Universidade Federal de Itajubá

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas

Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos PROFÁGUA

Geisson Lima Meireles

Monitoramento e gestão hídrica em tempo real aplicada a mineração

Itabira- Minas Gerais

2020

Geisson Lima Meireles

Monitoramento e gestão hídrica em tempo real aplicada a mineração

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá. Área de concentração: Instrumentos da política de recursos hídricos. Linha de pesquisa: Ferramentas aplicadas aos instrumentos de gestão de recursos hídricos.

Aprovada em 27 de Novembro de 2020.

Orientador (a) (es): Prof. Dr. Ana Carolina Vasques Freitas
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - UNIFEI

Coorientador (a) (es): Prof. Dr. Roberto Cézar de Almeida Monte-Mor
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - UNIFEI

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. Fernando Neves Lima
Instituto de Engenharias Integradas- UNIFEI

_____

Dr. Diego Oliveira de Souza
Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN

Itabira – Minas Gerais

2020

DEDICATÓRIA

Dedicado a
minha Mãe Ester, meu Pai Geraldo a meus irmãos Janderson e Jefferson e a minha esposa Carol.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela proteção e sabedoria durante estes dois anos de jornada, sem ele nada disso seria possível.

Agradeço ao corpo docente da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), polo Itabira, por seu empenho em dar as melhores condições acadêmicas para a primeira turma do programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÀGUA). Como Itabirano, sinto um orgulho ainda mais singular por ter a oportunidade de ser discente da instituição e ter a certeza que o futuro das próximas gerações de nossa comunidade estará bem cuidado.

Aos meus orientadores, Ana Carolina e Roberto Monte-Mor, que a cada reunião buscaram extrair o melhor de mim, sempre com muito cuidado, compreensão e paciência. A motivação e o aprendizado transmitidos a mim, me fez acreditar que profissionais de alto nível como vocês, certamente vão fazer a diferença na vida de muitas pessoas que serão presenteadas em poder se inspirar em vocês.

Aos meus gestores e colegas da empresa Vale, pelo apoio incondicional para a execução deste projeto de pesquisa. Em especial a Alvaro Guedes, por acreditar em mim e me encorajar a enfrentar este novo desafio do início ao fim.

Aos colegas de classe, pela parceria, apoio e momentos de alegria compartilhados que contribuíram para o surgimento de um novo profissional.

À minha Família, por ser minha base nesta caminhada, em especial aos meus pais, Geraldo e Ester, sempre acreditando em meu potencial. À minha esposa Carol, pelo carinho, compreensão e entendimento nos momentos de ausência.

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

A natureza não faz milagres, faz revelações.

Carlos Drummond de Andrade

RESUMO

MEIRELES, Geisson Lima. **Monitoramento e gestão hídrica em tempo real aplicada a mineração.** 2020. 103 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2020.

A disponibilidade hídrica é um dos principais fatores que sustentam as operações de mineração, sendo necessário o conhecimento do volume real de água que pode ser extraído ou é descarregado em seus processos produtivos. Visando fornecer as melhores ferramentas para lidar com os recursos hídricos na mineração, este trabalho teve por objetivo elaborar um modelo de gestão da quantidade de água disponível em tempo real para um complexo minerador. Para isto, inicialmente foi realizado um levantamento da gestão hídrica existente em uma unidade mineradora. Após a constatação de que o modelo atual poderia apresentar incertezas nos dados, foi elaborado uma metodologia que descreve um sequenciamento de atividades com o intuito de implantar um sistema de gestão automatizado para o monitoramento em tempo real. As ferramentas de automação que permitiriam viabilizar isto foram selecionadas. Por fim, para validar a efetividade do programa, foi proposta a implantação deste em uma unidade industrial de beneficiamento de minério de ferro, levando-se em conta os fluxos de entrada e saída para um determinado período. Recursos computacionais e instrumentos que identificam as vazões em um determinado período foram utilizados para a realização dos cálculos matemáticos referentes aos ritmos horários de captação e descarga dos fluxos, permitindo a contabilização dos dados e a geração de indicadores e regramentos para possíveis tomadas de decisões operacionais. Os resultados demonstraram uma melhoria no controle da quantidade de água reutilizada e recirculada nos processos, além da: redução dos deslocamentos de funcionários a campo, possibilidade de integração dos dados à sistemas de alertas, geração de Indicadores-Chave de Desempenho (KPI's), e redução no tempo médio gasto para a contabilização dos dados em períodos de fechamento de dados. Por fim, constatou-se a pretensão de expandir esta solução de monitoramento em tempo real para todo o Complexo Industrial, enfatizando assim a importância dos resultados obtidos com esta pesquisa. Portanto, este trabalho mostrou que o monitoramento em tempo real proporciona ao complexo minerador a possibilidade de criar um plano detalhado para a gestão da água e, portanto, também ser capaz de preparar-se contra eventuais mudanças no ciclo hidrológico. Além disso, este trabalho contribuiu para o fornecimento de ferramentas e metodologias para avaliação, aperfeiçoamento e integração dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, além de oferecer um modelo de gestão hídrica empresarial de pequeno, médio e grande porte.

Palavras-chave: Automação. Gestão Hídrica. Instrumentação. Monitoramento.

ABSTRACT

MEIRELES, Geisson Lima. **Water management and real-time monitoring applied to mining**. 2020. 103 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Itabira, Minas Gerais, 2020.

Water availability is one of the main factors that sustain mining operations, requiring knowledge of the real water volume that can be extracted or discharged in its production processes. Aiming to provide the best tools to deal with water resources in mining, this work intended to develop a model for managing the amount of water available in real time for a mining complex. For this purpose, an investigation of the existing water management in a mining unit was initially carried out. After realizing that the current model could present uncertainties in the data, a methodology which describes a sequence of activities was elaborated in order to implement an automated management system for real-time monitoring. The automation tools that would make this possible were selected. Finally, in order to validate the effectiveness of the program, it was proposed to install it in an iron ore beneficiation industrial unit, taking into account the inflows and outflows for a given period. Computational resources and instruments, that identify the flows in a given period, were used to perform the mathematical calculations related to the hourly rhythms of capturing and discharging flows, allowing the accounting of data and the generation of indicators and rules for possible operational decision making. The results showed an improvement in the control of the amount of water reused and re-circulated in the processes, in addition to: reducing the displacement of employees in the field, possibility of integrating data with alert systems, generation of Key Performance Indicators (KPI's), and a reduction in the average time spent accounting for data during data closure periods. Finally, it was envisioned to expand this monitoring solution in real time to the entire Industrial Complex, thus emphasizing the importance of the results obtained with this research. Therefore, this work showed that real-time monitoring provides the possibility of a mining complex to create a detailed plan for water management and, therefore, also be able to prepare against eventual changes in the hydrological cycle. In addition, this work contributed in terms of provide tools and methodologies for evaluating, improving and integrating the instruments of the National Water Resources Policy, in addition to offering a small, medium and large business water management model.

Keywords: Automation. Water management. Instrumentation. Monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Objetivos da Política e o Sistema de Recursos Hídricos no Brasil..... 26
Figura 2 - Instrumentos e Sistemas de Gestão da Política Recursos Hídricos no Brasil..... 27
Figura 3 - Valores de exportações e importações no Brasil 1° Semestre de 2020. 29
Figura 4 - Interação da água na mineração..... 32
Figura 5 - Fluxo da água no processo de mineração. 34
Figura 6 - Balanço hídrico em uma Unidade Industrial. 36
Figura 7 - Fluxo Hídrico em uma barragem de rejeitos de mineração..... 37
Figura 8 - Integração do balanço hídrico entre unidade industrial e reservatórios..... 39
Figura 9 - Inserção do balanço hídrico no gerenciamento de recursos hídricos..... 40
Figura 10 - Níveis de gestão de dados de automação..... 44
Figura 11 - Princípio de medição medidor de vazão eletromagnético. 48
Figura 12 - Estrutura de comunicação usando tecnologias sem fio. 51
Figura 13 - Estruturação de um controlador lógico programável..... 52
Figura 14 - Localização das plantas de minério de ferro do Complexo da Mina de Conceição. 55
Figura 15 - Barragens das plantas de beneficiamento da Mina de Conceição – Itabira-MG. 56
Figura 16 – Localização das Barragens da Mina de Conceição – Itabira-MG..... 57
Figura 17 - Municípios integrantes da Bacia do Rio Piracicaba. 58
Figura 18 - Média mensal de precipitação (Normais Climatológicas de 1961-1990) e temperatura (Normais Climatológicas de 1931-1960) – INMET..... 59
Figura 19 - Etapas para operacionalização do sistema de gestão hídrica..... 62
Figura 20 - Diagrama de fluxo de captação e descarga de água e rejeitos na Unidade Industrial. 69
Figura 21 - Medidor de vazão eletromagnético modelo *Promag 400*..... 76
Figura 22 - Controlador modelo M-580. 79
Figura 23 - Estrutura de coleta de dados do sistema *PI System.* 82
Figura 24 - Bloco de contabilização dos dados de captação de água em uma linha da Usina de Conceição..... 85
Figura 25 - Tela de gestão dos dados de captação de água da unidade industrial..... 86
Figura 26 - Contabilização de recursos hídricos em uma unidade de beneficiamento de minério de ferro. 88
Figura 27 - Fluxograma para auxílio a tomada de decisões operacionais..... 89

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Dados históricos de pluviometria no complexo minerador no período de 1977-2019 65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Retiradas de água na Austrália em milhões de metros cúbicos (Mm^3) e suas respectivas porcentagens em relação ao total. 20
Quadro 2 – Aplicações da água em mineradoras, riscos e seus impactos 23
Quadro 3 – Interações da água em processos de mineração. 30
Quadro 4 – Princípios de medição de vazão de líquido e aplicações recomendadas. 47
Quadro 5 – Instrumentação das linhas de captação da Usina I. 72
Quadro 6 – Instrumentação das linhas de descarga da Usina I. 73
Quadro 7 – Instrumentação das linhas de captação da Usina II. 74
Quadro 8 – Instrumentação das linhas de descarga da Usina II. 74
Quadro 9 – Instrumentação das linhas de descarga da Ciclonagem. 75
Quadro 10 – Parâmetros de volumes captados. 83
Quadro 11 – Simbologia para cálculos software PI, Osisoft 2019. 84
Quadro 12 – Periodicidade de volumes bombeados. 85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CLP	Controlador Lógico Programável
CNI	Confederação Nacional das Indústrias
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
DF	Distrito Federal
FIT	*Flow Indicator Transmiter* – Transmissor Indicador de Fluxo
GRI	*Global Reporting Initiative* – Iniciativa de Relatório Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ISA	*International Society of* Automation - Sociedade Internacional de Automação
ISO	*The International Organization for Standardization* - Organização Internacional de Normalização
IWA	*International Water Association* - Associação Internacional da Água
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
KPI	*Key Performance Indicator* – Indicador Chave de Desempenho
MCA	*Members of the Minerals Council of Australia* – Membros do Conselho de Minerais da Austrália
MG	Minas Gerais
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PI	*Plant Information* – Informações da Planta
PIB	Produto Interno Bruto
ROM	*Run of Mine* - Minério bruto
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

2. OBJETIVO GERAL 17

2.1 Objetivos específicos 17

2.2 Relevâncias para a linha de pesquisa 18

3. REFERENCIAL TEÓRICO 19

3.1 Gestão hídrica na mineração mundial 19

3.2 Gestão hídrica no Brasil e a Política Nacional de Recursos Hídricos 24

3.3 Recursos hídricos no setor mineral brasileiro 28

3.4 Balanço hídrico na mineração 34

3.4.1 Balanço hídrico na unidade industrial 35

3.4.2 Balanço hídrico em barragens 37

3.4.3 Integração balanço hídrico: reservatórios e unidades industriais 39

3.5 Sistemas de Automação Industrial 41

3.5.1 Estruturação dos sistemas de automação 43

3.5.2 Instrumentação Industrial 46

3.5.2.1 Princípios de medição de vazão volumétrica para líquidos 46

3.5.2.2 Medidor de vazão tipo eletromagnético 48

3.5.3 Transmissão de dados de instrumentação de campo 50

3.5.4 Equipamentos de aquisição de dados 51

3.5.5 Softwares para monitoramento de dados 53

4. MATERIAIS E MÉTODOS 54

4.1 Caracterização da área de estudo 54

4.1.1 Localização do complexo minerador 54

4.1.2 Localização na bacia hidrográfica 56

4.1.3 Condições climáticas do local 59

4.2 Metodologia 60

4.2.1 Diagnóstico do controle dos dados hídricos na unidade industrial 60

4.2.2 Tecnologias de automação existentes na unidade industrial 61

4.2.3 Metodologia proposta neste trabalho para o monitoramento de informações hídricas em tempo real 62

5. RESULTADOS 64

5.1 Diagnóstico do controle dos dados hídricos empregados na Unidade Industrial 64

5.2 Tecnologias de automação existentes na unidade industrial 67

5.3 Aplicação da proposta metodológica na unidade industrial 68

5.3.1 Definição do diagrama de tubulações atualizado 68

5.3.2 Instrumentação das linhas de captação e descarga 71

5.3.3 Transmissão dos dados de campo 77

5.3.4 Aquisição dos dados de campo 79

5.3.5 Tratamento e exibição dos dados graficamente 81

5.3.6 Operação assistida 87

5.4 Fluxograma para tomada de decisões operacionais 89

5.5 Indicadores qualitativos da relevância deste trabalho 90

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 95

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 98

ANEXO I 103

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2015), “embora o Brasil possua 12% do volume mundial de água doce, sua escassez, devido a condições climáticas severas nos últimos anos, em algumas regiões do país, provocou um debate sobre como os recursos hídricos podem ser efetivamente geridos em um país “rico em água””. A OCDE, ainda, destaca que são necessárias instituições e políticas sólidas para o uso mais correto da água, monitorando e gerenciando localmente a sua disponibilidade na atualidade e no futuro.

O setor industrial no Brasil foi responsável, em 2015, pela geração de 1,3 trilhões de reais em divisas, o que corresponde a 22,7% do Produto Interno Bruto (PIB), pelo emprego de mais de 10 milhões de trabalhadores, e contribuiu com cerca de 40% das exportações realizadas (CNI, 2017). Neste contexto, o setor mineral situa-se na base de diversas cadeias produtivas essenciais para a vida moderna, sendo uma importante fonte de energia e tendo uma representativa participação na economia brasileira. De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2018), o setor representa 16,8% do PIB industrial brasileiro, com saldo na balança comercial de 34 bilhões de dólares em 2018 e um valor total da produção recorde de aproximadamente 2 bilhões de ton./ano. Segundo o Instituto, ainda existem 9.415 minas em regime de concessão de lavra, empregando 183.635 trabalhadores diretos no ano de 2018.

Segundo o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC, 2016), os minérios estão entre os principais produtos exportados no Brasil nos últimos anos. Além disto, para o Ministério o setor mineral se destaca pela elevada capacidade de geração de empregos, na medida em que 175 mil pessoas foram empregadas na mineração e 2,2 milhões na cadeia de transformação mineral em 2015.

A elevada concorrência atual no mercado de minério de ferro tem exigido cada vez mais ações para aumento de produtividade, o que pode implicar em expansões das unidades industriais, alterações das rotas de processo e/ou otimização dos processos. Neste contexto, a demanda hídrica industrial tem sido proporcional ao crescimento da indústria, além de refletir a conjuntura econômica do país. Segundo a Organização das Nações

Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO, 2014), a demanda global por água no setor industrial deve aumentar, até 2050, cerca de 400%. Portanto, nota-se uma crescente preocupação com a eficiência no uso da água nas estratégias competitivas das indústrias nacionais, especialmente daquelas que utilizam este recurso mais intensivamente. Northey *et al.* (2016) destacam que apesar da mineração consumir uma quantidade de água relativamente pequena em escala global, quando se considera as escalas locais, nas regiões onde ocorre a atividade minerária, este consumo passa a ser muito significativo.

De acordo com o Relatório de Sustentabilidade da mineradora Vale S.A. (VALE, 2017), a empresa reconhece a importância dos recursos hídricos para suas atividades e, por isso, desenvolve programas e iniciativas que ultrapassam o atendimento aos requisitos legais, como tecnologias para otimização do uso e consumo de água. Dentre as preocupações da empresa, destacam-se os riscos relacionados ao estresse hídrico e o aumento dos conflitos pela necessidade de água. De acordo com o relatório, para mitigar esses riscos, a empresa está trabalhando em um plano plurianual de redução do uso específico de água nas operações, denominado “Meta Água”. O objetivo é reduzir a captação para uso em processos produtivos, estimulando iniciativas de reuso, aprimoramento de processos nas unidades operacionais e aproveitamento de água de chuva.

Contudo, pode-se verificar que, atualmente, as informações sobre o uso dos recursos hídricos na mineração ou na indústria podem apresentar incertezas, já que os dados são obtidos, em sua maior parte, de forma manual por diferentes profissionais, alocados em plataformas distintas, espaçados por períodos longos, prejudicando as tomadas de decisão e comprometendo a gestão dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas de influência das mineradoras. Neste contexto, segundo Vasconcelos, Rocha e Alexandria (2018), “a automação de processos é uma das ferramentas que auxiliam no uso sustentável da água.” De acordo com os autores, a área da automação traz como vantagens a redução de custos, qualificação de processos produtivos, além da precisão e padronização das atividades no qual está inserida.

Portanto, este estudo propõe a elaboração de uma metodologia para gestão da quantidade de água em tempo real em uma planta de beneficiamento de minério de ferro, indicando, por meio de um painel, as etapas necessárias para operacionalização deste modelo de

gestão, construído utilizando-se recursos de automação, telecomunicações e instrumentação disponíveis. Este painel permitirá a geração de indicadores, que auxiliarão a visão global da movimentação de água na unidade industrial, agilizando as tomadas de decisão e propiciando um melhor aproveitamento das reservas hídricas. O modelo proposto poderá ser aplicado a empresas de pequeno, médio e grande porte, observando -se as predefinições sugeridas nas etapas de implantação.

