufatura com a gestão corporativa.

A integração entre MES e SAP é essencial, pois enquanto o sistema ERP, como o SAP, define o que deve ser produzido, o MES otimiza como essa produção será realizada no chão de fábrica. Juntos, esses sistemas coordenam a cadeia de suprimentos e as operações, garantindo um fluxo contínuo e preciso de informações que suportam decisões mais assertivas. Essa convergência proporciona uma visão integrada e abrangente do processo produtivo, que dificilmente, seria alcançada caso funcionassem isoladamente, permitindo o uso de dados em tempo real para a tomada de decisões estratégicas e operacionais mais eficazes.<sup>17</sup>

---

<sup>16</sup> HIVECLOUD. Ambiente de produção x homologação: qual a diferença? Disponível em: <https://www.hivecloud.com.br/post/ambiente-de-producao-x-homologacao-qual-a-diferenca/>. Acesso em: 25 maio 2025.

<sup>17</sup> SAP. O que é um Manufacturing Execution System (MES)?. Disponível em: <https://www.sap.com/brazil/products/scm/execution-mes/what-is-mes.html>. Acesso em: 25 maio 2025.

## 2.8 Integração PIMS com MES

A ausência de integração entre sistemas em um processo industrial pode gerar ineficiências significativas e aumentar a probabilidade de falhas. Por outro lado, a colaboração entre sistemas como o PIMS e o MES não só otimiza o processo produtivo, mas também capacita a tomada de decisões mais precisas e confere um diferencial competitivo crucial para a indústria.

Com essa integração, um relacionamento dinâmico entre MES-PIMS e PIMS-MES é estabelecido, permitindo o fluxo bidirecional de dados. Essas informações, que podem incluir dados de processo em tempo real do PIMS e dados de execução de manufatura do MES, são cruciais para compor cálculos complexos, possibilitando análises aprofundadas e a geração de relatórios detalhados. Tal colaboração oferece uma visão completa do desempenho operacional, desde o controle do processo até a gestão da produção.

Como exemplo de aplicação, sensores de campo podem detectar, via PIMS, que a vazão de água captada ultrapassou o limite estabelecido. O PIMS registra o evento em tempo real e envia a informação ao MES, que aciona automaticamente uma rotina de controle, ajustando a abertura de válvulas motorizadas, reduzindo a taxa de bombeamento e emitindo notificação ao operador. Simultaneamente, o MES atualiza a programação de produção para priorizar processos com menor consumo hídrico, registrando todas as intervenções para fins de rastreabilidade. Esse fluxo contínuo garante resposta rápida, minimiza desperdícios e mantém a operação em conformidade com os parâmetros técnicos e legais.

## 2.9 O papel dos sistemas PIMS e MES na conformidade regulatória e mitigação de riscos ambientais

Em ambientes industriais, sobretudo no setor de mineração, a conformidade com normas ambientais e a mitigação de riscos ambientais constituem pilares fundamentais para assegurar a sustentabilidade das operações e preservar a licença social para o exercício das atividades. Nesse contexto, a adoção e integração do *Plant Information Management System* (PIMS) e do *Manufacturing Execution System* (MES) revelam-se ferramentas estratégicas indispensáveis para o monitoramento e controle ambiental, fortalecendo a gestão de riscos e promovendo a adoção de práticas empresariais sustentáveis e responsáveis.

O PIMS exerce um papel fundamental na conformidade regulatória ao viabilizar a coleta contínua e em tempo real de grandes volumes de dados operacionais, incluindo parâmetros

críticos como qualidade e quantidade da água, temperatura, pH, entre outros indicadores ambientais relevantes. A capacidade desses sistemas de armazenar informações com precisão temporal possibilita a geração de relatórios precisos e auditáveis para órgãos reguladores, garantindo o atendimento a requisitos legais e normativos. Além disso, a análise histórica desses dados permite a identificação de padrões, tendências e desvios, configurando um mecanismo eficaz para a detecção precoce de não conformidades e potenciais impactos ambientais adversos.<sup>18</sup>

De forma complementar, o MES atua diretamente na execução operacional, garantindo que os processos produtivos respeitem os limites ambientais definidos nas licenças vigentes. Por meio de funcionalidades como alarmes em tempo real e controle automatizado dos processos, o MES alerta imediatamente os operadores sobre quaisquer desvios críticos que possam comprometer a conformidade ambiental, possibilitando intervenções rápidas e eficazes. Além disso, o registro detalhado das ações corretivas realizadas, armazenado pelo MES, é essencial para assegurar a rastreabilidade e transparência necessárias em auditorias e inspeções regulatórias, evidenciando a diligência da empresa no cumprimento das normas ambientais.<sup>19</sup>

A integração entre os sistemas PIMS e MES oferece uma visão integrada e abrangente do desempenho ambiental, combinando dados operacionais de processo com informações de execução para um monitoramento mais eficaz das condições ambientais. Essa cooperação potencializa a geração automatizada e precisa de relatórios regulatórios, além de fortalecer a capacidade preventiva da empresa na mitigação de riscos ambientais. Por meio da aplicação de análises avançadas aos dados integrados, é possível antecipar falhas em equipamentos críticos e otimizar o uso de recursos, minimizando impactos ambientais e promovendo uma gestão hídrica e operacional mais eficiente e sustentável.<sup>20</sup>

---

<sup>18</sup> A VOZ DA INDÚSTRIA (FIEMG). Sistema PIMS: A Revolução no Gerenciamento Industrial. Disponível em: <https://avozdaindustria.com.br/artigos/pims/>. Acesso em: 31 maio 2025.

<sup>19</sup> TOTVS. Sistema MES: O que é, para que serve e principais benefícios. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/sistema-mes/>. Acesso em: 31 maio 2025.

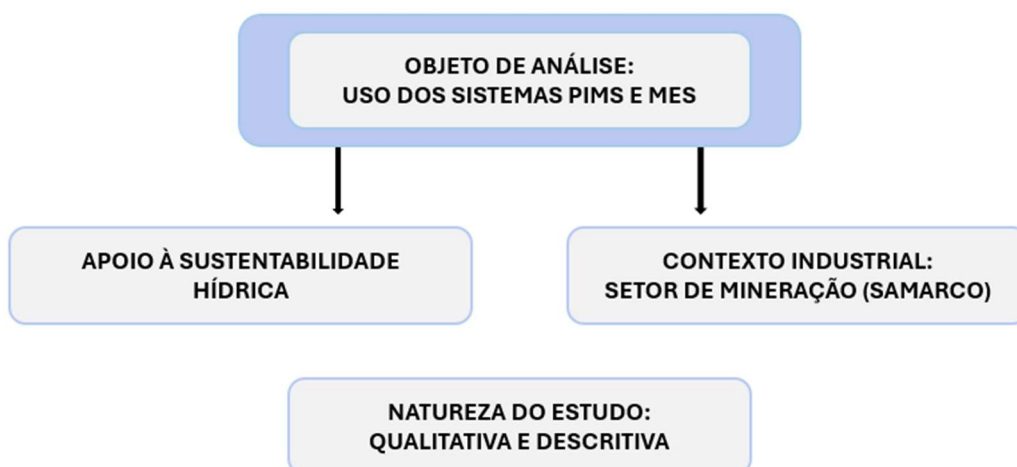
<sup>20</sup> GESTAOPRO. Como um Sistema para Metalúrgicas e Indústrias Ajuda a Evitar Paradas não Programadas. Disponível em: <https://gestaopro.com.br/blog/tecnologia/como-um-sistema-para-metalurgicas-e-industrias-ajuda-a-evitar-paradas-nao-programadas>. Acesso em: 31 maio 2025.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Caracterização do estudo