Essa dissertação está estruturada da seguinte maneira: após a introdução apresentada neste capítulo, os objetivos deste trabalho são enumerados. O terceiro capítulo aponta o referencial teórico que embasa a metodologia aplicada, abordando panoramas da gestão hídrica em alguns países, especificamente no setor mineral. Além disso, são descritas as tecnologias de automação, que visam auxiliar na gestão hídrica, possibilitando a análise e compreensão de como a automação pode contribuir em um sistema de monitoramento. O quarto capítulo expõe a metodologia que foi desenvolvida para a execução deste estudo e, o quinto capítulo apresenta a aplicação desta metodologia em uma Unidade Industrial e os resultados obtidos. Finalmente, no último capítulo são apresentadas as conclusões e considerações finais. O produto desta dissertação é apresentado no Anexo I.

2. OBJETIVO GERAL

Frente aos desafios crescentes na gestão hídrica, impostos no setor mineral, este trabalho de pesquisa tem como objetivo central elaborar uma metodologia para a implantação de um sistema de monitoramento em tempo real utilizando dados hídricos de uma unidade industrial de mineração.

2.1 Objetivos específicos

- Avaliar quais tecnologias podem ser utilizadas para o monitoramento em tempo real dos recursos hídricos associados à etapa de captação e recirculação de água em uma unidade industrial. Este objetivo tem o intuito de fornecer uma estruturação preliminar, que permita verificar quais tecnologias de automação serão mais apropriadas para a gestão dos dados hídricos;

- Elaboração de um painel de gestão da quantidade de água em tempo real em uma unidade industrial. Este objetivo tem o propósito de avaliar a sistemática proposta nesta pesquisa e se a mesma pode ser aplicada, com algumas adaptações, a empresas de pequeno, médio e grande porte;

- Contribuir para o fornecimento de ferramentas e metodologias para avaliação, aperfeiçoamento e integração dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos no setor de mineração utilizando-se de recursos de Automação Industrial. Este objetivo tem a intenção de fornecer subsídios e diretrizes aos órgãos fiscalizadores para o controle e monitoramento das reservas hídricas e volumes outorgados que são utilizados pelo setor industrial.

2.2 Relevâncias para a linha de pesquisa

Este trabalho é aderente a área de concentração “Instrumentos da Política de Recursos Hídricos”, e, portanto, pretende fornecer ferramentas e metodologias para avaliação, aperfeiçoamento e integração dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos. As análises que serão realizadas também estão em concordância com a linha de pesquisa “Ferramentas aplicadas aos instrumentos de gestão de recursos hídricos”, pois tem o potencial de oferecer um modelo para aperfeiçoamento da gestão dos recursos hídricos utilizados na mineração.

Sendo assim, os resultados deste trabalho poderão ser utilizados na análise e na implementação de sistemas de monitoramento automatizados para gestão hídrica em diferentes setores industriais. Para cada sistema industrial deverão ser verificadas as necessidades, o nível tecnológico, as constantes de tempo dos processos e de resposta dos dispositivos e equipamentos utilizados. Além disso, conforme mencionado anteriormente, este trabalho pode auxiliar os órgãos fiscalizadores, em termos de diretrizes para o cumprimento de normas para controle e monitoramento das reservas hídricas e volumes outorgados que são utilizados no setor industrial.

Cabe ressaltar ainda que este estudo está em concordância com a terceira recomendação da OCDE (2015): governar a alocação da água – “Identificar as diferentes opções de monitoramento disponíveis, inclusive os custos, benefícios e limitações associados a cada opção, bem como determinar a sua adequação para diferentes fins e situações e identificar as áreas prioritárias para a implementação de arranjos de monitoramento mais sofisticados e direcionados”. Além disso, os resultados obtidos poderão fornecer subsídios para atender uma das demandas da Superintendência de Operações e Eventos Críticos da Agência Nacional de Águas que é o “Planejamento de sistemas de infraestrutura hídrica para a mitigação dos impactos de inundações e secas.”

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Para fundamentação deste estudo, foi realizada uma revisão bibliográfica, a partir do levantamento de documentos e literaturas publicadas, de forma a contextualizar a gestão de água, associada ao setor mineral, em termos mundiais e no território brasileiro, e apresentar sistemas de automação que permitem uma gestão mais eficiente. Assim, inicialmente é abordada a importância da água no setor mineral, em seguida é introduzido o conceito de balanço hídrico na mineração, e, por fim, são apresentadas ferramentas de automação que podem auxiliar no monitoramento dos recursos hídricos.

3.1 Gestão hídrica na mineração mundial

ANA e IBRAM (2006) destacam o crescimento exponencial da preocupação com o aumento do consumo de água mundial, classificando essa recente preocupação como uma das mais importantes da humanidade e, neste sentido, os elementos chaves para desfrutarmos no futuro de água em quantidade e qualidade adequadas se resumem no comportamento da população e em uma gestão eficiente dos recursos hídricos.

Para entender melhor como otimizar o uso da água nos processos de mineração, é importante primeiro compreender como a indústria de mineração global usa a água. De acordo com Gunson *et al.* (2013), as mineradoras e outras indústrias têm reportado o uso da água de diferentes formas, pelo menos, desde o início da década de 1970. Contudo, a partir do ano de 2000, grandes mineradoras do cenário internacional têm reportado seu uso de água, entre muitos outros indicadores, usando as diretrizes da *Global Reporting Initiative* (GRI), que é uma organização internacional sem fins lucrativos, com padrões independentes, que auxilia empresas, governos e outras organizações a reportar, por meio de relatórios, seus impactos sobre o meio ambiente. Apesar disto, existe uma grande dificuldade em extrair os dados de Unidades Industriais específicas, já que os relatórios publicados consideram a organização como um todo, e não minas individuais. Além disso, os relatórios corporativos das mineradoras detalham o uso da água em suas minas por meio de uma variedade de métodos e parâmetros, conforme o que é mais adequado à empresa (GUNSON *et al.*, 2013).

Relatórios periódicos de abastecimento e uso da água por setor industrial também têm sido produzidos por alguns países. Por exemplo, Pink (2010) apresentou os dados de extração de água para cada tipo de indústria na Austrália (Quadro 1).

Quadro 1 – Retiradas de água na Austrália em milhões de metros cúbicos (Mm^3) e suas respectivas porcentagens em relação ao total.

Categoria	**Mm^3**	**%**
Agricultura	6.893	9,9
Aquicultura	445	0,6
Silvicultura e extração de madeira	92	0,1
Pesca, caça e armadilhas	2	0,0
Serviços de apoio à agricultura, silvicultura e pesca	61	0,1
Mineração	858	1,2
Manufatura	675	1,0
Eletricidade e gás	45.069	64,8
Abastecimento de água	11.686	16,8
Serviços de coleta, tratamento e eliminação de resíduos	7	0,0
Outras Indústrias	1.264	1,8
Famílias	1.767	2,5
Meio Ambiente	691	1,0

Fonte: Traduzido de Pink (2010).

Os dados apresentados no Quadro 1 apontam uma retirada de água no setor de mineração de 858 Mm^3 de água no período de 2008 e 2009, montante equivalente 1,2% da extração total de água no país.

Já a indústria de mineração do Canadá, segundo Tejos e Proust (2008), utilizou 92 Mm^3 de água em 2009, o que representou aproximadamente 2% da extração de água industrial no país. O Chile, por sua vez, segundo os mesmos autores, é um país que apresenta uso intensivo de água pela mineração, ao mesmo tempo em que enfrenta problemas de escassez de água. Neste país a indústria de mineração em 2006 consumiu cerca de 356 Mm^3, representando 5% do consumo total de água do Chile (TEJOS e PROUST, 2008).

Gunson *et al.* (2013) explicam que, embora as retiradas de água das minas sejam significativas, elas respondem por uma pequena parte das retiradas globais de água, mesmo em países pobres deste recurso e com intensa atividade minerária, como o Chile e a Austrália. No entanto, a nível local, quando a mineração ocorre em áreas onde o recurso hídrico é escasso, a retirada de água pode impactar severamente o abastecimento local.

Além disso, é possível identificar referências internacionais que remetem a ISO 14046:2014, como a metodologia para o cálculo da pegada hídrica, especificando princípios, requisitos e diretrizes relacionados com a avaliação da pegada hídrica de produtos, processos e organizações. Northey *et al.* (2016) destacam que, assim como ocorre na mineração, indústrias de outros setores também têm limitações de dados disponíveis para uso em estudos de pegada hídrica.

Ao citar o bombeamento na mina de ferro de Kursk, na antiga União Soviética, com 50.000 m³/h; a mina a céu aberto de linhito de Belchatów (Polônia), com 62.500 m³/h; ou a vazão de 226.800 m³/h para o conjunto de jazidas de carvão da antiga União Soviética, ANA e IBRAM (2006) enfatizam que as operações de mineração estão geralmente associadas a significativos volumes drenados, bem como bombeados. Os referidos autores também apontam que este é o caso das minas de carvão da Espanha, que apresentam um valor médio de 2,5 m³ de água bombeada para cada tonelada de carvão lavado. Já a mina de cobre de Mufulira, consome 5 m³ de água por tonelada de minério extraído (WIGHTMAN, 1978 *apud* ANA e IBRAM, 2006), enquanto em Konkola (Zâmbia) esta relação sofreu um aumento ao longo do tempo, de 30 a 90 m³ por tonelada (MULENGA, 1991 *apud* ANA e IBRAM, 2006).

Ainda é possível verificar que em diversas unidades de mineração ao redor do mundo é extraído mais água do que minério devido à grande disponibilidade de águas superficiais ou subterrâneas (ANA e IBRAM, 2006). Isso se torna necessário para que as operações de extração da matéria prima sejam possíveis. É o caso de minas na Espanha (Mina de Zinco de Reocín, Cantabria e Mina de Cobre Las Cruces em Sevilha e Minas de Ferro de Sierra Menera em Teruel e Guadalajara), Hungria (Minas de Carvão-Bauxita no entorno do Lago Balatón), EUA (Mina de Ouro de Betze-Post em Carlin Trend, Nevada), Brasil (Mina de Ferro Capão Xavier, em Minas Gerais) e Alemanha (Minas de Linhito de

Cottbus-North e Jänschwalde), reforçando assim a necessidade de planejamento a curto, a médio e a longo prazo, e a realização de estudos hidro-geológicos que permitam verificar a modelagem do fluxo de água, como forma de avaliação de cenários em termos de quantidade e qualidade da água (ANA e IBRAM, 2006).

Northey *et al.* (2016) destacam que, atualmente, os processamentos a úmido de minério são muito mais difundidos do que o processamento a seco, sendo que no processamento a úmido é possível uma maior eficiência no tratamento do minério, além da possibilidade de utilizar as propriedades químicas dos minerais ao realizar as etapas de separações. Nesse tipo de processamento são gerados os rejeitos da mineração, que podem ser armazenados em barragens, aterrados em minas ou empilhado a seco (DAVIES, 2011). Dentre esses, o armazenamento de rejeitos em estruturas de barragens ou depressões perto da área minerada é o tratamento mais comum utilizado globalmente.

Um estudo realizado pelos membros do Conselho de Minerais da Austrália (MCA, 2014), instituição que representa mais de 85% da produção de minerais na Austrália, destaca que as descargas de água nos locais de atividades de mineração são regulamentadas na maioria dos países e normalmente existem limites para os poluentes e cargas totais deste tipo de descarga.

O fato é que as atividades minerárias ao redor do mundo impactam os recursos hídricos de diferentes formas e estes impactos não devem ser considerados de forma isolada. Neste contexto, Northey *et al.* (2016) apontaram alguns exemplos, que se encontram sumarizados no Quadro 2.

Quadro 2 – Aplicações da água em mineradoras, riscos e seus impactos

Mina, País	Tipo	Produto	Clima	Descrição de uso, riscos ou impactos
Bowen Basin, Austrália	M.C.A.	Carvão	Semiárido	A inundação de minas de carvão ativas e abandonadas requer retirada emergencial e não planejada de água (QFCI, 2012 *apud* Northey *et al.*, 2016).
Gyama Valley, China	-	Cu, Pb, Zn	Semiárido	As minas que descarregam efluentes aumentaram as concentrações de Pb, Cr, Mo e Fe na água acima das diretrizes de consumo seguro em algumas partes do fluxo (Huang *et al*., 2010 *apud* Northey *et al.*, 2016).
Hitura, Finlândia	M.C.A., M.S.	Cu, Ni	Subártico	Zonas de águas subterrâneas contaminadas se desenvolveram, particularmente perto de locais de descarte de rejeitos (Heikkinen *et al*., 2002 *apud* Northey *et al.*, 2016).
Hope Downs, Austrália	M.C.A.	Fe	Árido	O regime efêmero de fluxo do riacho *Weeli Wolli* foi alterado, a jusante do ponto de descarga (Dogramaci *et al*., 2015 *apud* Northey *et al.*, 2016).
Las Luces, Chile	M.S.	Cu	Árido	A água do mar é usada diretamente na unidade industrial para tratar o minério proveniente de cinco minas subterrâneas.
Mount Lyell, Austrália	M.S.	Au, Cu	Temperado	A drenagem extensiva de rochas ácidas e a disposição de rejeitos nos rios degradaram significativamente o ecossistema. A chuva ácida causada pela fusão de minérios de sulfeto resultou em períodos prolongados de perda de vegetação.
Mount Polley, Canadá	M.C.A., M.S.	Ag, Au, Cu	Temperado	Falha na barragem de rejeitos levou ao transporte significativo de sedimentos para os sistemas de rios e lagos a jusante (Chambers, 2016 *apud* Northey *et al.*, 2016).
Ok Tedi, Papua Nova Guiné	M.C.A.	Au, Cu	Tropical	A parede da barragem de rejeitos desabou durante a construção fazendo com que os rejeitos fossem descartados diretamente no sistema fluvial com impactos extensos às comunidades a jusante e ecossistema local. Secas recentes impediram que as barcaças acessassem o local e interromperam a produção por sete meses (Bolton, 2009 *apud* Northey *et al.*, 2016).
Talvivaara, Finland	M.C.A.	Ni, Zn	Subártico	Uma quantidade excepcional de chuva contribuiu para acúmulo de água na mina. A mina sofreu vários vazamentos de rejeitos contaminados com metais e a concentração de sulfato do efluente excedeu os níveis permitidos, causando poluição severa no curso da água (Turpeinen e Rainio, 2013 *apud* Northey *et al.*, 2016).

Tipo: M.C.A. – Mina a Céu Aberto, M.S – Mina Subterrânea.
Fonte: Adaptado e traduzido de Northey *et al*. (2016)

A partir das informações descritas no Quadro 2, observa-se uma notória variabilidade significativa dos riscos e impactos nos recursos hídricos associados as atividades de mineração. Estes também mudam significativamente durante todas as etapas da vida útil das minas: estudo da instalação; desenvolvimento; operação; reabilitação; e pós-fechamento.

Nota-se também que os resultados desses riscos do uso d'água podem resultar em sérios problemas para as atividades de mineração, como a suspensão da produção devido à escassez de água. Em contrapartida, o excesso de água também pode ocasionar sérios impactos negativos como a alteração do regime de fluxo de um rio ou a redução dos níveis de aquíferos subterrâneos. Além disso, são gerados impactos externos a área de mineração, resultando em perturbações adversas aos ecossistemas e as comunidades locais.

O MCA (2014) evidencia que as empresas de mineração têm despendido esforços no desenvolvimento de sistemas para a contabilidade da água, fornecendo orientações aos órgãos de fiscalização com o propósito de esclarecer a quantidade, qualidade, fonte e as incertezas relacionadas a movimentação de água nos processos das atividades minerárias. Esta motivação está relacionada a complexidade das operações que podem ocorrer na mineração, no qual se torna difícil compreender como a água flui através de suas operações. Conforme visto anteriormente, em geral as atividades de mineração implicam na supressão de vegetação, exposição do solo a processos erosivos que provocam variações na quantidade e qualidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Northey *et al.* (2016) esclarecem que mesmo quando tentativas forem feitas para mapear e quantificar esses fluxos, podem permanecer incertezas significativas na magnitude exata desses fluxos e como eles se relacionam com eventos climáticos.

Portanto, conforme demonstrado pelos exemplos acima, a literatura atual mostra uma grande variação entre as estimativas do consumo de água em unidades mineradoras em várias partes do mundo. Além disso, nota-se que estas informações não estão consolidadas ou padronizadas, pois as mesmas se encontram dispersas em diversos relatórios públicos divulgados pelas empresas. Assim sendo, esforços que visam compilar esses dados podem contribuir para uma gestão hídrica mais eficiente na mineração (NORTHEY *et al*., 2016).

3.2 Gestão hídrica no Brasil e a Política Nacional de Recursos Hídricos

Gerir os recursos hídricos em um país rico em água doce como o Brasil, que possui cerca de 12% destes recursos no mundo, sempre foi, e sempre será um grande desafio. Apesar

da água continuamente ter sido motivo de disputa ao longo da história, em locais de alta disponibilidade a utilização racional deste recurso acabou sendo desconsiderada pela indústria e poder público, e, por isso, a água vem apresentando sinais de escassez nas últimas décadas. Por outro lado, a poluição, a falta de saneamento e os outros usos não sustentáveis deste recurso da natureza, contribuem ainda mais para a redução de sua disponibilidade no mundo. Por isso, a Constituição Federal do Brasil (1988) foi um marco histórico em termos da preocupação com a proteção ambiental. Em seu artigo 20 definiu que os recursos hídricos são bens da União:

> "(...) os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais;

Já em seu artigo 21, inciso XIX, e regulamentado pela Lei n° 9.433/97, declara que compete à União:

> "(...) instituir Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e definir critérios de outorga de direitos de seu uso;

O artigo 22 ainda conceitua que compete privativamente à União legislar sobre:

> "[...] IV - águas, energia, informática, telecomunicações e radiodifusão;

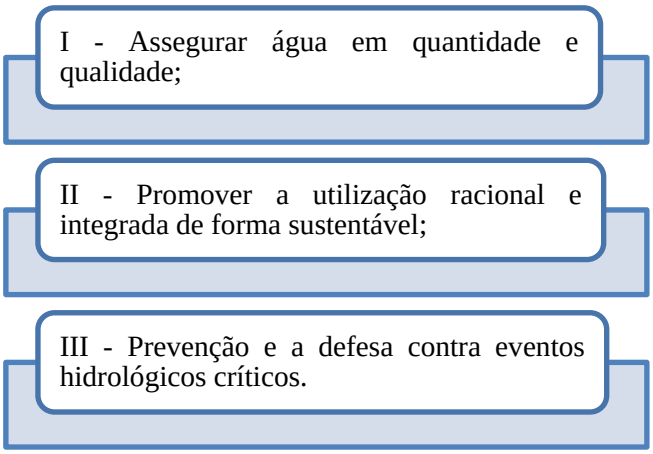
Fundamenta-se, a partir desse artigo, a enorme responsabilidade da União em ser o elemento central no aparelhamento da gestão dos recursos hídricos no país. Neste intuito, podemos pontuar os seguintes marcos legais responsáveis por fomentar a Política Nacional de Recursos Hídricos:

- Código de Águas de 1934 – águas públicas e particulares (DECRETO nº 24.643/1934);
- Constituição de 1988 – água é um bem público. Determina a instituição do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH);
- Lei nº 9.433/1997 – institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o SINGREH;
- Lei nº 9.984/2000 – cria a Agência Nacional de Águas (ANA);

- Lei nº 10.881/2004 – Dispõe sobre os contratos de gestão entre a ANA e entidades delegatárias;
- Decreto nº 4.613/2003 – Regulamenta o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH);
- Resoluções do CNRH;

A Lei n°9.433/1997, também conhecida como a Lei das águas, deu os principais parâmetros para a gestão de recursos hídricos no território brasileiro, com destaque para a Política Nacional dos Recursos Hídricos e o SINGREH. Em síntese podemos sumarizar o que a Política e o Sistema de Recursos Hídricos no Brasil têm como propósitos:

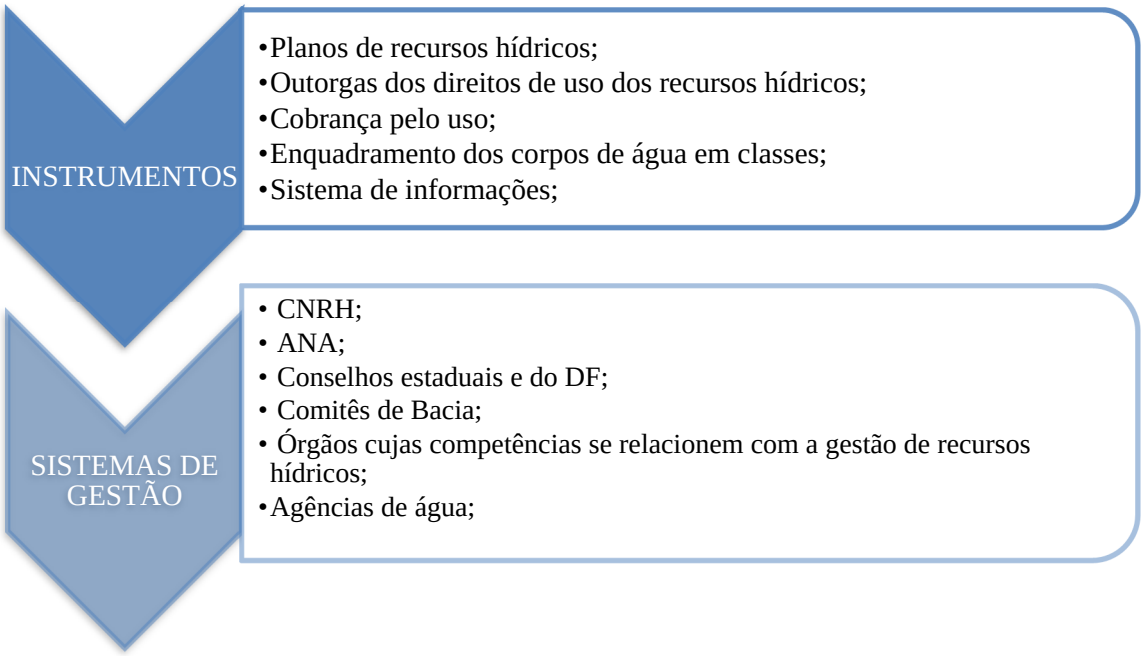
Figura 1- Objetivos da Política e o Sistema de Recursos Hídricos no Brasil.



Fonte: Elaborado pelo Autor com base em ANA (2020).

Percebe-se, portanto, a amplitude das propostas para a gestão dos recursos hídricos no Brasil; entretanto, colocá-las em prática, além de exigir um aparelhamento estruturado que permita que estes objetivos se convertam em ações concretas, necessita que responsabilidades sejam compartilhadas, no sentido de garantir que os recursos sejam distribuídos de forma igualitária. Para isso, foram criados os instrumentos e sistemas de gestão, os quais podem ser sintetizados na Figura 2.

Figura 2 - Instrumentos e Sistemas de Gestão da Política Recursos Hídricos no Brasil.



Fonte: Elaborado pelo Autor com base em ANA (2020).

O SINGREH, cuja composição é exposta na Figura 2, além de ser responsável por fazer todo essa coordenação da gestão integrada das águas, objetiva arbitrar os conflitos pelo uso da água. Estes conflitos, inerentes a um bem tão essencial quanto a água, ainda podem se tornar mais substanciais em locais de grandes densidades populacionais, como em áreas urbanas. Percebe-se, a partir destes fundamentos, o significativo papel dos Comitês de Bacias Hidrográficas em promover uma representação descentralizada e participativa, já que possuem em sua composição o poder público, usuários e sociedade civil. Assim, de acordo com a ANA (2020), a Política Nacional de Recursos Hídricos traz os seguintes fundamentos:

> I – A água é um bem de domínio público;
> II – A água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
> III – Em situações de escassez, usos prioritários: consumo humano e animal;
> IV – A gestão deve proporcionar o uso múltiplo das águas;
> V – A bacia hidrográfica é a unidade territorial de gestão;
> VI – A gestão deve ser descentralizada e participativa.

Estes fundamentos expressam como a gestão dos recursos hídricos, por meio da Política Nacional de Recursos Hídricos, apoia-se no planejamento de uso e aproveitamento das águas e na participação dos setores usuários na tomada de decisões. Ainda é possível notar que, diante de um cenário nacional no qual existem 28 domínios das águas (27 estados e o domínio Federal) com múltiplas regras e procedimentos de gestão, regulação e

operação, as instituições necessitam se encontrar bem estruturadas e capacitadas, pois cerca de 75% da superfície do Brasil é constituída por bacias interestaduais com recursos hídricos compartilhados, fazendo com que a gestão praticada em um domínio tenha consequência sobre outros.

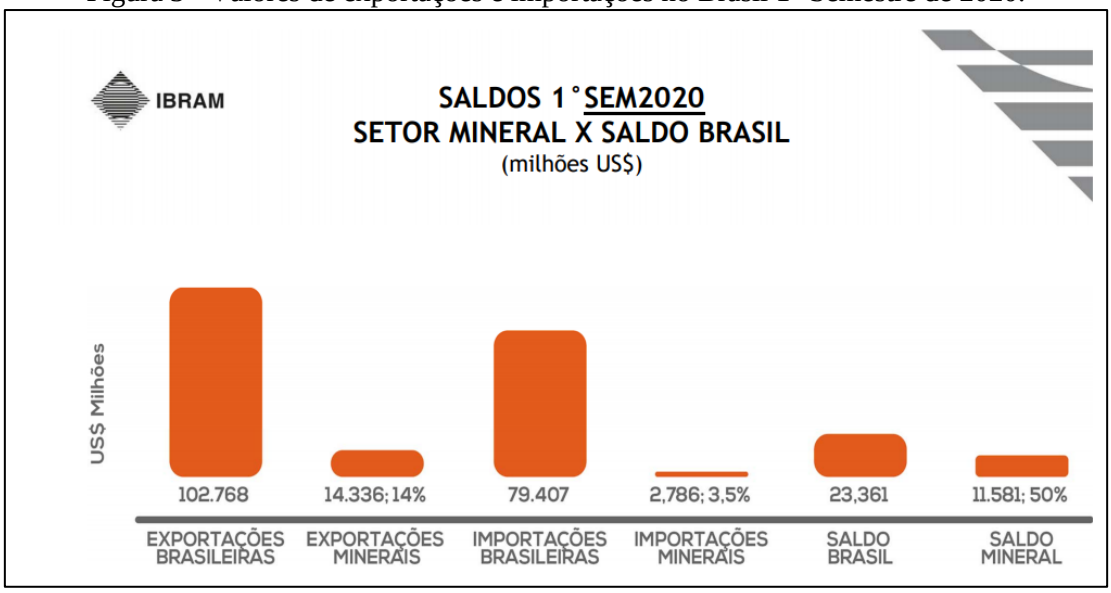
A partir disso, em um cenário no qual diversos atores se tornam responsáveis por fazer acontecer na prática as políticas públicas propostas, torna-se notório a necessidade de um esforço conjunto e coordenado entre governo e sociedade para que a implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos assegure uma boa governança na gestão das águas. Neste sentido, seja na oferta de bens e serviços ou no atendimento as necessidades básicas propiciadas pela água, torna-se imprescindível a compreensão por todos os atores de que essa boa gestão fundamentalmente busca assegurar a disponibilidade de água de qualidade às gerações presentes e futuras, oportunizando uma melhor qualidade de vida a sociedade como um todo.

3.3 Recursos hídricos no setor mineral brasileiro

A partir da definição dos sistemas de gestão da Política Nacional de Recursos Hídricos no Brasil, no qual os Comitês de Bacias Hidrográficas desempenham um relevante papel por meio de uma representação descentralizada e participativa entre o poder público, usuários e sociedade civil, torna-se de vital importância para o setor industrial, com sua efetiva participação nas discussões das deliberações sobre a gestão de água em sua região de atuação, negociando em um ambiente público, prevenir e atenuar conflitos, além do estabelecimento de mecanismos e valores da cobrança pelo uso da água.

Fischer (2018) destaca que o aumento dos fluxos de minérios no Brasil se dá nos anos pós-guerra, essencialmente devido à grande demanda internacional e a abundância de minério de ferro. Conforme visto no capítulo introdutório, o setor mineral tem grande importância econômica para o país. De acordo com o IBRAM (2020), a participação do setor mineral no PIB do Brasil é de aproximadamente 4%, incluindo a contribuição dos segmentos de extração e transformação mineral (metálicos e não metálicos), além de petróleo e gás. A Figura 3 apresenta os dados de exportações e importações do setor mineral no primeiro semestre de 2020 em comparação com outros no país.

Figura 3 - Valores de exportações e importações no Brasil 1° Semestre de 2020.



Fonte: IBRAM, 2020.

De acordo com o IBRAM (2020), apesar dos impactos negativos da pandemia do Corona vírus (Covid-19), que afetaram os principais mercados compradores dos minerais brasileiros no período, os dados apresentados pela Figura 3 demonstram que o setor mineral foi responsável por 14% do valor correspondente às exportações no país no período. O saldo Brasil, que corresponde à diferença entre o valor do que foi exportado e o valor do que foi importado, teve participação efetiva do setor mineral, já que correspondeu a 50% do saldo montante total.

Os materiais metálicos e não metálicos, resultantes da transformação de minérios, estão presentes em grande parte dos bens utilizados na vida moderna, como areia e brita para construção, aço, fertilizantes, carvão, cimento, vidro, argila para tijolos e materiais cerâmicos, entre outros. A água é um dos principais insumos deste tipo de exploração. “Sabe-se que a viabilidade técnica e econômica de uma lavra de minério está condicionada ao adequado conhecimento do contexto hidrológico desta” (ANA e IBRAM, 2006). Ainda de acordo com o IBRAM (2014), as interações com a água nos processos de mineração ocorrem nas fases de lavra, barragens, pilhas de estéril, rebaixamento do nível de água subterrânea, processamento mineral e a utilização da água como meio de transporte.

Segundo Fennel (2012), a gestão do uso da água é um dos maiores desafios para o desenvolvimento seguro e econômico na mineração. Assim, faz-se necessária uma

abordagem integrada e holística da gestão desse recurso, levando em consideração aspectos científicos, de engenharia e regulatórios, para garantir o desenvolvimento sustentável e o aproveitamento das oportunidades de inovação quanto ao seu uso. O Quadro 3 apresenta as aplicações da água em cada processo na mineração.

Quadro 3 – Interações da água em processos de mineração.

Processo	Utilização da água
LAVRA	Desmonte hidráulico, aspersão de pistas e praças para controle de emissão de poeira, lavagem dos equipamentos e de materiais.
BARRAGENS	Barragens de contenção de sedimentos: estruturas construídas com o objetivo de conter sedimentos carreados em períodos de chuva, garantindo a qualidade do efluente final. Barragens de rejeitos: bacia de acumulação dos rejeitos gerados nas instalações de beneficiamento de minério e a acumulação da água a ser reutilizada no processo industrial.
PILHAS DE ESTÉRIL	Pilhas de estéril podem causar interferência no escoamento superficial, que pode vir a gerar, dependendo do tamanho e da forma, pequenos desvios de água.
REBAIXAMENTO DO NÍVEL DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	Exploração das águas subterrâneas para a viabilização da lavra a céu aberto ou subterrânea.
PROCESSAMENTO MINERAL	Processo de flotação: processo físico-químico de superfície, usado na separação de minerais, que dá origem a formação de um agregado, partícula mineral e bolha de ar, o qual, em meio aquoso, flutua sob a forma de espuma. A composição química da água constitui um parâmetro de controle da flotação.
	Processo de lavagem: etapas do tratamento de minérios que demandam utilização de elevados volumes de água para limpeza do minério.
	Concentração gravítica: processo de separação que utiliza a proporção sólido/água para análise detalhada do balanço de água, bem como da densidade ótima de polpa para cada operação.
	Processos hidro metalúrgicos: processos onde há reações de dissolução do metal de interesse em meio ácido ou a dissolução em meio alcalino.
ÁGUA COMO MEIO DE TRANSPORTE	A água é o meio de transporte mais utilizado no processamento mineral. Assim, é usada de forma intensiva como meio de transporte nas mais variadas operações, tais como: na lavra como desmonte hidráulico, na lavagem de minério e nos processos de concentração a úmido.

Fonte: Adaptado de IBRAM (2014).

Percebe-se que a utilização do recurso hídrico está presente em quase todo o processo de extração de minérios. Destaca-se ainda, a utilização por empresas mineradoras, de água como meio de transporte, através dos “minerodutos”, abrindo um debate de possíveis impactos na oferta de água nos locais em que existe este tipo de operação, principalmente as captações que ocorrem na bacia hidrográfica do rio Doce no estado de Minas Gerais.

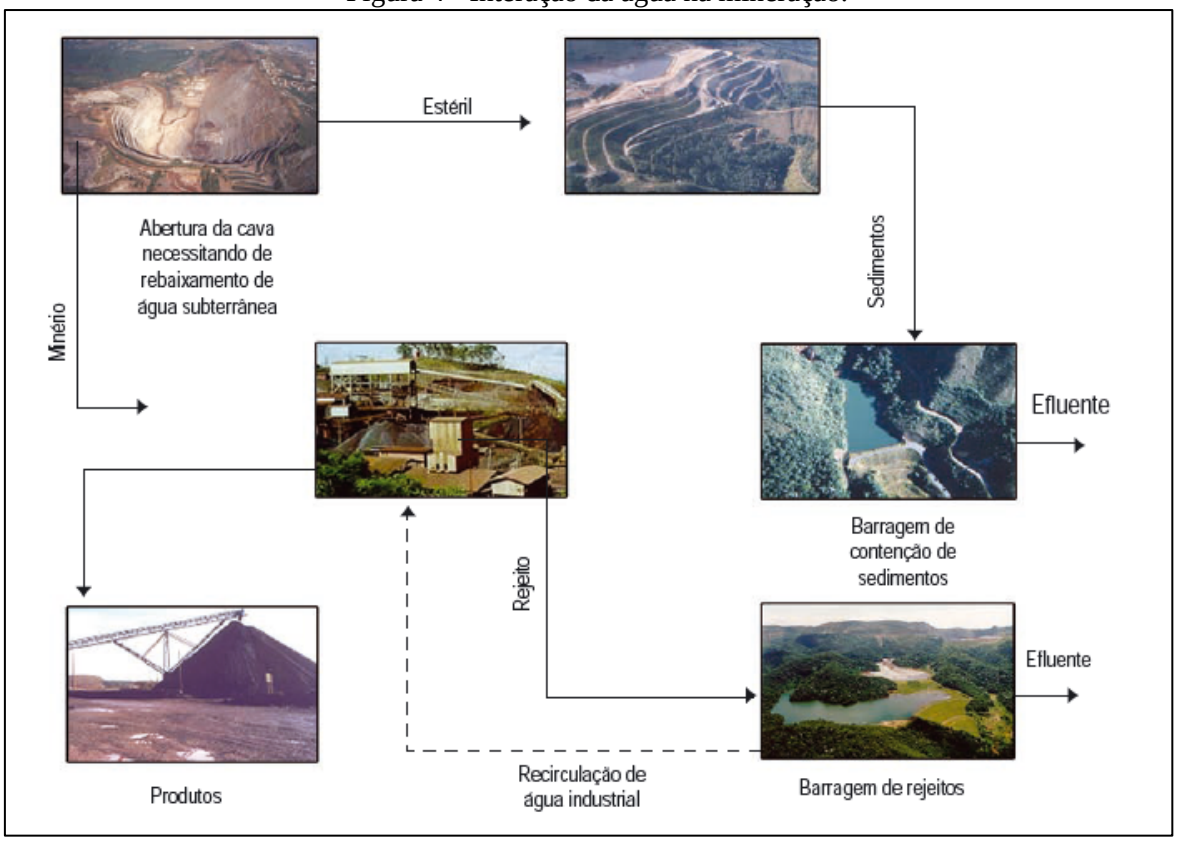
Fischer (2018) apresenta danos causados por minerodutos responsáveis por vazamentos de polpa de minério, afetando cursos d’água e o ecossistema. O autor dá ênfase ao mineroduto Minas-Rio, da empresa Anglo American, responsável por conectar jazidas de minério que antes estavam fora do alcance das infraestruturas tradicionais de exportação, como as ferrovias. Ainda de acordo com o autor, este mineroduto inaugurado em 2015, foi responsável por protestos contra as transgressões ao direito humano à água nos municípios afetados pelo empreendimento. Ele destaca ainda que, na década de 70, a grande demanda internacional por minério de ferro, associada a abundância do recurso no Brasil, se contrastava com o problema de transporte do produto, surgindo assim os minerodutos como uma alternativa viável de transporte deste tipo de produto.