O presente trabalho configura-se como um estudo de caso, com abordagem qualitativa e descritiva. O objeto de análise é o uso dos sistemas PIMS (*Plant Information Management System*) e MES (*Manufacturing Execution System*) como ferramentas de apoio à sustentabilidade hídrica no contexto industrial. A pesquisa fundamenta-se em referenciais teóricos, materiais técnicos e normativos, como a norma ISA-95, que estabelece diretrizes para a integração entre sistemas de controle e sistemas de gestão. A Samarco foi adotada como objeto de aplicação prática da investigação, tendo em vista a relevância da gestão eficiente dos recursos hídricos no cenário pós-rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em 2015.

Figura 6 – Caracterização e Objeto do Estudo



Fonte: Autor

#### 3.2 Delimitação do estudo

A delimitação temporal da pesquisa abrange o período de 2015 a 2023, período marcado por intensas ações de recuperação ambiental e reestruturação operacional por parte da empresa. O estudo concentra-se especificamente na análise de dados relacionados às vazões de águas subterrâneas e superficiais, englobando indicadores de captação, recirculação e descarte. A atuação dos sistemas PIMS e MES será avaliada nesse contexto, buscando compreender sua contribuição para o monitoramento e a sustentabilidade hídrica.

Figura 7 – Delimitação Temporal

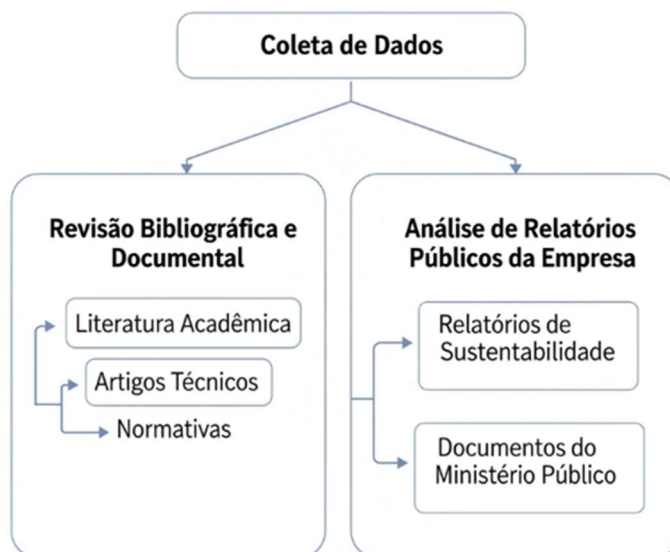


Fonte: Autor

### 3.3 Coleta de dados

A coleta de dados ocorreu por meio de duas abordagens complementares. A primeira consistiu em uma revisão bibliográfica e documental, envolvendo literatura acadêmica, artigos técnicos e publicações normativas sobre os sistemas PIMS e MES, além de estudos voltados à sustentabilidade hídrica na indústria. A segunda abordagem envolveu a análise de relatórios públicos de sustentabilidade da Samarco e documentos disponibilizados por órgãos como o Ministério Público.

Figura 8 – Coleta de Dados



Fonte: Autor

### 3.4 Análise de dados

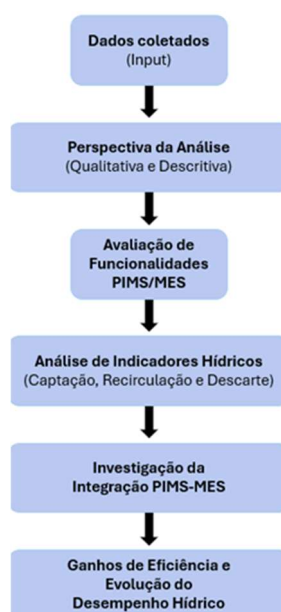
A análise dos dados foi conduzida com o objetivo de compreender de que maneira os sistemas PIMS e MES contribuem para o monitoramento das vazões de águas subterrâneas e superficiais, promovendo práticas de sustentabilidade hídrica na indústria. Os dados obtidos

foram examinados a partir de uma perspectiva qualitativa e descritiva, considerando tanto as capacidades técnicas dos sistemas quanto sua aplicação prática no contexto da Samarco.

Foram avaliadas as funcionalidades dos sistemas no que tange à aquisição, armazenamento, visualização e análise de dados em tempo real, com ênfase na capacidade do PIMS de consolidar grandes volumes de informações operacionais de sensores e medidores, e na atuação do MES no controle e na execução de processos que influenciam diretamente o uso da água. A análise considerou indicadores de captação, recirculação e descarte, relacionando-os ao papel dos sistemas no suporte à tomada de decisões operacionais e ambientais mais assertivas.

Além disso, foi investigado como o uso integrado dessas tecnologias permite maior rastreabilidade das vazões, detecção de desvios e resposta rápida a eventuais não conformidades, reforçando o compromisso com a governança hídrica. O cruzamento entre dados técnicos dos sistemas e os registros documentais disponíveis permitiu identificar ganhos de eficiência e evoluções no desempenho hídrico ao longo do período analisado.

Figura 9 – Etapas da Análise de Dados



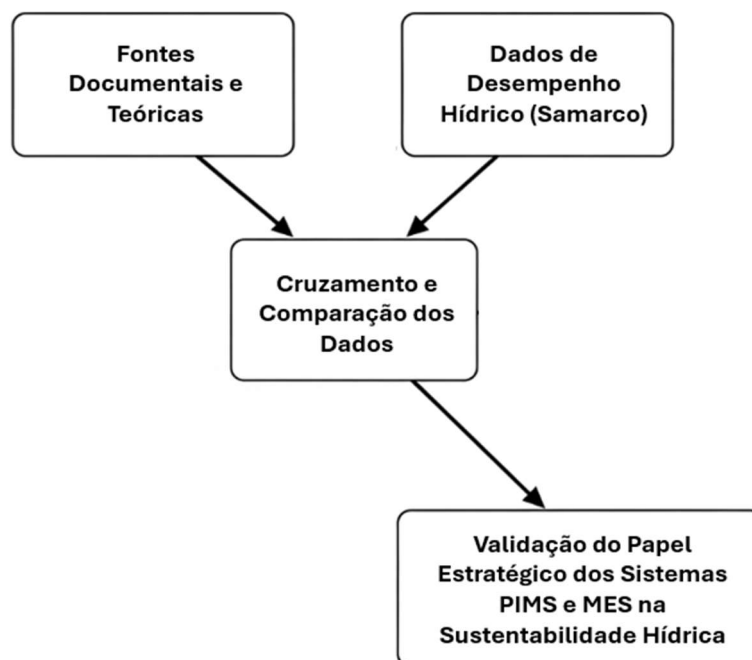
Fonte: Autor

### 3.5 Verificação dos resultados

Por fim, foi realizada a verificação dos resultados por meio do cruzamento dos dados obtidos nas fontes documentais e teóricas. A comparação permitiu validar o papel estratégico

dos sistemas PIMS e MES na sustentabilidade hídrica, reforçando a importância da integração entre sistemas de automação e gestão para a tomada de decisões ambientais mais assertivas.