Nesta perspectiva, IBRAM (2014) destaca que:

> “[...] sem acesso a água em volumes compatíveis com a produção, não é possível haver mineração em escala industrial. Está firmado, portanto, uma relação de interdependência entre água e a atividade minerária que, ao longo dos anos, tem evoluído muito em termos de sustentabilidade por iniciativa da mineração empresarial moderna”.

Por este ângulo, Northey *et al.* (2016) explicam que as grandes escalas de movimento de material podem resultar em alterações significativas nas vias naturais do fluxo de água. Esta interação da utilização da água entre estes diversos processos de mineração, ainda pode ser melhor entendida quando compreendemos que em uma extração de minérios, além dos produtos, ainda é gerado o chamado estéril (aquilo que não é o produto sendo explorado), além dos rejeitos provenientes de resíduos sólidos e água resultante do processo de extração. Um fluxograma simplificado de um processo de extração de minério de ferro até a disposição de seu produto final, é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Interação da água na mineração.



Fonte: ANA e IBRAM (2012).

A partir do fluxograma retratado na Figura 4, é possível observar que, desde a abertura da cava de um empreendimento para a retirada da matéria prima, existe a necessidade da realização do rebaixamento da água subterrânea. Nas atividades de mineração, após o material ser conduzido ao processo de beneficiamento, a água ainda se faz presente tanto no produto final, quanto no rejeito gerado por esta atividade. Além disso, a barragem de contenção de sedimentos tem papel fundamental na contenção de resíduos carreados em períodos de chuva.

Gunson *et al*. (2013) destacam o elevado consumo de água nas operações de moagem, peneiramento, eliminação da poeira, lavagem, bem como reagente de mistura. O processo de flotação, procedimento de separação frequentemente utilizado na mineração, de acordo com os autores, pode requerer, em média, de 1,9 a 3,0 m³ de água por tonelada de minério. Além disso, Bichueti *et al.* (2015) realçam a relevância do controle da qualidade das águas na mineração, com a efetiva gestão deste recurso por meio de métodos de prevenção, correção e tratamento de ativos e passivos. Nesta perspectiva, ANA e IBRAM (2006), afirmam que o êxito e a viabilidade das atividades de mineração possuem uma associação

direta à sua interação com a água, requerendo uma análise do contexto hidrológico e sua adequada interação nas fases de exploração, operação, fechamento e pós-fechamento das áreas de exploração mineral, tal como na fase em que se realiza o tratamento dos minérios. Muitos dos impactos da mineração na água podem ocorrer após o seu fechamento, após o seu abandono, ou até mesmo na reabilitação do local de uma mina (NORTHEY *et al*., 2016).

Além disso, a distribuição do uso e o déficit de água no futuro pode ser diferente do que é hoje devido a mudanças nos climas regionais e distribuições de uso da água (ALCAMO *et al*., 2007; KIGUCHI *et al.*, 2015).

Após o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, na unidade de Germano em Mariana (MG) em 5 de novembro de 2015, e o rompimento da Barragem I da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho (MG) em 25 de janeiro de 2019, tanto a sociedade quanto o poder público voltaram suas atenções ao ramo da mineração no Brasil. Neste contexto, destaca-se a atuação dos agentes que compõem o SINGREH, já que é o setor responsável pelo estabelecimento das políticas públicas de fomento à governança dos recursos hídricos necessárias à recuperação e ao equilíbrio ambiental e socioeconômico da região.

Em vista disso, a água se torna fundamental nos processos de mineração, sendo um recurso que deve ser utilizado com responsabilidade. O êxito no gerenciamento de recursos hídricos neste tipo de atividade se torna estreitamente associado ao desenvolvimento do conhecimento sobre esta temática. Neste sentido, verifica-se pelas fontes pesquisadas, a busca cada vez mais crescente da adoção de tecnologias nas diversas camadas produtivas do setor mineral brasileiro. Este esforço tem amparo em uma operação sustentável e com responsabilidade social nas comunidades que este tipo de atividade atua, mesmo que parte da sociedade não perceba os seus benefícios, pois está direta ou indiretamente fornecendo matérias primas para produtos como veículos, computadores, celulares, eletrodomésticos, próteses médicas, habitações, estradas, entre diversos outros produtos e serviços modernos.

3.4 Balanço hídrico na mineração

Como visto anteriormente, garantir a sustentabilidade e viabilidade dos processos de mineração a longo prazo, tem se tornado cada dia mais desafiador para as empresas mineradoras. As atividades de mineração são responsáveis por alterações profundas em sua área de exploração devido a suas operações, que promovem alterações das condições do local, e mesmo após a finalização de suas atividades, é necessária uma condição ambiental mínima que dê suporte as gerações futuras.

Neste sentido, a ANA (2019) indica como imprescindível a necessidade de se conhecer e quantificar a demanda hídrica vinculada ao processo produtivo, uma vez que a disponibilidade dos dados de medições das vazões, relacionadas a movimentação de água nas plantas industriais, é escassa. A indústria de mineração precisa ter seu balanço hídrico preciso, confiável e adaptável para avaliação de cenários quando se aponta para o uso da água eficiente (McPhail, 2005). Para ser capaz de sustentar suas operações, as minas precisam saber qual volume de água pode ser extraído ou é descarregado a partir dos recursos de água circundantes (Vermeulen, 2013).

Neste contexto, o balanço hídrico representa a aplicação do princípio da conservação de massas, quando a matéria em análise é a água. O conceito da conservação de massa estabelece que a quantidade de matéria que entra em um sistema é igual à quantidade de matéria que sai do mesmo, em um intervalo de tempo determinado ou para as condições médias de funcionamento das variáveis de entrada e saída.

Figura 5 - Fluxo da água no processo de mineração.

Fonte: Adaptado de Vale (2011).

3.4.1 Balanço hídrico na unidade industrial

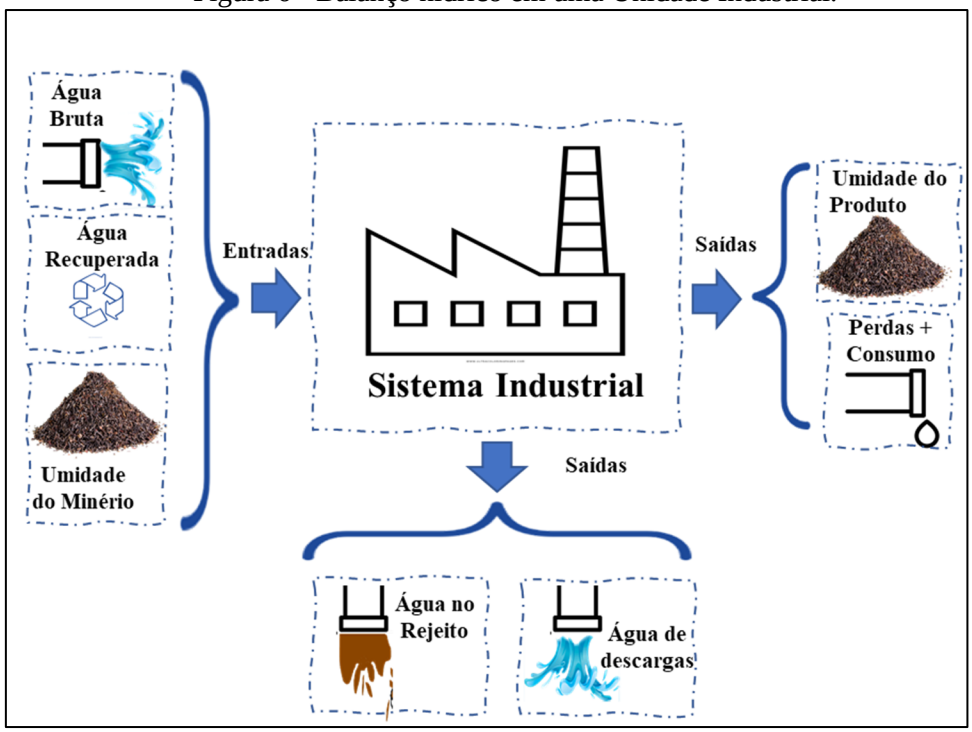
Em um processo de beneficiamento mineral, o conceito apresentado na Figura 5 se aplica para as condições médias das variáveis de entrada e de saída e para fluxos em regimes permanentes. De maneira ampla, em curtos intervalos de tempo podem ocorrer armazenamentos positivos ou negativos no sistema, representando-se a equação de balanço hídrico da seguinte forma:

$$\text{(FLUXO ENTRADA)} - \text{(FLUXO SAÍDA)} = \frac{\pm \Delta VOL}{\Delta t} \qquad (1)$$

Nessa equação (1), a grandeza ΔVOL representa a variação de volume do sistema, que pode ser positiva (+) ou negativa (-), no intervalo de tempo Δt considerado. Por ser um balanço de massa, as variáveis de entrada e de saída do sistema podem ser expressas diretamente em unidades de peso (ton.), em unidades de volume (m^3) ou de vazão (m^3/h).

A modelagem desse sistema pode ser compreendida por quaisquer componentes da Unidade Industrial que armazenem ou conduzam fluxos de água, tais como linhas adutoras, britadores, unidades de peneiramento, espessadores, unidades de concentração de minério e barragens de contenção de rejeitos. Como grande parte das unidades de beneficiamento de minério de ferro operam em regime permanente, o sistema pode apresentar diversos pontos de perdas, muitas vezes de difícil monitoramento. A Figura 6 representa um detalhamento destas variáveis que atuam em uma unidade industrial.

Figura 6 - Balanço hídrico em uma Unidade Industrial.



Fonte: Adaptado de Vale (2011).

A partir da Figura 6 é possível observar que no balanço hídrico em uma unidade industrial as entradas compreendem, além da água bruta e água recuperada, a umidade presente no ROM (*Run of Mine*). Já nas saídas, além da água presente nos processos de descargas e contidos nos rejeitos, é escoada pelas perdas e consumo, além da umidade presente no produto final. Conforme dito anteriormente, devido a operação em regime permanente de grande parte das unidades industriais, associada a dificuldade em medir estes elementos, pode ocorrer uma diferença entre as variáveis de entrada e saída, provocadas principalmente pelos componentes:

- Umidade do ROM – Umidade que vem no minério;
- Perdas – que podem decorrer de vazamentos e erros de medição;
- Consumo – Diversos pontos de “usos insignificantes” de água, sem medição na Unidade Industrial;
- Umidade do Produto – Umidade que vai no produto final, que pode ser estimada, mas que pode sofrer variações, dependendo de algum distúrbio no processo produtivo.

Neste sentido, é importante definir que, por mais que se tenham dispositivos capazes de contabilizar os dados de movimentação de água em tempo real em uma unidade industrial, os elementos citados acima poderão ainda apenas ser estimados.

3.4.2 Balanço hídrico em barragens

As empresas mineradoras, para a captação de água para as suas unidades de beneficiamento de minério de ferro, podem utilizar barragens que contenham somente água (identificadas nesta pesquisa por barragens de água); e barragens de rejeito, que recebem este tipo de material e fornecem água para as unidades (identificadas nessa pesquisa por barragens de contenção de rejeitos). O balanço hídrico de um reservatório de uma barragem de contenção de rejeitos, no qual ocorre a recuperação de água para reuso na unidade industrial, pode ser esquematizado pela Figura 7.

Figura 7 - Fluxo Hídrico em uma barragem de rejeitos de mineração.

Fonte: Vale (2011).

A componente de vazão afluente representa o fluxo natural da bacia hidrográfica, que aporta ao reservatório através dos cursos de água, enquanto a vazão defluente se compõe de todos os fluxos que saem do sistema (água recuperada e demais saídas, fluxo residual mínimo para jusante e percolação pelo maciço). As demais variáveis podem ser entendidas como:

- ÁGUA NO REJEITO – volume ou vazão de água contida na polpa do rejeito;
- DEMAIS ENTRADAS – quaisquer outras entradas de água decorrentes da operação da unidade industrial, tais como bombeamentos de reservatórios, perdas e descargas;

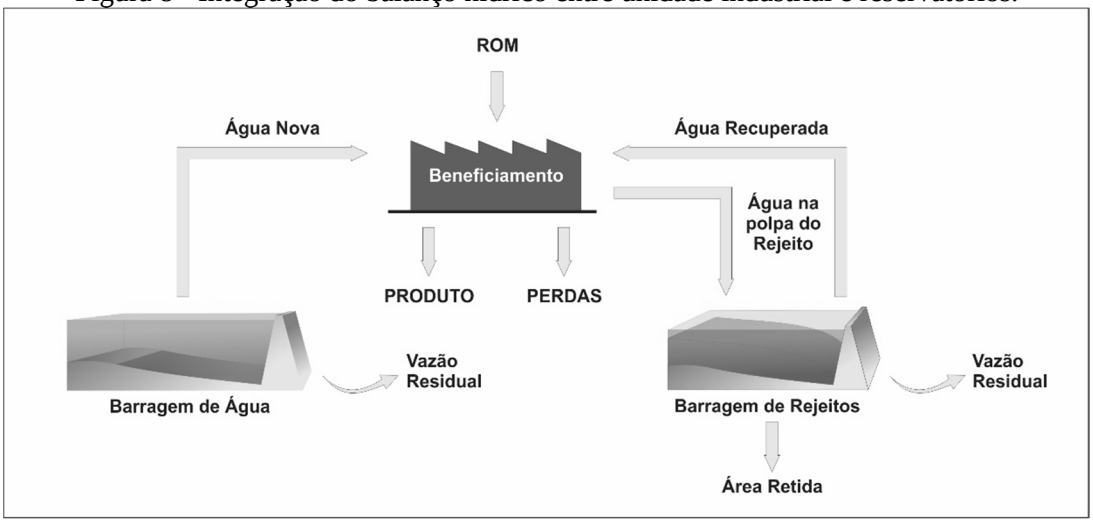
- PRECIPITAÇÃO – altura de chuva (mm) que precipita diretamente sobre a superfície líquida do reservatório. A transformação da altura de chuva para unidades volumétricas é feita pela multiplicação com a área da superfície do reservatório;
- ÁGUA RETIDA NO REJEITO – volume de água que fica retido nos vazios do rejeito;
- EVAPORAÇÃO – altura de água (mm) que se perde da superfície líquida do reservatório por evaporação. A transformação da altura de evaporação para unidades volumétricas é feita pela multiplicação com a área da superfície do reservatório;
- ÁGUA RECUPERADA – volume de água recirculada e retornada para reaproveitamento na unidade industrial;
- DEMAIS SAÍDAS – outras retiradas de água do reservatório para aproveitamento que não retornam para a unidade industrial (aspersão ou derivações para outras unidades);
- VERTIMENTO – volume de água liberado pelo vertedouro da barragem;
- FLUXO RESIDUAL – descarga mínima para jusante; e
- PERCOLAÇÃO – fluxo de água pelo maciço e fundação da barragem.

No balanço hídrico as componentes de precipitação e evaporação ainda atuam diretamente sobre a superfície do reservatório, com balanço positivo no período chuvoso e negativo na época de estiagem. Diferentemente da situação que ocorre nos reservatórios que abastecem as unidades industriais, a maioria das barragens é implantada em vales de cursos de água, aparecendo assim no balanço uma variável adicional, relacionada à vazão afluente natural da bacia hidrográfica. Estes valores, por estarem localizados em regiões no início de curso d'água, apresentam vazão com volumes de água pequenos ou insignificantes que, muitas vezes são de difícil quantificação. Também há que se considerar que o sistema opera quase sempre em regime não permanente, com efetivas variações de volume no reservatório.

3.4.3 Integração balanço hídrico: reservatórios e unidades industriais

A partir da definição das demandas das unidades industriais, e do estabelecimento das varáveis que atuam nas barragens que ofertam água a esse empreendimento, é necessário que estes componentes sejam integrados, como simbolizado na Figura 8.

Figura 8 - Integração do balanço hídrico entre unidade industrial e reservatórios.



Fonte: Adaptado de Vale (2011).

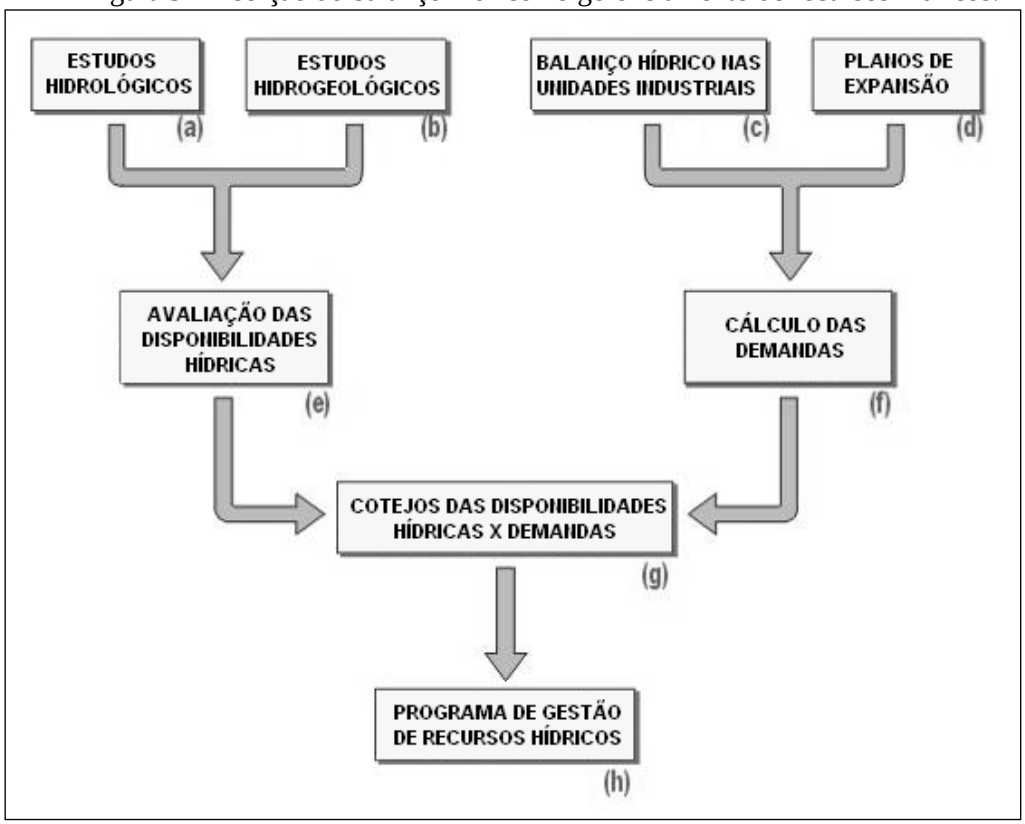
No fluxo apresentado na Figura 8, a “Água Nova” é a que se origina das barragens de água, já a “Água Recuperada” é aquela que recircula na barragem de contenção de rejeitos. O ROM, que é o minério a ser tratado, conforme visto anteriormente, contém certa umidade em sua composição, assim como o produto final.

Pode-se definir como demanda a soma de todos os fluxos de água que entram na unidade industrial e que são fundamentais para a sua operação. Ainda dentro da unidade industrial, o balanço negativo entre as entradas e as saídas representa o consumo efetivo que ocorre no sistema, geralmente associado às perdas por vazamentos, erros de medição, pequenos usos que não possuem medição, tais como sistemas de combate a incêndio ou lavagem de pátios e a umidade incorporada ao produto.

O balanço hídrico representa um elemento integrante do gerenciamento dos recursos hídricos de uma unidade industrial, por meio do qual são calculadas as demandas de água e os consumos a serem efetivamente outorgados (VALE, 2011).A Figura 9 representa um

exemplo de uma avaliação preliminar que pode auxiliar a determinar um programa de gestão hídrica em uma unidade industrial.

Figura 9 - Inserção do balanço hídrico no gerenciamento de recursos hídricos.



Fonte: Adaptado de Vale (2011).

Na Figura 9 observa-se que o balanço hídrico (c) permite a determinação das demandas do empreendimento (f) a serem comparadas com as disponibilidades hídricas (g). Estas, por sua vez, são avaliadas (e) com base em estudos hidrológicos (a) e hidrogeológicos (b), que fornecem as estimativas dos potenciais de explotação dos mananciais de superfície e subterrâneos.

Este fluxo possibilita que se tenha uma base inicial, que permite ao gestor estimar a movimentação de água na sua unidade industrial, e desse modo, propor ações para que este empreendimento tenha viabilidade, bem como dimensionar suas outorgas dentro do limite necessário. A proposta de uma gestão hídrica no empreendimento se torna mais fundamental ao considerarmos que, diferentemente de outras atividades em que se possa existir flexibilidade na escolha do local a instalar a unidade industrial, a mineração somente pode ocorrer no local em que exista a disponibilidade da matéria prima a ser

extraída, e somente a partir dessa localização, é necessário a busca de outros recursos necessários àquela atividade, sejam hídricos ou quaisquer outros.

Nos processos de beneficiamento de minério de ferro, as plantas operam em regime constante, recirculando a água entre as barragens de contenção de rejeito e o processo produtivo, consumindo grande quantidade de água. Nessa situação, surge um grande desafio em gerenciar todas essas variáveis apresentadas.

Conforme visto no primeiro capítulo deste trabalho, a automação industrial pode fornecer ferramentas para auxiliar na gestão de dados gerados em processos industriais. Northey *et al*. (2016) destacam que, mesmo em países abundantes em água, o potencial de propostas que visam a utilização de tecnologias que reduzem o consumo de água ou melhoram a qualidade da água, devem ser reconhecidas. Portanto, apresenta-se como uma alternativa viável a implantação de uma estrutura de equipamentos que tenha a capacidade de realizar rotinas automáticas, destinadas a realizar coletas de dados, armazenamento destas informações, e fornecimento de ferramentas gráficas visando auxiliar na análise da movimentação de água em uma unidade industrial.

3.5 Sistemas de Automação Industrial

Em seu estudo, ANA e IBRAM (2006), ressaltam as lacunas deixadas no desenvolvimento de tecnologias para a gestão de água:

> "Lamentavelmente, temos de constatar que, mesmo não sendo esses desafios nenhuma novidade para o minerador, as empresas mineradoras e de consultorias não assimilaram a grande experiência hoje existente, por não terem dedicado os esforços requeridos para a pesquisa e o desenvolvimento, ao suporem a formação e a atualização de seus técnicos um investimento considerável e por não ser habitual sua participação em encontros onde se apresentam e se discutem as inovações tecnológicas" (ANA e IBRAM, 2006).

De acordo com Lara *et al.* (1979), conforme citado por Fischer (2018), houve um substancial incremento no fluxo de minério no Brasil na década de 70, destacando-se inovações no setor mineral brasileiro, como a implantação de computadores nas operações, o avanço do controle da qualidade do minério transportado, e principalmente

a confiabilidade dos sistemas produtivos, benefícios estes promovidos pelas novas tecnologias implementadas.

Automação pode ser definida como um conjunto de métodos por meio dos quais se fundamentam mecanismos ativos capazes de atuar com uma ótima efetividade usando informações recebidas do ambiente sobre o qual atuam (SILVEIRA, 1998). Os sistemas automatizados de monitoramento e controle modernos são concebidos por um conjunto de dispositivos de campo, redes de comunicação, diversos tipos de equipamentos e computadores. Os componentes destes sistemas têm se tornado cada vez mais complexos e poderosos em relação ao processamento e variedade de padrões e integrações, pois a quantidade de marcas e de fornecedores destes produtos têm aumentado gradativamente com o avanço tecnológico (TAGLIANI, 2019). Na atualidade, os sistemas de automação têm sido empregados em diferentes segmentos industriais, como uma alternativa que visa reduzir custos e aumentar a produtividade.

Monaco (2013) observa que: “Para a Confederação Nacional da Indústria (CNI), o estímulo à inovação, que possui em um de seus pilares a automação, é a ferramenta fundamental para agregar valor e fazer a indústria brasileira tornar-se mais competitiva”. Todavia, em uma fase inicial de projeto, a automação traz a necessidade de investimentos iniciais elevados, associados a necessidade de uma mão-de-obra altamente qualificada, comparados aos sistemas tradicionais. Em contrapartida, a automação contribui com a conectividade dos diversos dispositivos e a geração de informações que possibilitam análises mais eficientes.

Geraes (2015) destaca que o acesso à informação em um ambiente industrial, por meio da aplicação de conhecimentos de alta tecnologia, possui um valor econômico, pois as pessoas desejam pagar por ela, mas que também possui um custo, pois gasta-se para produzi-la.

Com tudo isso, percebe-se a necessidade da estruturação destes sistemas de automação em um modelo que permita a visibilidade de todo o processo monitorado de uma forma clara, coerente e precisa. Para alcançar isso, a automação possui modelos de estruturação que tem como objetivo organizar de forma coordenada toda esta interação entre os dispositivos. O modelo que será utilizado para esta finalidade nesta pesquisa, é o de

estruturação hierárquica baseada no modelo CIM (*Computer Integrated Manufacturing*), ou Produção Integrada pelo Computador.

3.5.1 Estruturação dos sistemas de automação

O modelo de estruturação hierárquica baseada no modelo de Produção Integrada pelo Computador, é uma concepção desenvolvida no início dos anos 80 que se baseia no uso da tecnologia de informação como o meio de permitir a integração de dispositivos eletrônicos distribuídos em diferentes camadas. Tovar (1996) destaca que o CIM tem como um dos objetivos proporcionar mais agilidade e capacidade de reação aos seus processos, fazendo com que as empresas tenham uma melhor percepção sobre o seu estado geral. A visão de integração dos dispositivos de uma empresa em diferentes camadas, vem diretamente da adoção do CIM.

De acordo com Silveira (2008), os principais componentes do CIM são os seguintes:

- Mecanismos de armazenamento, recuperação, manipulação e apresentação de dados;
- Sensores em tempo real para detectar o estado atual e modificar processos;
- Algoritmos de processamento de dados.

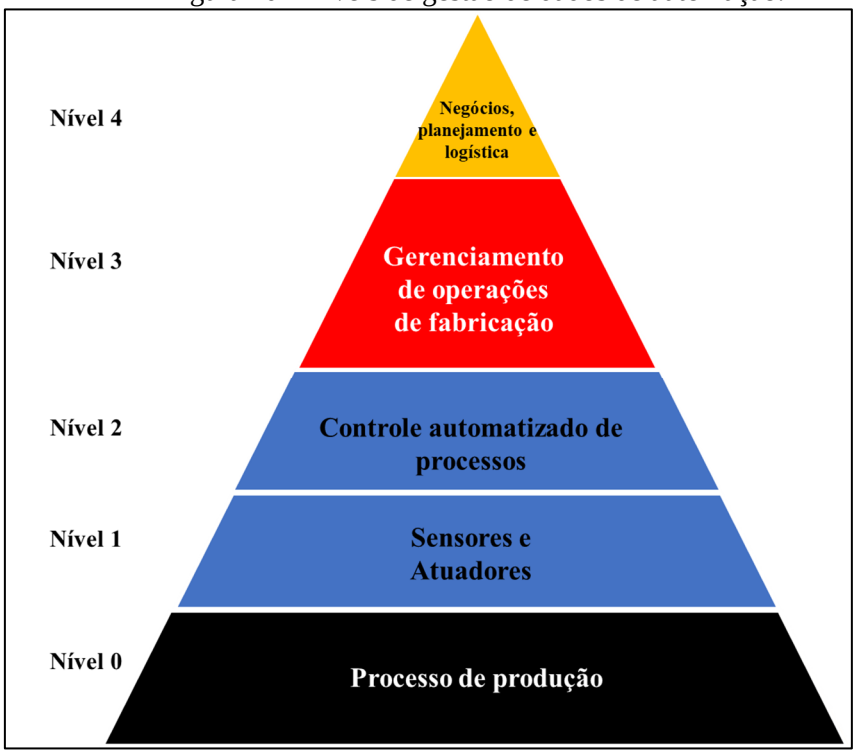
Apesar do CIM ser designado para descrever a completa automatização de uma unidade industrial, abordando também aspectos relacionados às atividades de finanças e pessoal, marketing e vendas, além de dados de produção, nesta pesquisa será utilizado o conceito da estruturação de dados proposta por este modelo, no qual as informações são transmitidas sem a necessidade do papel. Para isto, utiliza-se de estações de processamento capazes de tratar os dados de forma automática e simultânea, sendo controladas por um computador associado a redes de comunicações responsáveis por capturar dados em campo.

De acordo com Yamaguchi (2006), o CIM serviu de referência para o desenvolvimento de norma da ISA (*The Instrumentation, Systems and Automation Society*) - ISA-95, que padroniza a integração dos sistemas de gerenciamento das informações de uma empresa com os dispositivos no chão de fábrica. De acordo com ISA (2020), “a ISA-95 é uma

norma técnica que visa criar modelos abstratos e terminologias padrões para fazer a conexão e troca de informação entre sistemas empresariais e sistemas de operação da planta".

Geraes (2005) complementa que uma rede de comunicação entre computadores, em uma unidade industrial, deve combinar informações residentes na área corporativa com as de engenharia e projeto, e os equipamentos do chão-de-fábrica, interligando os diversos sistemas existentes, independente do porte e origem dos equipamentos. Para tanto, a norma ISA-95 indica que a organização é normalmente dividida em cinco níveis, que devem estar interligados, conforme Figura 10.

Figura 10 - Níveis de gestão de dados de automação.



Fonte: Traduzido de ISA (1995).

- NÍVEL 0 - caracterizado pelo processo industrial a ser monitorado;
- NÍVEL 1- caracterizado por instrumentos de campo industriais, tais como sensores e atuadores. Os sensores mais comuns, podem conter variáveis de vazão, temperatura, nível, pressão, densidade, entre outros. Uma característica deste nível é que existe um baixo volume de dados, porém com alta velocidade de mudanças;

- NÍVEL 2 – nível onde estão os elementos que recebem os dados dos sensores da camada 1, tais como CLP's (controladores lógico programáveis). Neste caso, os volumes de dados são maiores e os equipamentos possuem grande interação;
- NÍVEL 3 – nível onde se encontram os equipamentos de acompanhamento dos dados de campo, como softwares de supervisão, as interfaces homem-máquina (IHMs). Nesta camada, os dados são concentrados e transmitidos de forma cíclica;
- NÍVEL 4 – formado por informações que compõe os dados do negócio. Os dados neste nível são concentrados e a sua transmissão se dá em intervalos mais espaçados. Neste nível também se encontram os sistemas de manutenção, operação e dados gerenciais de uma empresa.

A partir da Figura 10 é possível notar, de forma simplificada, todos os níveis, abordagens e interações dos dispositivos em uma solução completa de automação industrial. A automação, parte integrante desse conjunto, deve fornecer ferramentas para a disponibilização da informação certa, no momento correto, atualizada com os dados de campo, no local certo, em um formato claro, e no dispositivo adequado; já que as tomadas de decisão devem ser feitas de uma forma mais rápida, seja ela por um usuário ou um sistema, tendo como base uma informação confiável. Nesta pesquisa, a aplicação dessa estrutura poderá ser interpretada por:

- Nível 0 – Unidade industrial de beneficiamento de minério de ferro;
- Nível 1 – Instrumentação industrial, composta por medidores de vazão, que são responsáveis pela quantificação do volume de água movimentado na unidade industrial;
- Nível 2 – Composto pelas interfaces que vão transmitir e receber os dados dos medidores; e
- Nível 3 – Composto pelo sistema de gestão, que irá apresentar os dados de forma gráfica aos usuários e criará um banco de dados para armazenamentos das informações.

Como os dados propostos por esta pesquisa são gerados em tempo real, auxiliando a operação da unidade industrial, não foi considerado o nível 4. Por meio de referências na literatura, os próximos subtópicos buscam apresentar os principais conceitos que

permitem compreender como se dá a interação entre estes quatro níveis com as diversas áreas que compõem a unidade industrial, e auxiliar no entendimento do modelo de gestão hídrica proposto por esta pesquisa.

3.5.2 Instrumentação Industrial

Starling (2003) define instrumentação como sendo "qualquer dispositivo (instrumento), ou conjunto de dispositivos, utilizado com a finalidade de se medir, indicar, registrar ou controlar as variáveis de um processo". A instrumentação industrial permite a aplicação de técnicas para medição e controle de grandezas que se manifestam nos diversos processos. Os instrumentos de campo, em um sistema de automação, são dispositivos responsáveis pelo monitoramento direto dos processos no campo. São os dispositivos de interface final com o processo de um sistema de automação.

De acordo com Pavani (2009), os dispositivos de aquisição de dados, responsáveis pela realização de controle de processos, enviam essas informações a um controlador, que gera sinais de comando para os atuadores. O autor ainda complementa que, nos processos em diferentes unidades industriais, existe a necessidade de controle de variáveis como pressão, nível, vazão, temperatura, pH, condutividade, e outras variáveis típicas para cada tipo de indústria. Esta pesquisa procurará esmiuçar os conceitos destinados a variável de vazão, já que a partir da medição desta variável, será possível realizar a quantificação de movimentação de água na unidade industrial.

3.5.2.1 Princípios de medição de vazão volumétrica para líquidos

Starling (2003) define que a vazão volumétrica é definida como sendo a quantidade em volume que escoa através de certa secção em um intervalo de tempo considerado. Para calcular este tempo e a pressão que isto ocorre é necessário um equipamento denominado "medidor de vazão".

Existe uma variedade de equipamentos disponíveis no mercado para medição de vazão de líquidos ou gases. As aplicações são inúmeras, como a medição de vazão de água em estações de tratamento e residências, até a medição de gases industriais e combustíveis,

estas com maior grau de complexidade. Emerson (2019) destaca que a escolha correta de um determinado instrumento para medição de vazão depende de vários fatores como:

- A exatidão desejada para a medição;
- Tipo de fluido: líquido ou gás, limpo ou sujo, número de fases, condutividade elétrica, transparência, etc.;
- Condições termodinâmicas: níveis de pressão e temperatura nos quais o medidor deve atuar no espaço físico disponível; e
- Custo do equipamento.

Ao consultar as literaturas técnicas, consolidou-se na Quadro 4 os principais métodos de medição, bem como sua principal recomendação de aplicação.

Quadro 4 – Princípios de medição de vazão de líquido e aplicações recomendadas.

Princípio Medição Vazão	**Aplicação Recomendada**
Coriolis	Óleos lubrificantes, diesel e reagentes
Eletromagnético	Água, polpa de minério, lamas e rejeito
Ultrassônico	Água com baixo percentual de sólidos
Vortex	GN, ar, vapor, CO_2, etc. Gases e vapor
Termal	Ar, CO_2, GN. Gases
Turbina	Água com baixo percentual de sólidos

Fonte: Adaptado pelo Autor com base em Endress Hauser (2020).

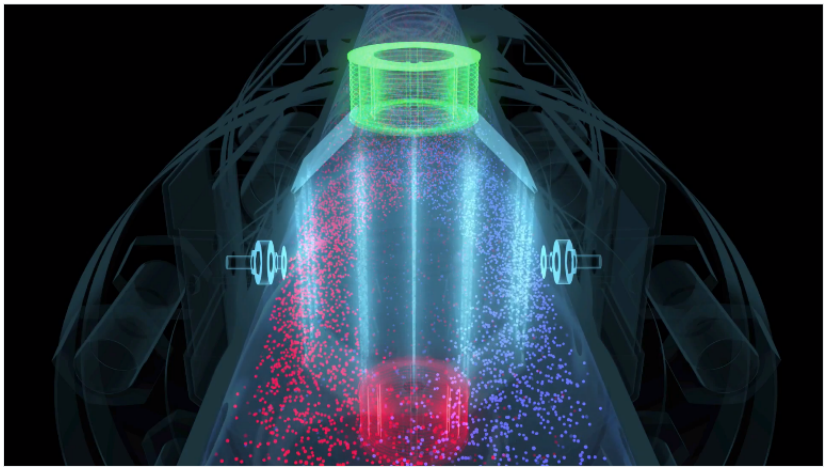
A partir dos dados consolidados no Quadro 4, é possível constatar que o princípio de vazão mais recomendado para a medição da movimentação de água em uma unidade mineradora, é o “eletromagnético”. Endress Hauser (2019) afirma que os medidores eletromagnéticos somente são aplicáveis a fluidos condutores elétricos e trazem como benefício a possibilidade de não interferirem no escoamento e não dependerem do conhecimento das propriedades do fluido, quer sejam termofísicas (viscosidade) ou termodinâmicas (massa específica, temperatura, pressão). Starling (2003) afirma que seu princípio de funcionamento é baseado no fato que o fluido se comporta como um condutor

elétrico em movimento, provocando uma alteração na densidade de fluxo eletromagnético, criada na seção de teste.