Figura 10 – Verificação dos Resultados



Fonte: Autor

Tabela 1 – Detalhamento das Etapas Metodológicas do Estudo

<b>Etapa Metodológica</b>	<b>Objetivo Principal da Etapa</b>	<b>Abordagem e Ações Realizadas</b>	<b>Base Teórica/Documental</b>
3.1 Caracterização do Estudo	Definir a natureza da pesquisa e o objeto de análise.	Estudo de caso, com abordagem qualitativa e descritiva. Análise do uso do PIMS e do MES como apoio à sustentabilidade hídrica.	Referenciais teóricos, materiais técnicos e normativos (ex: norma ISA-95).
3.2 Delimitação do Estudo	Estabelecer o escopo temporal e o foco específico da análise do objeto de estudo.	Período de 2015 a 2023, com foco em dados de vazões de águas subterrâneas e superficiais (captação, recirculação, descarte).	Contexto da Samarco pós-2015.
3.3 Coleta de Dados	Reunir informações e dados relevantes para	Revisão bibliográfica e documental (literatura acadêmica, artigos	Relatórios da Samarco e outras fontes documentais.

	responder aos objetivos da pesquisa.	técnicos sobre PIMS/MES, sustentabilidade hídrica). Análise de relatórios públicos de sustentabilidade da Samarco e documentos do Ministério Público.	
3.4 Análise de Dados	Interpretar os dados coletados para compreender a contribuição dos sistemas no monitoramento hídrico.	Análise qualitativa e descritiva. Avaliação de funcionalidades PIMS/MES (aquisição, armazenamento, visualização, análise em tempo real). Análise de indicadores de captação, recirculação e descarte.	Dados dos sistemas PIMS/MES e registros documentais.
3.5 Verificação dos Resultados	Validar a coerência e a robustez das conclusões obtidas.	Cruzamento dos dados e insights provenientes das fontes documentais e teóricas.	Integração de sistemas de automação e gestão para tomada de decisões.

Fonte: Autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

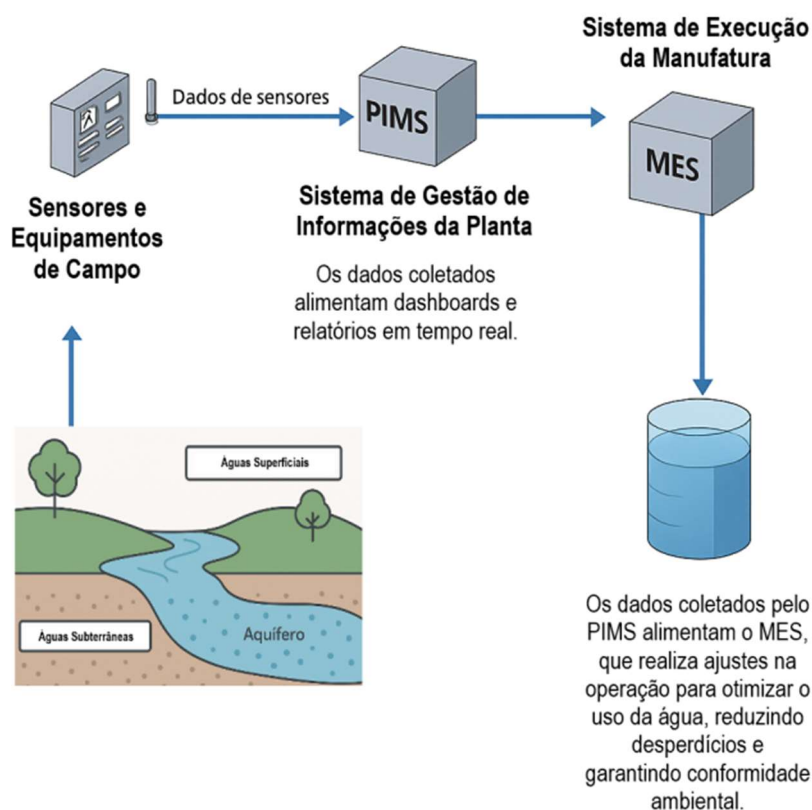
### 4.1 Contribuição dos sistemas PIMS e MES na eficiência hídrica e gestão sustentável da Samarco

A gestão eficiente dos recursos hídricos é um dos principais desafios para a sustentabilidade industrial, sobretudo em setores intensivos em consumo de água, como a mineração. Nesse contexto, o *Plant Information Management System* (PIMS) e o *Manufacturing Execution System* (MES) destacam-se como soluções estratégicas, capazes de aprimorar a eficiência hídrica e embasar decisões operacionais mais ágeis, precisas e sustentáveis no ambiente industrial.

Na indústria da mineração, a eficiência no uso da água tornou-se uma prioridade diante da crescente pressão por práticas operacionais sustentáveis e da necessidade de reduzir impactos ambientais. Nesse cenário, os sistemas PIMS e MES oferecem recursos avançados para o controle inteligente do consumo hídrico, otimizando desde o monitoramento das vazões até a execução operacional. O PIMS permite uma visualização detalhada do comportamento hídrico da planta por meio da coleta contínua de dados sobre captação, recirculação e consumo, viabilizando diagnósticos mais precisos e ações orientadas por dados históricos confiáveis. Já o MES potencializa a resposta operacional ao integrar essas informações ao dia a dia da produção, possibilitando ajustes automáticos de parâmetros, emissão de alertas e atuação imediata em caso de desvios.

A Figura 11 apresenta uma visão ilustrativa do fluxo de informações e ações operacionais resultantes da integração entre esses sistemas na Samarco, demonstrando o impacto direto na eficiência hídrica e no controle dos recursos utilizados nas operações de mineração.

Figura 11 – Integração entre o Sistema de Gestão de Informações da Planta (PIMS) e o Sistema de Execução da Manufatura (MES) na Gestão Hídrica



Fonte: Autor

Na representação, observa-se que o PIMS atua como o principal repositório e processador de dados coletados por sensores instalados em pontos críticos do processo, como os sistemas de captação, reservatórios e estações de tratamento de água. Essas informações, relacionadas às vazões, parâmetros de qualidade e desempenho dos equipamentos, são consolidadas em tempo real e disponibilizadas tanto para dashboards de monitoramento quanto para o sistema MES.

O MES, por sua vez, utiliza esses dados para promover o controle operacional direto, otimizando o uso da água nas atividades produtivas. Isso inclui, por exemplo, o ajuste automático de sistemas de recirculação, a redução da captação de novas fontes e a execução de ações corretivas imediatas sempre que anomalias ou desvios são identificados. Essa integração em tempo real garante uma atuação preventiva e proativa, fundamental para assegurar a eficiência hídrica, reduzir desperdícios e promover o equilíbrio sustentável da balança hídrica da empresa.

Além disso, destaca-se o fluxo bidirecional de informações entre PIMS e MES, permitindo que as decisões operacionais sejam continuamente alimentadas por dados atualizados, e que os impactos das ações implementadas sejam rapidamente monitorados, criando um ciclo contínuo de otimização e melhoria na gestão.

Nesse contexto, uma das premissas da Samarco é trabalhar sempre priorizando o reuso do recurso. Dentre os recursos, destaca-se a reutilização dos recursos hídricos, o qual se tornou uma prioridade, refletindo o compromisso da Samarco com a redução de impactos ambientais e a promoção da sustentabilidade. Esse compromisso é guiado pelo Plano de Gestão de Recursos Hídricos da empresa, que direciona investimentos e ações, e é fortalecido por metas corporativas de recirculação de água nova que inclusive impactam a remuneração variável.<sup>21</sup>

De acordo com informações disponibilizadas nos relatórios de sustentabilidade da Samarco, a empresa possui um sistema automatizado de monitoramento diário de suas vazões captadas em cursos d'água para atendimento de todas as demandas hídricas. Os dados de vazões das águas subterrâneas e superficiais são obtidos por sistemas automatizados de medições de vazões, sendo que, no Complexo de Germano, tanto as águas superficiais quanto as subterrâneas têm seus dados capturados por sistemas automatizados e armazenados diretamente nos sistemas PIMS e MES.

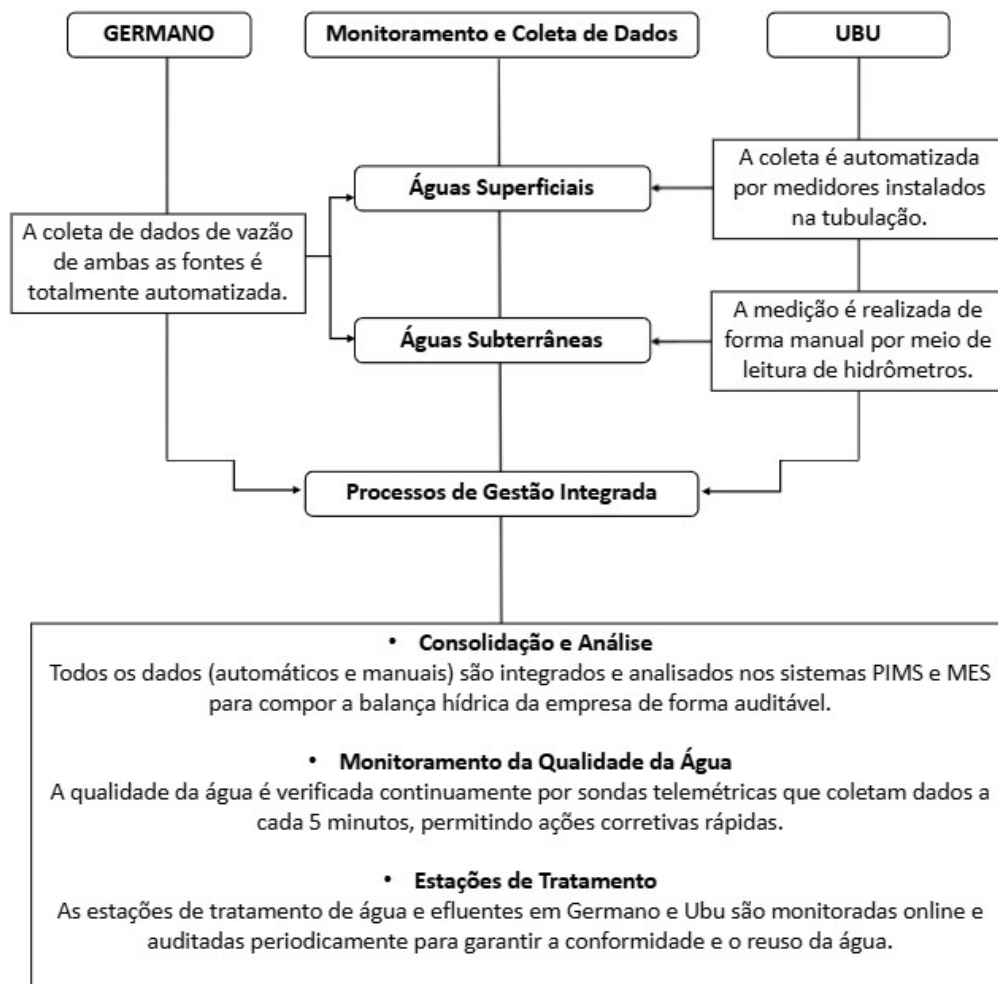
No Complexo de Ubu, enquanto os dados de água subterrânea são obtidos por meio de leitura manual de hidrômetro e compilados em planilhas, os dados de água superficial são coletados por medidores automatizados instalados na tubulação, que alimentam o PIMS. Independentemente da origem, esses dados são então analisados e consistidos nos sistemas PIMS e MES, conforme apresentado na Figura 12, garantindo que toda a balança hídrica seja mensurada e auditável pela instrumentação existente. Além das vazões, a qualidade da água é monitorada por sondas de monitoramento telemétrico que coletam resultados a cada 5 minutos, permitindo ações rápidas. As estações de tratamento de água e efluentes em Germano e Ubu também são monitoradas remotamente e auditadas periodicamente, refletindo a busca contínua pela minimização do uso de água nova nas operações e a exploração de alternativas operacionais.<sup>22</sup>

---

<sup>21</sup> SAMARCO. Relatório de Sustentabilidade 2021. Disponível em: <https://www.samarco.com/relatorios/>. Acesso em: 24 maio 2025.

<sup>22</sup> Idem.

Figura 12 – Sistema de Monitoramento Hídrico da Samarco: Comparativo entre Ubu e Germano



Fonte: Autor

Nos relatórios de sustentabilidade referentes aos anos de 2021 e 2022 foram apresentadas as seguintes tabelas:

Figura 13 – Volume total de água captada por fonte (ML)

Volume total de água captada por fonte (ML) GRI 303-3	2019		2020		2021	
	Germano	Ubu	Germano	Ubu	Germano	Ubu
Águas superficiais (Total)	1.881,18	6.514,36	158,29	1.324,99	2.726,19	993,18
Águas subterrâneas (Total)	3.873,74	51,23	3.888,28	61,53	7.290,94	53,64
<b>Total</b>	<b>5.754,92</b>	<b>6.565,59</b>	<b>4.046,57</b>	<b>1.386,52</b>	<b>10.017,23</b>	<b>1.046,82</b>

Fonte: Relatório de sustentabilidade da Samarco (2021)