3.5.2.2 Medidor de vazão tipo eletromagnético

Segundo Emerson (2019), o princípio de medição do medidor de vazão eletromagnético é baseado na lei de indução de Faraday. Hessel, Freschi e Santos (2015) explicam que na lei de indução de Faraday, caso uma barra de metal se mova em um campo magnético, esta induz tensão elétrica. Esse princípio também governa a maneira como os medidores de vazão eletromagnéticos funcionam. Assim que as partículas eletricamente carregadas atravessam o campo magnético artificial gerado por duas bobinas de campo, uma tensão elétrica é induzida. De acordo com Endress Hauser (2019), essa tensão, gerada por dois eletrodos de medição, é diretamente proporcional a velocidade do fluxo e, portanto, ao volume do fluxo. A Figura 11, apresenta de forma didática, um detalhamento interno do funcionamento deste tipo de medidor, em uma situação típica de monitoramento de uma tubulação de água.

Figura 11 - Princípio de medição medidor de vazão eletromagnético.



Fonte: Endress Hauser (2019).

Percebe-se, na Figura 11, a movimentação de líquido que passa pelo interior do medidor, quando submetida a um sinal eletrônico por meio de dois sensores instalados nas laterais do equipamento. Conforme visto anteriormente, o líquido (água, por exemplo) por possuir a capacidade de conduzir o sinal elétrico mesmo em movimento, transmite o sinal entre os dois sensores, permitindo através da eletrônica interna, quantificar o fluxo que está se movimentando naquele momento em sua seção. Segundo Emerson Process (2019), o

princípio de medição eletromagnético é praticamente independente de pressão, densidade, temperatura e viscosidade do líquido a que é submetido a medição, e que mesmo fluidos com sólidos arrastados podem ser medidos (como lama ou rejeito, gerados na unidade industrial objeto desta pesquisa). Este mesmo autor, enumera as seguintes características dos medidores de vazão eletromagnéticos:

- Podem ser utilizados em tubulações de diâmetros nominais que variam de 2 a 300 polegadas;
- Não possuem partes móveis, facilitando sua instalação;
- Possuem custo reduzido para manutenção, já que é uma tecnologia bastante difundida;
- Alto grau de reprodutibilidade e estabilidade da medição a longo prazo, tornando as medições mais confiáveis;
- Variedade de protocolos de comunicação para transmissão dos dados medidos;
- Manutenção simplificada por meio de diagnósticos avançados, já que o próprio instrumento pode indicar uma descalibração.

Levando-se em conta que a unidade industrial de beneficiamento de minério de ferro, objeto desta pesquisa, possui um regime de produção de modo contínuo, ou seja, a produção não possui nenhum tipo de pausa ou interrupção (exceto as paradas por manutenção programada ou manutenção corretiva), equipamentos que permitam estabilidade de medição a longo prazo contribuem para a geração de dados hídricos mais precisos.

Emerson (2019) destaca que, em muitas aplicações industriais, estabilidade a longo prazo é um aspecto essencial na medição de fluxos. Endress Hauser (2019) complementa que os parâmetros de confiabilidade, custo-benefício e certificação de órgãos como a ISO / IEC 17025, obtidos por inspeções periódicas pelos organismos nacionais de calibração PTB (Alemanha), LNE (França), METAS (Suíça), NIST (EUA), NIM (China) e INMETRO (Brasil), são essenciais no atingimento da exatidão de uma medição, ou seja, a aptidão de um instrumento para dar respostas próximas ao valor verdadeiro da variável

que está sendo medida, ou a capacidade que o instrumento de medição tem de fornecer um resultado correto para ter validade técnica.

Conforme visto anteriormente, para ser capaz de monitorar os dispositivos de campo, estes equipamentos precisam ter a capacidade de transmitir suas informações a um equipamento capaz de traduzir estes dados e armazená-los.

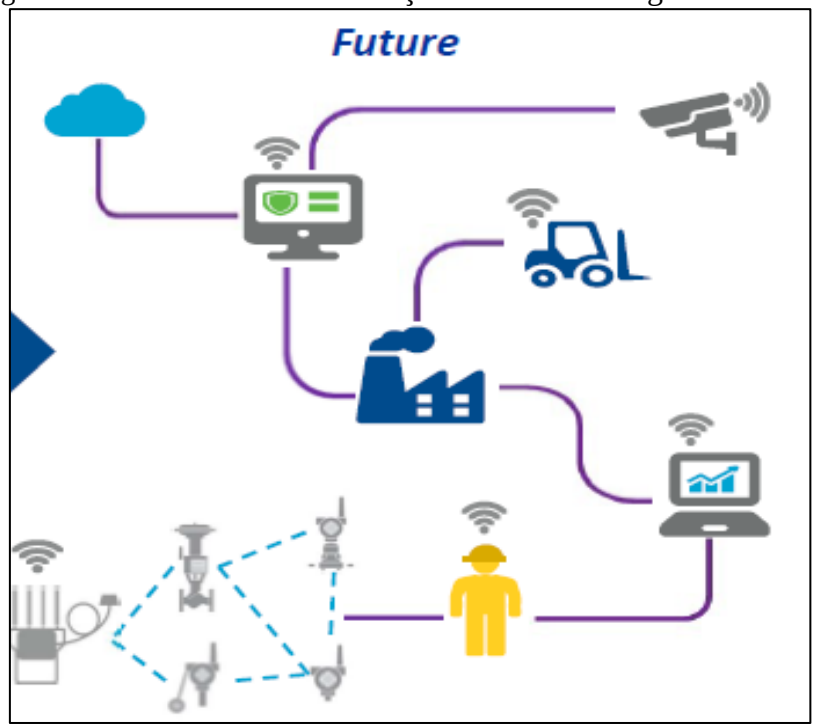
3.5.3 Transmissão de dados de instrumentação de campo

O meio de transmissão é o trajeto por onde são passadas as informações de uma estação de trabalho para outra em uma rede industrial. Esse meio de transmissão, conforme explica Albuquerque e Alexandria (2009), está relacionado à conexão física dos dispositivos em uma rede de dados. Esta conexão pode ser do tipo “sem fio” (ou *wireless*), feito por meio de ondas de rádio ou micro-ondas no ar, do tipo “por cabos”, feita por meio de sinais elétricos transmitidos por cabos, e do tipo “por fibras óticas”, realizada por meio de sinais luminosos transmitidos por fibra ótica.

Portanto, as redes industriais disponíveis no mercado têm como objetivo realizar a interligação entre os dispositivos entre as diferentes camadas. Cabe ressaltar que, conforme explicado por Pavani (2009), existe um grande esforço, por parte dos fabricantes de equipamentos de automação, na busca da interoperabilidade, ou seja, o desenvolvimento de equipamentos que funcionem em conjunto formando uma única rede, mesmo que seja de diferentes fabricantes. Apesar de parecer indiscutível essa necessidade, é possível perceber nas literaturas técnicas um grande debate nos organismos internacionais de padronização para solucionar esse tema.

Em muitas instalações de processo, a transmissão de dados entre dispositivos limita significativamente a quantidade de informações que podem ser transferidas. Contudo, os dispositivos de campo mais modernos são equipados com tecnologias que oferecem ao usuário uma vasta variedade de informações. A Figura 12 apresenta as possibilidades de integração destes equipamentos, uma visão futura da indústria 4.0.

Figura 12 - Estrutura de comunicação usando tecnologias sem fio.



Fonte: Emerson Process (2019).

O fluxo apresentado na Figura 12, representa os dispositivos integrados entre si por meio de tecnologias sem fio ou cabeada, no qual todas as informações da indústria podem ser acessadas em tempo real a partir de uma central de monitoramento.

A integração entre todos os equipamentos da planta se torna um fator importante a ser tratado, já que conforme percebido por esta pesquisa bibliográfica, os equipamentos distribuídos nos diversos níveis hierárquicos da estrutura de automação, devem operar de modo a se comunicar entre si. Surge a partir dessa concepção, a necessidade de agregar este tipo de solução tecnológica ao processo de gestão da água, tornando estas informações não menos importantes do que os demais dados em uma unidade industrial.

3.5.4 Equipamentos de aquisição de dados

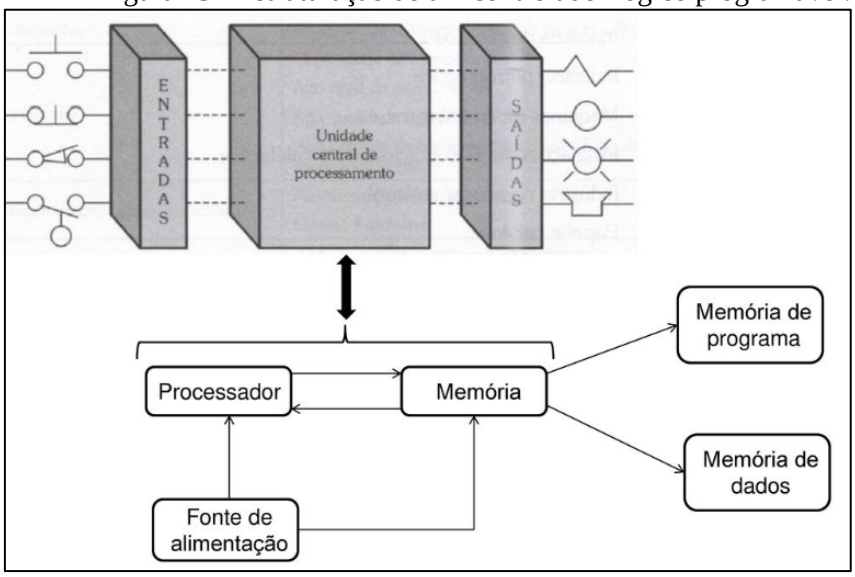
Pavani (2009) explica que “os instrumentos de medição, quando ligados a equipamentos de controle, permitem controlar e manter variáveis em condições mais adequadas/precisas do que se elas fossem controladas manualmente por um operador”. Percebe-se que isso se deve ao fato de que um operador não pode manter toda a sua atenção o tempo todo.

Para realizar este controle, é necessário equipamentos que realizam a aquisição destes dados de forma cíclica e automática.

De acordo com Geraes (2005), no final dos anos 60 os CLP's foram introduzidos com o intuito de eliminar os altos custos de manutenção e implantação de sistemas de controle automáticos. De acordo com o autor, basicamente todos os CLP's da atualidade têm sua arquitetura baseada em processadores encontrados nos microcomputadores domésticos. De acordo com Mamede (2001) "o Controlador Lógico Programável possibilita o comando de dispositivos ou máquinas de forma fácil e versátil, permitindo mudanças rápidas no modo de operação, por meio de programas dedicados arquivados em sua memória". De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o CLP trata-se de um dispositivo eletrônico digital com hardware e software compatíveis com segmentos industriais (ZANCAN, 2011).

Controladores programáveis são dispositivos eletrônicos que usam uma memória, a qual pode ser programada para armazenamento de instruções com diversas funções, destinados a comandar e monitorar processos industriais, por meio de módulos de entradas/saídas, analógicas ou digitais (ATOS, 2006). Os autores indicam que os controladores são o principal equipamento de um sistema de automação moderno, sendo responsável pela "inteligência" no controle direto do processo. Sua estrutura de funcionamento é apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Estruturação de um controlador lógico programável.



Fonte: Geraes (2015).

A Figura 13 representa as interfaces de conexões de um controlador programável, responsáveis por receber informações de sensores e pela realização do processamento destas informações. Os programas contidos nos CLP's realizam a aquisição de dados e possuem a capacidade de promover atuação no processo por meio de módulos de entradas e saídas, módulos de comunicação e módulos especiais.

Portanto, os CLP's podem ser compreendidos como o equipamento da camada 3, que recebem os dados dos medidores de campo e os envia para a camada 4, composta pelos softwares para monitoramento de dados.

3.5.5 Softwares para monitoramento de dados

Também chamado de "sistema supervisório", um software de monitoramento no ambiente de automação é constituído por programas complexos, baseados em vários bancos de dados, com uma grande quantidade de regras de consistência e relacionamento entre as tabelas desses bancos (YAMAGUSHI, 2006). Estes sistemas possuem telas gráficas que permitem a operação e monitoramento de equipamentos e sensores dos processos produtivos de uma unidade industrial.

De acordo com Geraes (2005), estes programas possuem a capacidade de realizar a aquisição de dados do processo por meio de drivers de comunicação, gerenciar a exibição das telas e realizar a gravação de eventos, alarmes e valores de variáveis analógicas nos bancos de dados históricos. Na perspectiva do CIM, apresentado no capítulo anterior, é necessário que os diversos sistemas da empresa se comuniquem entre si de forma mais eficaz. A informação digital, e não o papel ou o telefone, produzida pelos mais diversos sistemas e banco de informações, atua como elo de ligação e comunicação entre eles. Nas últimas duas décadas, houve uma absorção substancial de esquemas de gestão e relatórios de sustentabilidade corporativa na indústria de mineração (FONSECA *et al.*, 2014). Estes programas também permitem auxiliar a gestão desses dados.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção é subdividida em duas, pois inicialmente é caracterizada a área de estudo, tendo em vista os objetivos deste trabalho. Posteriormente, é apresentada uma metodologia contendo uma sequência de atividades a serem executadas para a realização de um diagnóstico da situação atual do monitoramento dos dados hídricos empregados no complexo minerador. Este diagnóstico é construído a partir de uma pesquisa e análise documental, complementada por um levantamento de informações em campo, junto as equipes responsáveis pelo controle hídrico da unidade industrial. Após a conclusão do diagnóstico, é feita uma análise dos recursos de automação já implementados e disponíveis para a automatização da coleta dos dados. Finalmente, pode-se colocar em operação um painel para o monitoramento de informações hídricas em tempo real.

4.1 Caracterização da área de estudo

Conforme visto no início desta pesquisa, unidades industriais que realizam o beneficiamento de algum tipo de minério, especialmente em larga escala, apresentam um significativo consumo de água em suas operações. Após ser notada uma lacuna na gestão de dados hídricos nas mineradoras do país, definiu-se por aplicar a proposta desta pesquisa em uma unidade industrial de grande porte em Minas Gerais, com o intuito de apresentar, de forma prática, as estratégias mais eficientes para gestão hídrica utilizando recursos de automação.

A caracterização da área de estudo, apresentada neste tópico, inicia-se com uma descrição da localização do complexo minerador, da localização deste na bacia hidrográfica, além das condições climáticas do local. Estes aspectos são significativos no desenvolvimento deste estudo.

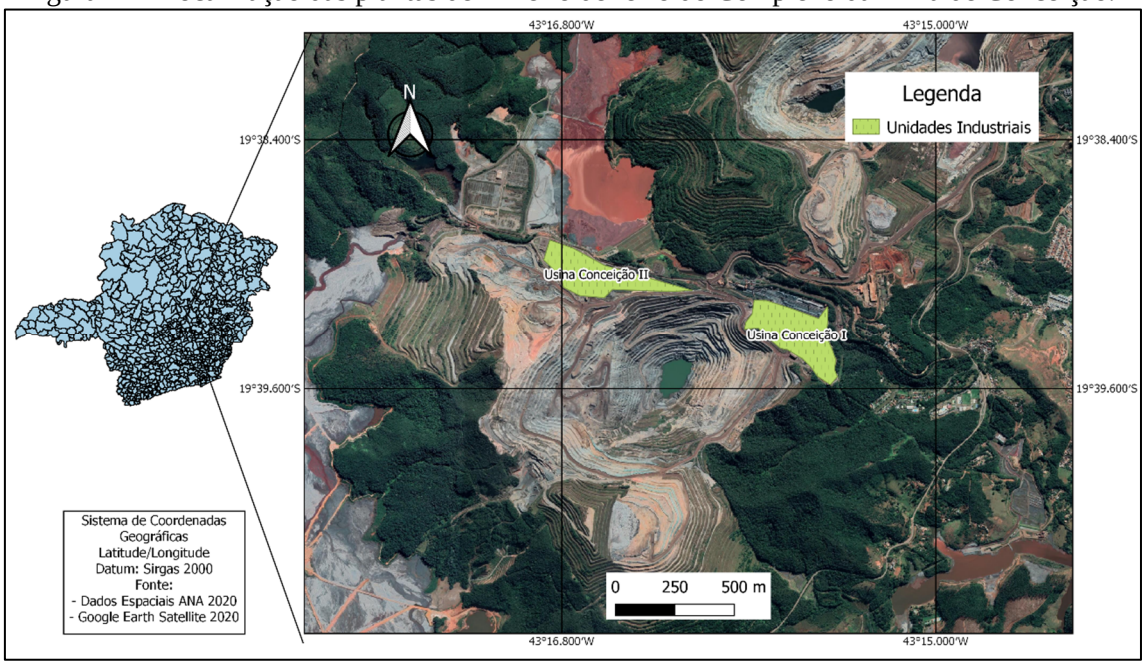
4.1.1 Localização do complexo minerador

A área de estudo deste trabalho está inserida na região do “Quadrilátero Ferrífero”, situado na porção centro-sudeste do Estado de Minas Gerais, mais precisamente no munícipio de Itabira. Neste município situa-se o tratamento de minério de ferro da Mina de Conceição, de responsabilidade da empresa Vale S/A. Neste complexo existe uma

etapa de captação de recursos hídricos, fundamental ao beneficiamento do minério de ferro de duas plantas industriais. Além da utilização da água no beneficiamento do minério de ferro, este recurso também é responsável por aspergir vias, e garantir a operação de extração de minério de ferro na área de lavra. Este recurso é proveniente das barragens de contenção de rejeito e da recirculação de água no processo interno.

O Complexo Minerador de Itabira totaliza uma produção anual de cerca de 30 milhões de toneladas métricas de produto de minério de ferro (Vale, 2017), e é composto por três plantas de beneficiamento, denominadas Conceição I, Conceição II e Cauê. Este estudo é direcionado ao processo de captação de água das plantas instaladas na Mina de Conceição, devido a integração de seus processos produtivos e a proximidade geográfica. A Figura 14 apresenta a localização destas plantas de beneficiamento de minério de ferro no estado de Minas Gerais.