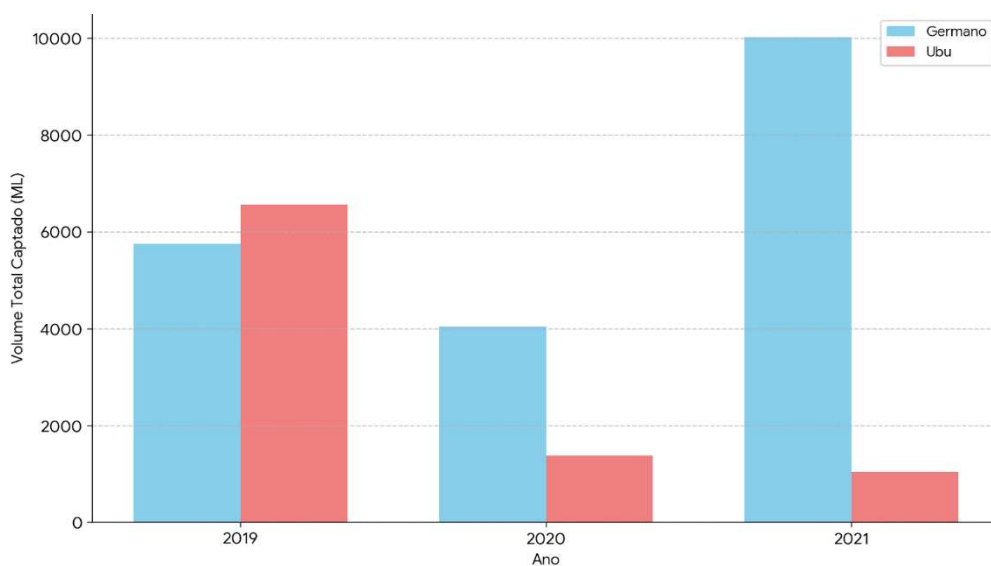
Figura 14 – Volume total de água captada em todas as áreas, por fonte (ML)

VOLUME TOTAL DE ÁGUA CAPTADA EM TODAS AS ÁREAS E ÁREAS COM ESTRESSE HÍDRICO, POR FONTE (ML) GRI 303-3			
Fonte	2020	2021	2022
	Todas as áreas	Todas as áreas	Todas as áreas
Águas superficiais (total)	1.483	3.719	4.710,58
Águas subterrâneas (Total)	3.949	7.344	6.184,04
Água de terceiros (Total)	-	-	-
<b>Total</b>	<b>5.432</b>	<b>11.063</b>	<b>10.894,62</b>

Fonte: Relatório de sustentabilidade da Samarco (2022)

Realizando uma comparação entre o volume total de água captada no complexo de Germano, apresentado na Figura 13, observa-se um significativo aumento tanto nas águas superficiais quanto nas subterrâneas no período entre 2019 e 2021, possivelmente decorrente de uma maior demanda operacional, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Volume Total de Água Captada por Complexo (2019-2021)



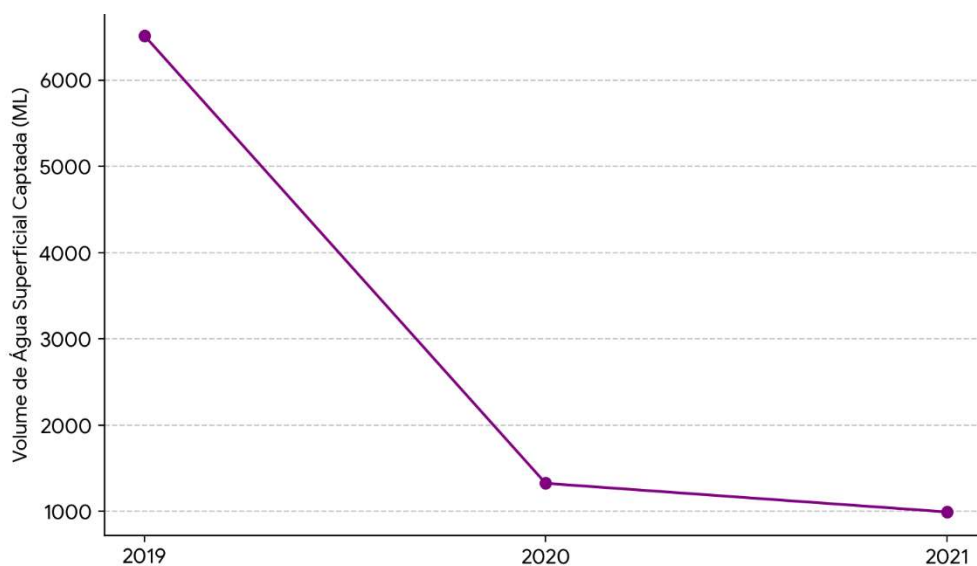
Fonte: Autor

Além disso, realizando a mesma comparação para o complexo de Ubu, verifica-se uma diminuição considerável no volume de águas superficiais captadas, como demonstrado na Figura 16, atribuída principalmente à alta recirculação da água na operação. Conforme dados fornecidos pela Samarco, em 2022, o complexo de Ubu atingiu uma média anual de 97,2% de recirculação de água, contribuindo para uma média geral de 88% no ano, superior à média de 85,6% registrada em 2021, conforme evidenciado na Figura 14.<sup>23</sup> A tendência de captação total entre 2020 e 2022 pode ser visualizada na Figura 17.

---

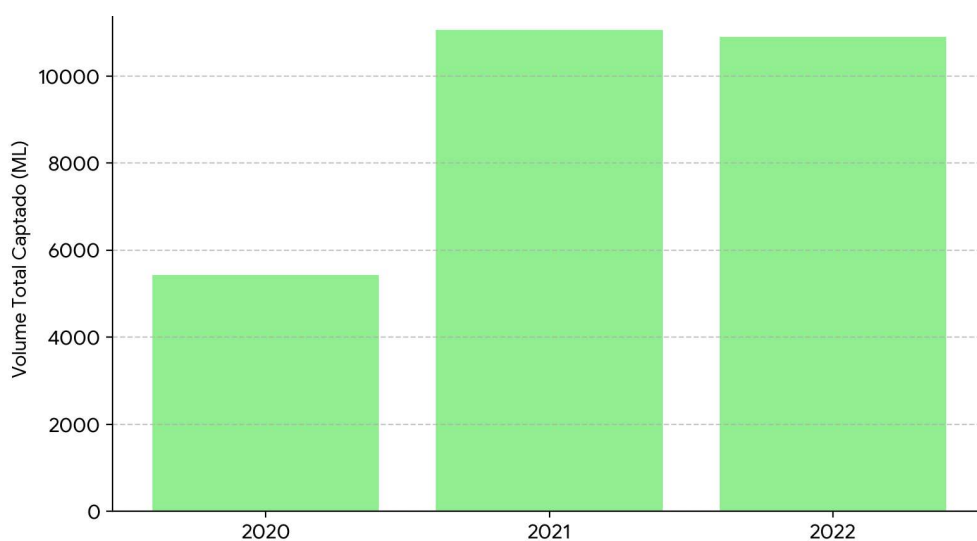
<sup>23</sup> SAMARCO. Relatório de Sustentabilidade 2022. Disponível em: <https://www.samarco.com/relatorios/>. Acesso em: 24 maio 2025.

Figura 16 – Volume Total de Água Superficial Captada em Ubu (2019-2021)



Fonte: Autor

Figura 17 – Volume Total de Água Captada em Todas as Áreas (2020-2022)



Fonte: Autor

Observa-se que o uso dos sistemas PIMS e MES tem contribuído para aprimorar a gestão dos recursos hídricos da empresa, com aumento na eficiência do uso de água, minimizando a captação de novos recursos hídricos e, assim, preservando as fontes naturais, especialmente em Ubu. Em Germano, as flutuações na captação refletem ajustes operacionais que garantem a continuidade das atividades sem comprometer a sustentabilidade dos recursos hídricos.

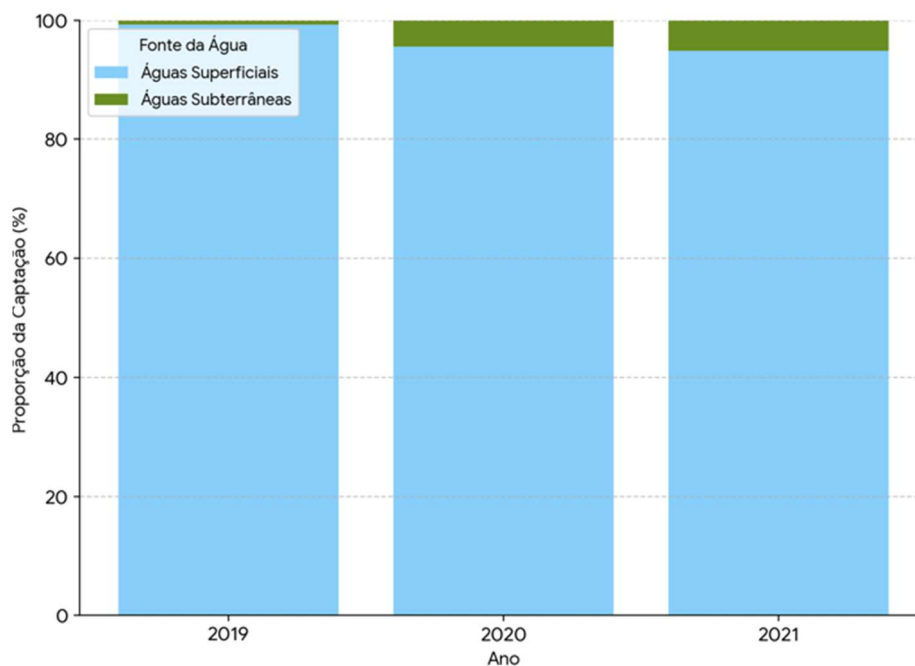
A capacidade de avaliar continuamente o que está funcionando de forma positiva e o que pode ser melhorado, possibilitada pelos sistemas PIMS e MES, permite que a empresa

adote as melhores práticas de gestão hídrica, reforçando seu compromisso com a sustentabilidade. A manutenção de um indicador de performance hídrica e a divulgação do balanço hídrico anualmente também ressaltam a transparência e a responsabilidade da empresa com comunidades e autoridades.

Ainda no âmbito da gestão hídrica, a Samarco demonstra um forte compromisso com a governança e a auditoria de suas práticas. Os sistemas PIMS e MES são pilares nesse processo, fornecendo a base de dados robusta e o registro de ações que suportam as avaliações e auditorias periódicas das estações de tratamento de água e efluentes nos complexos de Germano e Ubu. A conformidade com os requisitos das outorgas e das normas legais para captação e descarte da água é rigorosamente monitorada por meio desses sistemas, que asseguram a rastreabilidade e a transparência em todos os processos auditáveis. Essa abordagem sistêmica garante que a empresa não apenas atenda às regulamentações, mas também promova a melhoria contínua de seus processos ambientais.<sup>24</sup>

Aprofundando a análise dos volumes de captação, a visualização da proporção entre águas superficiais e subterrâneas por complexo, conforme ilustrado nas Figuras 18 e 19, revela aspectos relevantes da estratégia de gestão hídrica adotada pela Samarco.

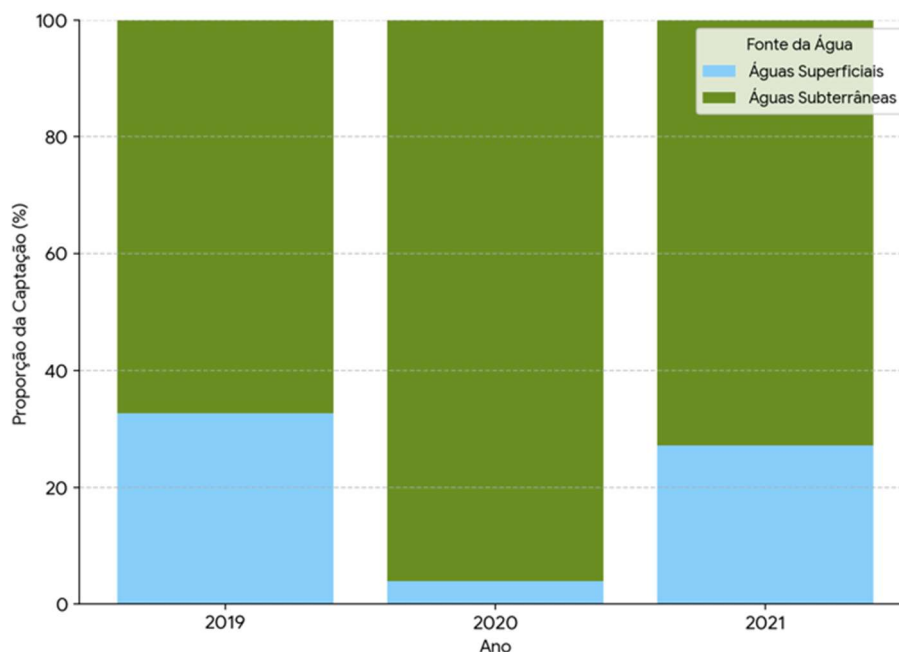
Figura 18 – Proporção da Captação de Água por Fonte – Complexo de Ubu (2019-2021)



Fonte: Autor

<sup>24</sup> SAMARCO. Relatório de Sustentabilidade 2022. Disponível em: <https://www.samarco.com/relatorios/>. Acesso em: 24 maio 2025.

Figura 19 – Proporção da Captação de Água por Fonte – Complexo de Germano (2019-2021)



Fonte: Autor

No Complexo de Germano, por exemplo, observa-se que em 2019 a captação foi majoritariamente subterrânea (aproximadamente 67,3%). Em 2020, essa dependência se intensificou ainda mais, atingindo cerca de 96,1%, mesmo com a redução do volume total captado. Já em 2021, apesar de uma leve recuperação na captação de água superficial, a representatividade da água subterrânea permaneceu elevada, em torno de 72,8%. Esses dados evidenciam uma forte dependência dos aquíferos para suprir a demanda operacional, o que acarreta desafios importantes relacionados à sustentabilidade hídrica, como o risco de rebaixamento do lençol freático, conforme discutido na fundamentação teórica. Nesse contexto, a capacidade do PIMS em disponibilizar dados com esse nível de detalhamento é fundamental para o monitoramento contínuo da origem dos recursos hídricos e para o planejamento estratégico de longo prazo.

Por outro lado, no Complexo de Ubu, a captação se caracteriza por uma predominância quase absoluta de águas superficiais (superior a 90% em todos os anos analisados), com participação mínima de águas subterrâneas. Essa configuração, associada a uma elevada taxa de recirculação, posiciona Ubu como um exemplo de eficiência no aproveitamento de fontes renováveis, reduzindo significativamente a pressão sobre os aquíferos locais. A eficácia dessa abordagem é diretamente sustentada pela atuação do MES, que otimiza os processos industriais, viabilizando a recirculação da água com manutenção dos padrões de qualidade necessários ao reuso e assegurando a eficiência operacional.