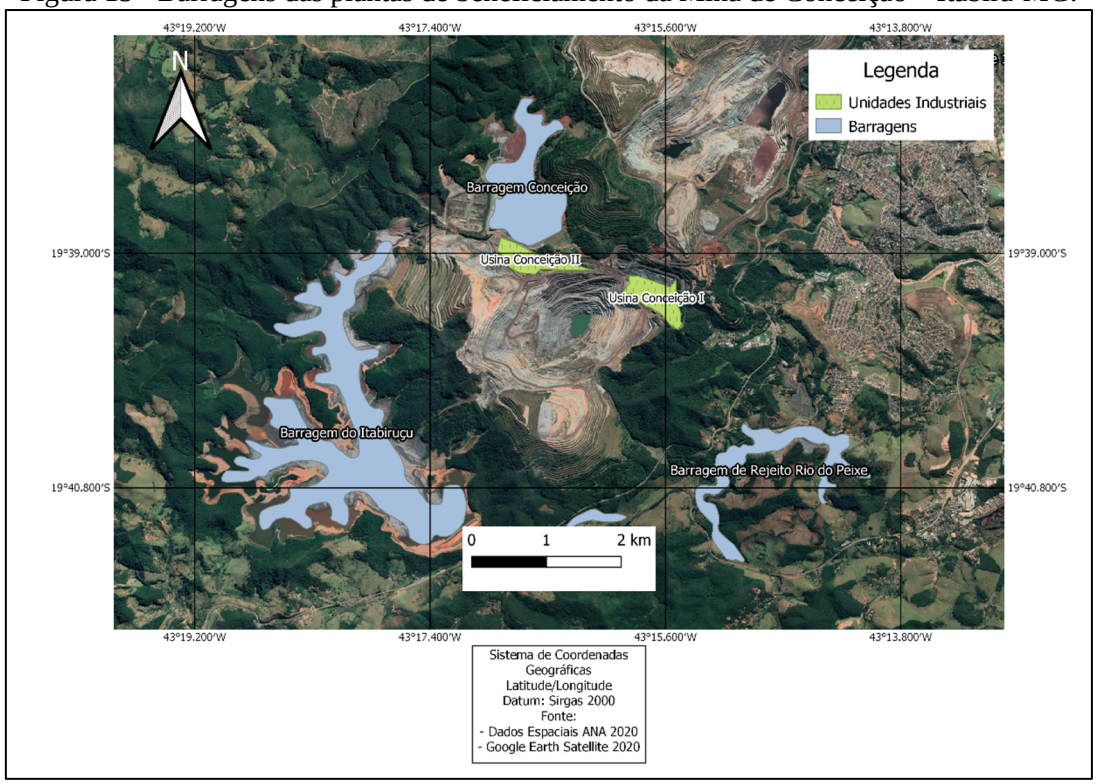
Figura 14 - Localização das plantas de minério de ferro do Complexo da Mina de Conceição.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

No Complexo Minerador da Mina de Conceição, são utilizadas bombas submersíveis de alta potência acopladas em balsas. Estes equipamentos, submergidos em três barragens, denominadas Barragem de Conceição, Barragem do Itabiruçu e Barragem de rio de Peixe, realizam o bombeamento da água aos reservatórios das unidades de produção. A Figura 15 apresenta as unidades de beneficiamento Conceição I e Conceição II e suas respectivas barragens de contenção, captação e recirculação de água.

Figura 15 - Barragens das plantas de beneficiamento da Mina de Conceição – Itabira-MG.



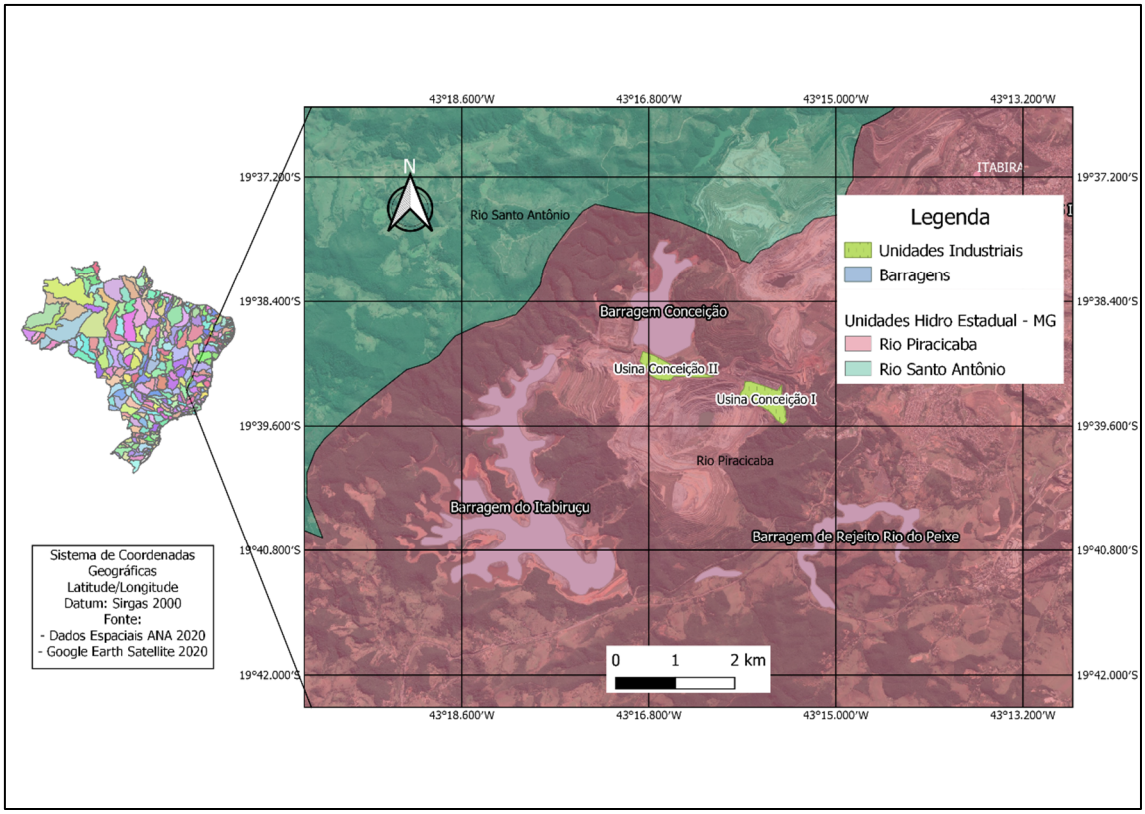
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Conforme descrito anteriormente, a água captada e direcionada aos tanques de abastecimentos das plantas Conceição I e Conceição II é utilizada nos processos internos de produção de minério de ferro. Parte desta água é despejada a montante das barragens em forma de rejeito. Este ciclo é chamado de recirculação de água, e estima-se que 80% da água captada retorna como rejeito a barragem. Até antes da realização desta pesquisa não existia uma instrumentação em tempo real, capaz de monitorar todos os dados hídricos presentes nesta movimentação de água.

4.1.2 Localização na bacia hidrográfica

Os principais reservatórios que abastecem o complexo minerador, estão inseridos nos limites da bacia do rio Piracicaba, conforme a Figura 16.

Figura 16 – Localização das Barragens da Mina de Conceição – Itabira-MG.

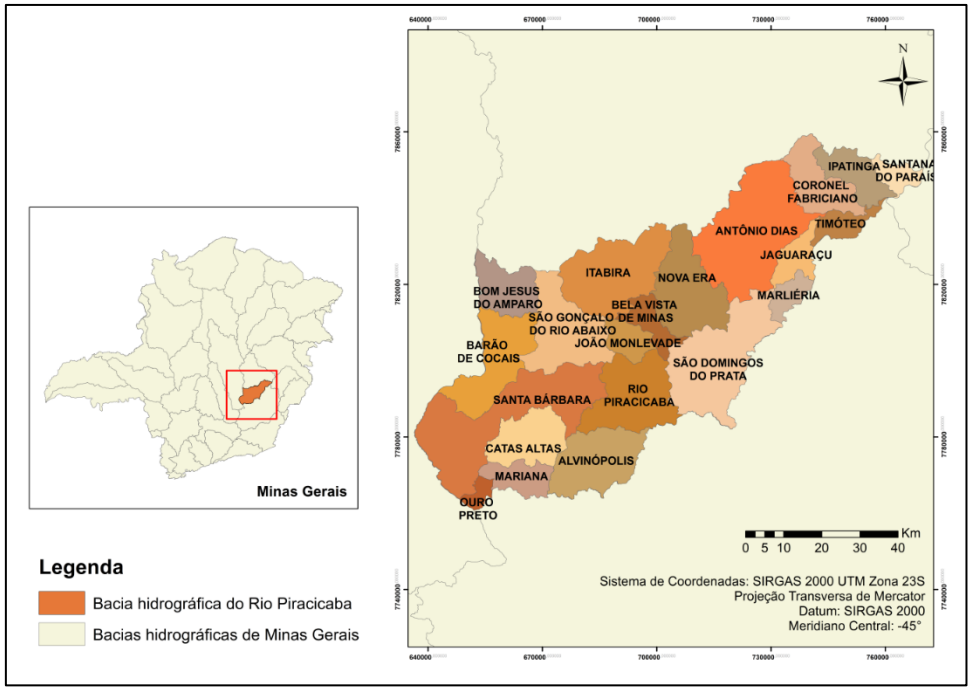


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A bacia hidrográfica do rio Piracicaba apresenta área de drenagem de 5.465,38 km². O principal curso d'água da bacia é o rio Piracicaba, que nasce no município de Ouro Preto-MG, a 1.680 m de altitude (ENGECORPS, 2015).

A bacia é composta por 21 municípios, conforme apresentado na Figura 15, contando com 17 sedes dentro de seus limites. É a mais populosa da bacia do rio Doce que, segundo o IBGE, no ano de 2010, apresentava mais de 761 mil habitantes, sendo cerca de 95% destes residentes na área urbana e o restante na zona rural (IGAM, 2019). Pertence ao Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba (UPGRH DO2), que foi criado pelo Decreto Estadual nº 40.929, de 16/02/2000 (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010).

Figura 17 - Municípios integrantes da Bacia do Rio Piracicaba.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A região da bacia hidrográfica do rio Piracicaba abriga o maior complexo siderúrgico da América Latina, sendo as maiores indústrias desse setor: a Usiminas, Aperam South America, Gerdau Aços Longos e ArcelorMittal Aços Longos (DEPEC, 2019).

A região também abriga grandes empresas de mineração, dentre elas a Vale S.A. Além disso, há empresas de reflorestamento que cultivam eucalipto para fornecimento de matéria-prima para as indústrias de celulose, como é o caso da Cenibra. Portanto, a região é uma das principais responsáveis pelas exportações de minério de ferro, aço e celulose, no Brasil (ECOPLAN-LUME, 2010).

Os municípios de Coronel Fabriciano, Ipatinga, Itabira, João Monlevade, Mariana, Ouro Preto, São Gonçalo do Rio Abaixo e Timóteo apresentam os maiores valores de PIB da bacia. Eles concentram principalmente indústrias de extração mineral e siderurgia em seu território.

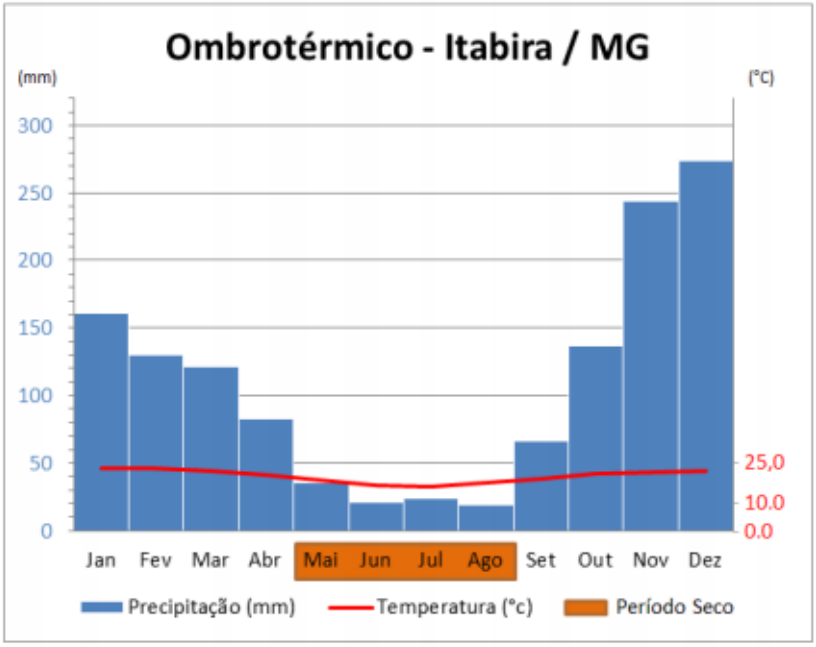
Salienta-se que essas atividades são diretamente dependentes da disponibilidade hídrica para o seu desenvolvimento, assim, a gestão dos recursos hídricos para todos os usos na bacia são de fundamental importância para o atendimento de todas as demandas e garantia da continuidade do desenvolvimento dessas atividades tão significativas para a região.

4.1.3 Condições climáticas do local

Segundo a Prefeitura do Município de Itabira (PMI, 2018), o clima do município é Cwa, de acordo com a classificação climática de Köppen e Geiger, possuindo duas estações bem definidas, sendo a primeira quente e úmida, ocorrendo na primavera e no verão, e outra seca e fria, de ocorrência nos meses de outono e inverno. A temperatura máxima anual é de 23,1°C e a temperatura mínima anual é de 17,0°C, com índice médio pluviométrico anual de 1.471 mm.

Ainda de acordo com a PMI (2015), os meses de junho e julho são os mais frios, podendo ocorrer baixas temperaturas em vales isolados da região. O déficit hídrico do município ocorre nas estações de outono e de inverno, correspondentes aos meses de maio, junho, julho e agosto, sendo a precipitação próximo a 20 mm/mês neste período, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Média mensal de precipitação (Normais Climatológicas de 1961-1990) e temperatura (Normais Climatológicas de 1931-1960) – INMET.



Fonte: PMI (2015).

A partir dos dados apresentados é possível constatar que, a partir do mês de outubro a precipitação se intensifica, apresentando um maior índice no mês de dezembro, com uma média mensal superior a 250 mm. O verão é caracterizado como chuvoso, com a precipitação elevada até o mês de março, em torno de 120 mm por mês.

A PMI (2015) ainda destaca que não ocorre uma variação superior a 10% de umidade relativa entre os meses mais chuvosos e os mais secos no município, conservando-se a umidade relativa do ar próximo a 80%.

4.2 Metodologia

A partir da determinação dos objetivos deste trabalho, surgiu a necessidade de elaborar uma metodologia que permitisse em um primeiro momento diagnosticar a estratégia de gestão hídrica na unidade industrial para um melhor entendimento, e posteriormente elaborar um sequenciamento composto por fases para a implantação do sistema de monitoramento em tempo real.

4.2.1 Diagnóstico do controle dos dados hídricos na unidade industrial

Nesta fase, se propõe realizar o entendimento dos atuais controles de dados hídricos realizados no empreendimento através das seguintes técnicas:

- Levantamento de dados históricos de informações hídricas – restringe-se a pesquisa de documentos e dados disponíveis armazenados em arquivos físicos, mídias digitais, entre outras, relatando os principais dados de captação de água, dados de outorga, fluxograma de processos e histórico de dados.

- Pesquisa de campo – Etapa no qual são levantadas informações como modificações em tubulações, alteração de processos, controle de dados hídricos da equipe que porventura não estejam documentados junto as equipes de manutenção e operação. Nesta fase também são consideradas as ponderações dos profissionais, utilizando o seu conhecimento especializado para apontar as limitações da gestão hídrica existente.

4.2.2 Tecnologias de automação existentes na unidade industrial

Nesta fase, é necessário identificar os principais recursos de automação que possivelmente a unidade industrial possa já estar utilizando na gestão dos dados hídricos ou até mesmo identificar tecnologias de automação empregadas em outros processos do empreendimento, e que possam ser replicadas aos processos de controle dos dados de movimentação de água na unidade industrial.

Para isso, conforme retratado no referencial teórico desta pesquisa, quatro categorias devem ser consideradas para a implantação de um sistema de monitoramento de gestão hídrica em tempo real:

I. Instrumentos de campo – deve-se identificar os equipamentos em campo que realizam as medições de dados hídricos, reconhecer o princípio de medição destes equipamentos, a periodicidade da geração do dado, as unidades de medida disponíveis e, os parâmetros de calibração à disposição;

II. Transmissão das informações – reconhecer se os dispositivos permitem a transmissão dos dados em tempo real, qual protocolo o equipamento utiliza, verificar se o protocolo é compatível com o equipamento que recebe os dados, certificar o meio físico de transmissão desses dados e, garantir que os dados sejam transmitidos em tempo real;

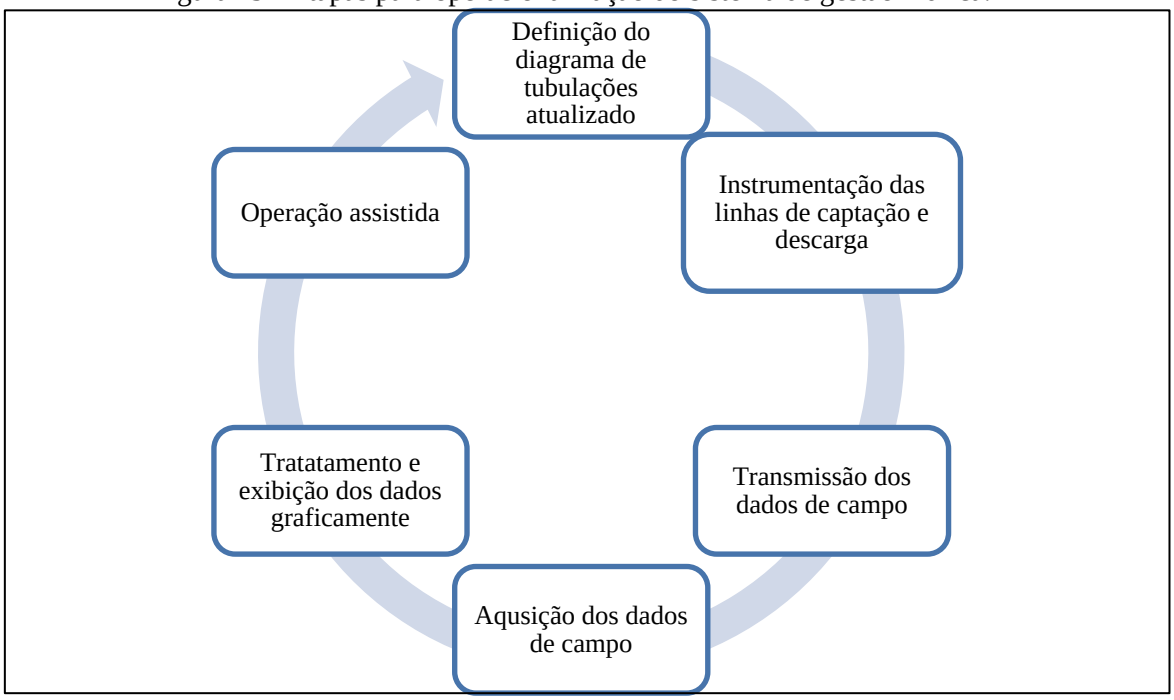
III. Aquisição e interpretação dos dados – identificar a existência de algum sistema que tenha a capacidade de receber os dados dos instrumentos de campo, verificar se o sistema tem a capacidade de realizar cálculos matemáticos para a consolidação dos dados;

IV. Saída gráfica – verificar a capacidade do sistema de receber informações do equipamento que coleta os dados de campo, e se possui capacidade de apresentar os dados graficamente em tempo real.