A eficácia do sistema de monitoramento da Samarco manifesta-se diretamente nos resultados obtidos pela atuação integrada de seus componentes tecnológicos em campo. A partir da implementação de sistemas automatizados de medição de vazões e sondas de monitoramento telemétricas, torna-se possível transformar dados operacionais em informações estratégicas para a gestão hídrica:

Tabela 2 – Contribuição da Instrumentação de Campo e Sistemas Telemétricos no Monitoramento Hídrico da Samarco

<b>Componente de Campo/Tecnologia</b>	<b>Dados Coletados/Função Primária</b>	<b>Integração com PIMS e MES</b>	<b>Resultado e Impacto na Gestão Hídrica</b>
Sistemas Automatizados de Medição de Vazões	Captura contínua e em tempo real de vazões de águas superficiais e subterrâneas nos pontos de captação (ex: Complexo de Germano para ambas as fontes; Complexo de Ubu para água superficial via medidores em tubulação).	Alimentam diretamente o PIMS, onde os grandes volumes de dados são armazenados, historiados e consistidos com precisão temporal. Os dados são então disponibilizados para o MES, que os utiliza no controle operacional da captação.	Controle Preciso da Captação: Permitem o ajuste em tempo real da captação conforme a demanda, garantindo o cumprimento de outorgas e otimizando o uso. Detecção de Variações: Facilitam a identificação rápida de anomalias volumétricas, como vazamentos ou alterações na disponibilidade.
Sondas de Monitoramento Telemétricas	Coleta de parâmetros de qualidade da água (ex: pH, turbidez, condutividade, oxigênio dissolvido) a cada 5 minutos em pontos estratégicos de monitoramento.	Transmitem dados de alta frequência para o PIMS, que os gerencia como séries históricas de qualidade. O PIMS e o MES processam esses dados para acionamento de alarmes em tempo real e visualização de desvios.	Detecção Imediata de Desvios de Qualidade: Possibilitam a identificação quase instantânea de alterações na qualidade da água, permitindo ações corretivas rápidas.

Fonte: Autor

Esses resultados demonstram como a infraestrutura de monitoramento, ao integrar de forma automatizada e contínua os dados de vazão e qualidade nos sistemas PIMS e MES,

oferece subsídios fundamentais para a tomada de decisão. As informações geradas sustentam ações operacionais rápidas, planejamento estratégico mais preciso e asseguram o cumprimento rigoroso das exigências ambientais. Essa capacidade de resposta ágil torna-se especialmente relevante diante da variabilidade observada nas fontes hídricas dos complexos de Germano e Ubu, contribuindo para a segurança hídrica e a sustentabilidade dos recursos naturais ao longo do tempo.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho evidenciou a importância dos sistemas PIMS (*Plant Information Management System*) e MES (*Manufacturing Execution System*) como ferramentas estratégicas para o monitoramento e a gestão sustentável das vazões de águas subterrâneas e superficiais em ambientes industriais. Por meio do estudo de caso da Samarco, foi possível demonstrar que a integração entre esses sistemas fortalece significativamente a governança hídrica, promovendo maior controle operacional, rastreabilidade e tomada de decisão baseada em dados confiáveis.

Para que a rastreabilidade e a transparência atinjam seu valor máximo, é essencial que estejam alinhadas a auditorias externas independentes. Conduzidas por órgãos reguladores ou empresas especializadas, essas verificações validam os dados e relatórios apresentados, oferecendo a garantia necessária para que a sociedade e as partes interessadas confiem que as informações divulgadas de fato representam a realidade operacional e o cumprimento rigoroso das normas ambientais.

Os dados analisados permitiram observar ganhos significativos na eficiência do uso da água, especialmente com o aumento das taxas de recirculação, a diminuição da captação de novas fontes e a maior rastreabilidade das informações operacionais. Essa estrutura tecnológica garante uma visualização contínua dos indicadores hídricos e uma resposta operacional mais rápida em situações de anomalia, fortalecendo a governança ambiental e o compromisso com a sustentabilidade industrial.

Com base nos resultados obtidos, propõe-se como continuidade deste trabalho a ampliação do escopo de análise para outras unidades operacionais ou empresas do setor de mineração, a fim de comparar o grau de maturidade tecnológica e os resultados alcançados com a aplicação dos sistemas PIMS e MES na gestão hídrica. Essa comparação pode trazer novos insights sobre as diferentes realidades operacionais e contribuir para a identificação de boas práticas replicáveis.

Outro caminho relevante para aprofundamento é a investigação do impacto desses sistemas na eficiência energética associada ao uso da água, considerando o custo ambiental e operacional envolvido nas etapas de recirculação, captação e tratamento. Compreender essa relação pode orientar decisões mais sustentáveis do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Além disso, o desenvolvimento de uma proposta de modelo-padrão de integração PIMS-MES com foco em sustentabilidade é uma alternativa promissora. Este modelo poderia ser adaptado por outras empresas industriais com características semelhantes, funcionando como

uma referência prática para a adoção de tecnologias voltadas à gestão hídrica inteligente e responsável.

Conclui-se, portanto, que a integração entre os sistemas PIMS e MES representa uma solução eficaz e escalável para fortalecer a sustentabilidade hídrica na indústria. Seu uso contínuo e estratégico promove não apenas o cumprimento de requisitos legais, mas também a construção de uma cultura organizacional baseada em dados, inovação e compromisso com o meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

A VOZ DA INDÚSTRIA (FIEMG). **Sistema PIMS: A Revolução no Gerenciamento Industrial**. Disponível em: <https://avozdaindustria.com.br/artigos/pims/>. Acesso em: 31 maio 2025.

APS3. **O que é ISA-95 e em que camada está o APS?** Disponível em: <https://aps3.com.br/blog/o-que-e-isa-95-e-em-que-camada-esta-o-aps/>. Acesso em: 28 jul. 2024.

APS3. **O que é ISA-95 e em que camada está o APS?**. Disponível em: <https://aps3.com.br/o-que-e-isa-95-e-em-que-camada-esta-o-aps/>. Acesso em: 25 maio 2025.

ASPENTECH. **IP.21 Data Historian**. Disponível em: <https://www.aspentech.com/en/products/data-historian/ip21>. Acesso em: 25 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma Brasileira (NBR)**.

AVEVA. **PI System**. Disponível em: <https://www.aveva.com/en/solutions/data-management/pi-system/>. Acesso em: 25 maio 2025.

CARVALHO, Fabio Barros de; TORRES, Bernardo Soares; DE OLIVEIRA FONSECA, Marcos; SEIXAS FILHO, Constantino. **Sistemas PIMS - conceituação, usos e benefícios**. *Tecnologia em metalurgia e materiais*, São Paulo, v. 1, n. 4, abr./jun. 2005. Disponível em: <https://search.proquest.com/openview/8301925fac9145b81ad5aec45755f14d/1?pqorigsite=gscholar&cbl=2045598>. Acesso em: 28 jul. 2024.

CATTARUZZI, Ricardo Figueiroa; CHICAROLI, Rodrigo. **Desenvolvimento de um sistema MES (Manufacturing Execution System)**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Computação) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/item/001418727>. Acesso em: 25 maio 2025.

CNDH. Conselho Nacional dos Direitos Humanos. **Relatório da Barragem do Rio Doce**. Disponível em: [https://www.gov.br/mdh/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/old/cndh/relatorios/RelatriodaBarragemdoRioDoce\\_FINAL\\_APROVADO.pdf](https://www.gov.br/mdh/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/old/cndh/relatorios/RelatriodaBarragemdoRioDoce_FINAL_APROVADO.pdf). Acesso em: 28 jul. 2024.

DIRECTA AUTOMAÇÃO. **Sistema MES: Módulo Produção**. Disponível em: <https://directaautomacao.com.br/sistema-mes/producao/>. Acesso em: 25 maio 2025.

EMILY. **Ações de recuperação apresentam resultados - Samarco Mineração**. Disponível em: <https://www.samarco.com/acoes-de-recuperacao-apresentam-resultados/>. Acesso em: 25 ago. 2024.

ESTADO DE MINAS. **Samarco admite falha na barragem que causou tragédia em Mariana**. Disponível em:

[https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/08/30/interna\\_gerais,798841/samarco-admite-falha-na-barragem-que-causou-tragedia-em-mariana.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/08/30/interna_gerais,798841/samarco-admite-falha-na-barragem-que-causou-tragedia-em-mariana.shtml). Acesso em: 24 maio 2025.

ETHOS ENGENHARIA. **Água Subterrânea: Como Proteger esse Recurso Estratégico?** Disponível em: <https://ethosengenharia.com.br/agua-subterranea-protecao/>. Acesso em: 25 maio 2025.

GESTAOPRO. **Como um Sistema para Metalúrgicas e Indústrias Ajuda a Evitar Paradas não Programadas.** Disponível em: <https://gestapro.com.br/blog/tecnologia/como-um-sistema-para-metalurgicas-e-industrias-ajuda-a-evitar-paradas-nao-programadas>. Acesso em: 31 maio 2025.

HAMMER, M. *et al.* **Profit per Hour as a Target Process Control Parameter for Manufacturing Systems Enabled by Big Data Analytics and Industry 4.0 Infrastructure.** *Procedia CIRP*, v. 63, p. 715–720, 2017.

HIVECLOUD. **Ambiente de produção x homologação: qual a diferença?** Disponível em: <https://www.hivecloud.com.br/post/ambiente-de-producao-x-homologacao-qual-a-diferenca/>. Acesso em: 25 maio 2025.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Onda de rejeitos da Samarco atingiu 663 km de rios e devastou 1.469 hectares de terras.** Brasília, 2015. Disponível em: [https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/copy\\_of\\_noticias/noticias-2015/onda-de-rejeitos-da-samarco-atingiu-663-km-de-rios-e-devastou-1-469-hectares-de-terras](https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/copy_of_noticias/noticias-2015/onda-de-rejeitos-da-samarco-atingiu-663-km-de-rios-e-devastou-1-469-hectares-de-terras). Acesso em: 24 maio 2025.

MG, D. G. **Imagens mostram antes e depois de área das barragens em Mariana.** Disponível em: <https://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2015/11/imagens-mostram-antes-e-depois-de-area-das-barragens-em-mariana.html>. Acesso em: 28 jul. 2024.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. DE L. **Engenharia de automação industrial.** 2. ed. Rio de Janeiro: Grupo Gen - LTC, 2000.

MPMG. Ministério Público de Minas Gerais. **Rompimento da barragem de Fundão, em Mariana: resultados e desafios cinco anos após o desastre.** Disponível em: <https://www.mpmg.mp.br/portal/menu/comunicacao/noticias/rompimento-da-barragem-de-fundao-em-mariana-resultados-e-desafios-cinco-anos-apos-o-desastre.shtml>. Acesso em: 28 jul. 2024.

PPI MULTITASK. **O papel do MES na gestão do Supply Chain:** entrevista com o especialista Marcelo Pinto. Disponível em: <https://www.ppi-multitask.com.br/ppi/blog/o-papel-do-mes-na-gestao-do-supply-chain-entrevista-com-o-especialista-marcelo-pinto/>. Acesso em: 25 maio 2025.

SAMARCO. **Ações de recuperação apresentam resultados.** Disponível em: <https://www.samarco.com/acoes-de-recuperacao-apresentam-resultados/>. Acesso em: 24 maio 2025.

SAMARCO. **Estruturas Geotécnicas**. Disponível em: <https://www.samarco.com/estruturas-disposicao-rejeitos/>. Acesso em: 28 jul. 2024.

SAMARCO. **Relatório Bial 2015-2016**. Disponível em: <https://www.samarco.com/relatorios/>. Acesso em: 24 maio 2025.

SAMARCO. **Relatório de Sustentabilidade 2021**. Disponível em: <https://www.samarco.com/relatorios/>. Acesso em: 24 maio 2025.

SAMARCO. **Relatório de Sustentabilidade 2022**. Disponível em: <https://www.samarco.com/relatorios/>. Acesso em: 24 maio 2025.

SAP. **O que é gestão de dados mestres (MDM)?**. Disponível em: <https://www.sap.com/brazil/products/data-cloud/master-data-governance/what-is-mdm.html>. Acesso em: 25 maio 2025.

SAP. **O que é um Manufacturing Execution System (MES)?**. Disponível em: <https://www.sap.com/brazil/products/scm/execution-mes/what-is-mes.html>. Acesso em: 25 maio 2025.

SCHOLTEN, B. **MES Guide for Executives: Why and how to Select, Implement, and Maintain a Manufacturing Execution System**. ISA, 2009.

SEIXAS FILHO, Constantino. **PIMS - Process Information Management System: Uma Introdução**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, [s.d.]. Disponível em: <http://www.cpdee.ufmg.br/~seixas/PaginaII/Download/DownloadFiles/Pims.PDF>. Acesso em: 09 agosto 2025.

SILVA, Eduardo Cabral; GUSMÃO, Luciana de Omena; SANTANA, Cícero Fellipe Diniz; SANTOS, Wendell José Soares. **Reuso de água: sustentabilidade hídrica**. Maceió-Alagoas: Editora Hawking, 2020. v. 1, 286 f. ISBN 978-65-81683-23-8. Disponível em: <https://www.editorahawking.com.br>. Acesso em: 25 maio 2025.

SOUZA, A. J. **Sistema de Gerência de Informação de Processos Industriais via Web**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Rio Grande do Norte.

TCL RESERVATÓRIOS. **Águas Superficiais: Importância e Gestão Eficiente**. Disponível em: <https://tclreservatorios.com.br/glossario/aguas-superficiais-importancia-e-gestao-eficiente/>. Acesso em: 25 maio 2025.

TOTVS. **Sistema MES: o que é, para que serve e quais seus benefícios**. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/sistema-mes/>. Acesso em: 25 maio 2025.

URBANO, L. R. H. **Gerenciamento de ativos de automação: Uma solução baseada em PIMS**. In: Seminário Nacional de Sistemas Industriais e Automação, 4., 2009.