4.2.3 Metodologia proposta neste trabalho para o monitoramento de informações hídricas em tempo real

A partir da associação entre as informações apresentadas no referencial deste trabalho e dos resultados que foram obtidos com os diagnósticos (descritos anteriormente), foi possível elaborar um sequenciamento de atividades para implantação de um sistema de monitoramento em tempo real, composto por dados de movimentação de água na unidade industrial. A proposta é constituída por seis etapas apresentadas a seguir.

Figura 19 - Etapas para operacionalização do sistema de gestão hídrica.



Fonte: Autor deste estudo (2020).

1. **Definição do diagrama de tubulações atualizado:** Consiste na etapa de realizar o mapeamento em campo e, posteriormente, a documentação do diagrama de tubulações, indicando locais de captação e despejo de todos fluxos hídricos a serem monitorados. Qualquer alteração desse fluxo, deve ser atualizada e contemplada no sistema de gestão, considerando novas rotas, e revisando cálculos.

2. **Instrumentação das linhas de captação e descarga:** Consiste na implantação de medidores capazes de contabilizar os volumes captados e transmitir os dados em tempo real ao equipamento de coleta de dados. Esta etapa também consiste na verificação da efetividade da calibração dos instrumentos, e aferição dos dados em campo.

3. **Transmissão dos dados de campo:** Consiste na definição da forma com que será realizada a conexão entre os dados de campo e o sistema de recepção dos dados. Nesta fase, devem ser observados os protocolos de comunicação nas redes de transmissão de dados e o meio físico de transmissão, podendo ser com ou sem fio.

4. **Aquisição dos dados de campo:** Consiste na utilização de um equipamento capaz de receber os dados de campo, os traduzir e os enviar para a plataforma computacional.

5. **Tratamento e exibição dos dados graficamente:** Consiste na definição do software que irá receber os dados da camada anterior, realizar os cálculos de ritmos, volumes instantâneos, volumes totais, e outros, e por fim, disponibilizar estas informações aos usuários de forma gráfica, com suas respectivas unidades de engenharia.

6. **Operação assistida:** Consiste na etapa de verificação do comportamento das variáveis monitoradas, realização de ajustes nos parâmetros e validação do modelo.

É esperado que esta sistemática também forneça subsídios para aumentar o controle sobre os volumes outorgados, já que em todas as unidades de extração mineral, a água aparece como um recurso natural que interfere com as atividades fins, podendo afetar as captações para o consumo humano, para o beneficiamento de minério ou para umectação de áreas. A partir desta metodologia, pretende-se também disponibilizar uma ferramenta que forneça subsídios para checar a eficiência de outros sistemas automatizados de monitoramento hídrico implantado em outras unidades industriais.

5. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a realização da etapa de diagnóstico proposta e explicada na seção anterior. A partir disso, foi possível identificar uma série de informações e controles paralelos de dados para gestão hídrica que geram um grau de incerteza nos dados. Alguns destes eram controlados manualmente e se encontravam em distintas planilhas de Excel, com leituras realizadas em diferentes bases de tempo. Certas leituras eram feitas diariamente, outras semanais e outras eram geradas em tempo real, por meio de algum sistema de automação já implantado. Não existia um banco de dados centralizado, reunindo todos os dados. Por isso, são apresentados nesta seção os resultados deste trabalho, que permitiram remediar estas questões, que dificultavam a realização de uma gestão hídrica eficaz no complexo minerador.

5.1 Diagnóstico do controle dos dados hídricos empregados na Unidade Industrial

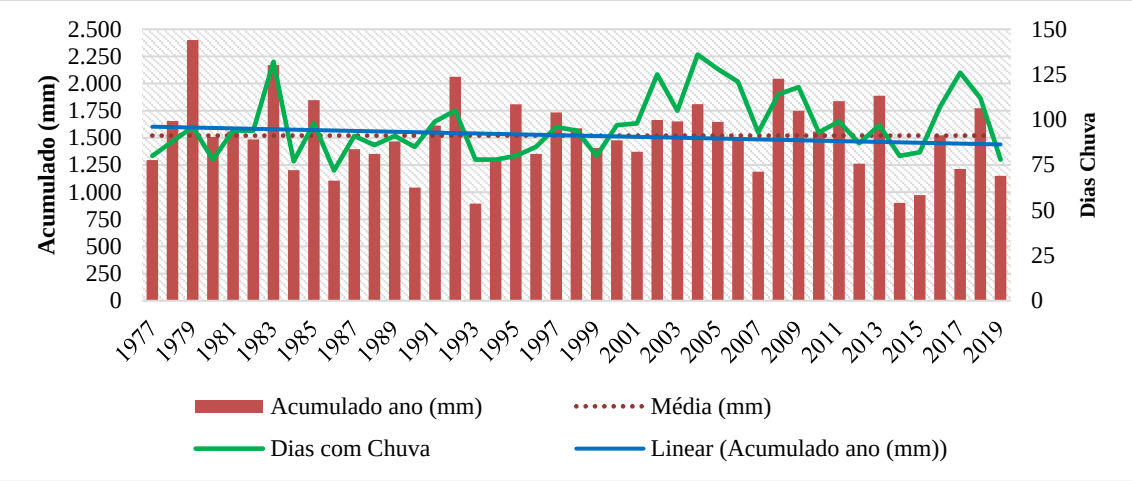
O diagnóstico proposto na seção de metodologia foi elaborado a partir da sintetização de uma pesquisa documental, a qual foi complementada por uma pesquisa de campo, apontando as principais limitações na consolidação e gestão dos dados de água na unidade industrial. A partir da análise documental disponibilizada, as principais constatações foram:

- Inexistência de um fluxograma de tubulações comum a todas as áreas;
- Áreas diferentes gerando dados similares para o monitoramento hídrico em planilhas diferentes; e
- Existência de mais de um controle de dados por planilhas.

Conforme apresentando no Referencial deste trabalho, as componentes de precipitação e evaporação possuem influência direta sobre a superfície do reservatório, apresentando um balanço positivo no período chuvoso e negativo na época de estiagem. Diante da existência de um grande volume de dados de pluviometria medidos no Complexo Minerador, e com o objetivo de compreender e verificar a relação destes dados com a

movimentação de água na unidade industrial, foi realizada a análise da série pluviométrica após o ano de 1977, uma vez que os anos anteriores apresentavam muitos dados ausentes. A partir disso, foi gerado o Gráfico 1.

Gráfico 1 - Dados históricos de pluviometria no complexo minerador no período de 1977-2019.



Fonte: Autor deste estudo (2020).

No Gráfico 1 a linha verde representa o número de dias com chuva em cada ano. Os anos de 1983, 2002, 2004, 2009 e 2017 são os que apresentam o maior número de dias com chuvas, enquanto os anos de 1986, 1993 e 2019 são anos com menor número de dias chuvosos. Os anos de 1979 e 1983 foram os anos que apresentaram os maiores acumulados de chuva, muito acima da média histórica (linha pontilhada). Já os anos de 1993, 2014 e 2015 estiveram muito abaixo da média histórica para o período apresentado. A linha de tendência, representada no Gráfico 1 pela linha azul, aponta para um decréscimo (embora não significativo a 95%, de acordo com o teste t de Student) de precipitação no período de 1977-2019. A partir desta constatação, foi questionado, junto as áreas responsáveis pela gestão hídrica, a existência de alguma alteração na disponibilidade de água no período. Verificou-se que ocorreu, entre os anos de 2014 e 2015, uma significativa mudança nos processos produtivos das plantas industriais com o intuito de reduzir o consumo de água, devido à grande escassez observada nestes anos.

Essa constatação foi mais um estímulo que realçou a necessidade de um sistema de controle e monitoramento mais rígido do consumo de água no empreendimento, reforçando a importância do desenvolvimento desta pesquisa neste Complexo Minerador.

Na etapa de pesquisa de campo, realizada junto as equipes de operação e manutenção, foram realizadas entrevistas e visitas a campo para um melhor entendimento da dinâmica operacional relacionada a movimentação de água nas plantas industriais. A partir disso, foi possível apurar as seguintes constatações:

- Informações de fluxos de tubulação que somente um pequeno grupo de profissionais tinham conhecimento, sem qualquer tipo de registro documental;

- Dependência do escasso conhecimento especializado, onde poucos funcionários conhecem as linhas de captação e recirculação de água;

- Impossibilidade de modelar cenários que indiquem a quantidade real de água disponível, prejudicando a tomada de decisões;

- Incapacidade de fazer intervenções proativas do operador e mudanças no sistema devido à falta de monitoramento em tempo real;

- Esforços desprendidos para projeções a curto prazo, utilizando dados e informações desatualizadas que estão distribuídas em diversas equipes;

- Ausência de uma visão global da utilização da água no processo de captação de água;

- Realização de leituras manuais (sujeitas a erros) em instrumentos de campo para serem, posteriormente, armazenadas em planilhas; e

- Ausência de padrões para a leitura manual dos instrumentos de campo. Leituras não sistemáticas, podendo ser feitas diariamente, semanalmente, mensalmente, ou por conveniência.

Dando prosseguimento a metodologia proposta, foi feita uma investigação das tecnologias de automação já implantadas e que porventura já existiam na Unidade Industrial.

5.2 Tecnologias de automação existentes na unidade industrial

Após a realização da pesquisa e entrevistas descritas na etapa anterior, iniciou-se a verificação de possíveis tecnologias de automação, associadas a gestão de dados hídricos, já empregadas na Unidade Industrial. Com o intuito de estruturar essa constatação, embasando-se nas indicações do Referencial Bibliográfico deste trabalho, se deu atenção a quatro requisitos principais para este levantamento, e que são apresentados abaixo:

I. Quanto a medição para quantificação de dados captados e recirculados: Na etapa de verificação da existência de instrumentos de campo para contabilização de dados hídricos, foi possível identificar nas linhas principais de captação de água medidores de vazão do tipo eletromagnético. Na ausência da visão do processo como um todo, não foi possível determinar a existência de medidores para todos os fluxos de movimentação de água na unidade industrial.

II. Quanto a leitura dos dados e transmissão das informações medidas pelos instrumentos: Nesta verificação, contatou-se a existência de equipamentos capazes de transmitir dados em tempo real. Apesar dos equipamentos já possuírem esta funcionalidade, grande parte não utiliza a transmissão do dado devido à ausência de um meio de transmissão das informações. Grande parte das leituras eram feitas pela informação contida numericamente no *display* dos equipamentos.

III. Quanto à existência de algum sistema armazenando dados de água: Constatou-se que existiam diversos controles paralelos de dados. Alguns setores realizavam controle esporádicos em distintas planilhas Excel. Também foi possível identificar *softwares* que recebem dados de água, mas sem a geração de indicadores e dados com informações em tempo real.

As principais constatações nesta etapa foram:

- A ausência de um fluxograma atualizado que identificasse a origem de todas as captações e descargas dos fluxos de água, o que foi um obstáculo a identificação de todos os equipamentos. Esta deficiência só foi solucionada após aplicar a

metodologia proposta para o monitoramento de informações hídricas em tempo real, que é um dos resultados deste trabalho, e que será descrita na subseção 5.4;

- Carência de qualquer tipo de rotina, ou método de aferição e calibração dos instrumentos;
- Utilização de medidores de vazão do tipo eletromagnético em algumas linhas de captação. Isto confere qualidade aos dados quantificados de água, já que é o princípio de medição mais apropriado para a medição de fluxo de água, conforme apresentado no capítulo dois deste trabalho.
- Utilização do software *PI System* (fabricante *Osisoft*) para a visualização de alguns dados de captação de água. A mesma plataforma é utilizada na planta de beneficiamento de minério de ferro para visualização de informações de processo, como dados de produção, dados de equipamentos, entre outros. Apesar do software ter armazenado certa quantidade de dados hídricos, não existia uma visualização gráfica indicando todas as variáveis, ou dados indicando ritmos de volume de água movimentada.

5.3 Aplicação da proposta metodológica na unidade industrial

Conforme observado nas fases anteriores, todo o contexto no qual a unidade industrial, objeto deste estudo, estava inserida, oportunizava substanciais pretextos para implantação de ferramentas visando a melhoria na gestão de seus dados hídricos. Sendo assim, os resultados da aplicação da sistemática na unidade industrial, seguindo as etapas propostas por este estudo, e visando verificar a eficácia desta metodologia, são apresentados nos subtópicos seguintes.

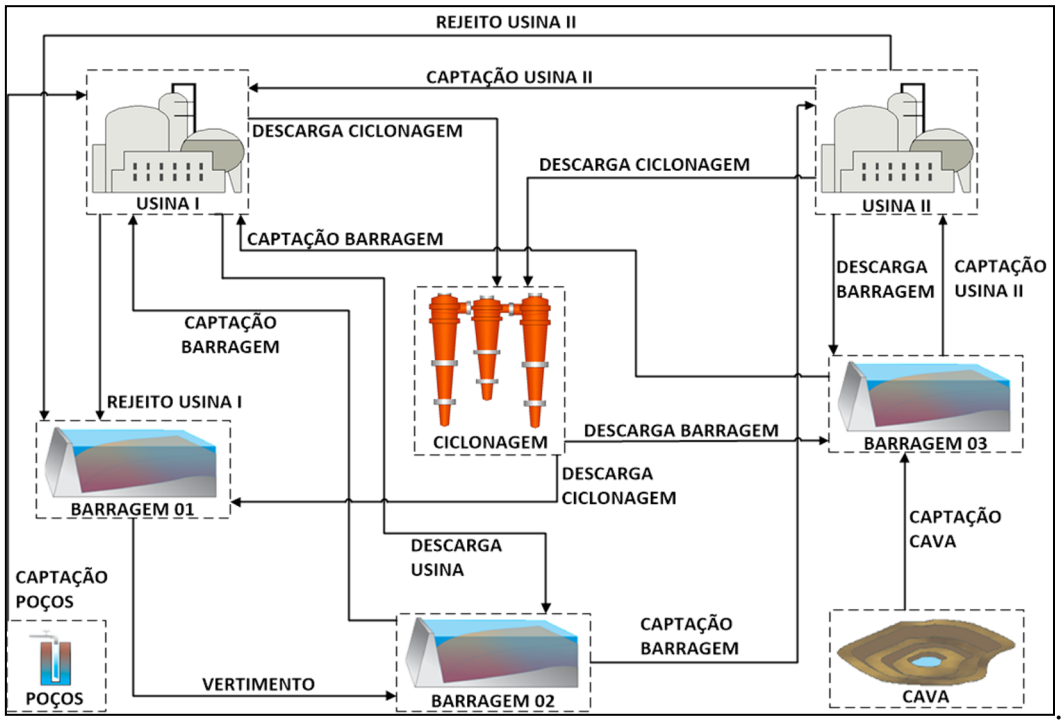
5.3.1 Definição do diagrama de tubulações atualizado

Para a determinação do fluxo de gestão de água da Unidade Industrial foi necessária a investigação documental de diagramas de tubulações, visitas a campo para validação das informações documentadas e confirmação de informações repassadas pelos operadores das plantas de beneficiamento. O curso das atividades realizadas nesta fase foram:

1. A apuração de qualquer documentação relacionada a projetos de tubulações, rotas, pontos de captação e distribuição que possa estar registrada em alguma mídia física ou digital;
2. Realização de entrevistas, para assimilação do conhecimento intelectual do pessoal de operação e demais disciplinas envolvidas no sentido de detectar as rotas de tubulações, pontos de desvio e possíveis alterações no projeto original;
3. Visita a campo para validação das informações verificadas;
4. Desenvolvimento de um fluxograma representando todas as interações de água no processo industrial, destacando os sentidos de fluxo, bem como sua origem e destino.

O objetivo principal nesta etapa, conforme descrito anteriormente, foi ter uma visão completa de todas as linhas de captação e descarga do processo produtivo. Vale ressaltar que dependendo da complexidade da operação, a visita a campo para identificação dos fluxos tenha que ser feita por mais de uma vez. Após a consolidação das informações apuradas nesta fase, o seguinte diagrama de tubulações que representa toda a movimentação de água captada e recirculada na unidade industrial, é apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Diagrama de fluxo de captação e descarga de água e rejeitos na Unidade Industrial.



Fonte: Autor deste estudo (2020).

Este diagrama representa a interação de todas as linhas de captação e descarga dos fluxos de gestão hídrica da unidade industrial. Esta consolidação foi possível, a partir da consulta a documentações e entrevistas realizadas com a equipe de campo. A partir dele, é possível perceber a interação entre os reservatórios e os sentidos da movimentação de água entre suas componentes. Este fluxo atualizado é a principal fonte que irá sustentar as demais fases na implantação do sistema de monitoramento em tempo em tempo real, portanto a exatidão na geração deste produto se torna indispensável. Naturalmente, qualquer alteração neste diagrama, deve ser comunicada e redesenhada no sistema oficial de monitoramento.

A revisão e atualização deste fluxograma é um processo continuamente em curso e que deve ser feito por normas de tempo pré-estabelecidas. Recomenda-se que a apuração das rotas deste diagrama seja mensal, semestral ou em períodos pré-estabelecidos, dependendo da estabilidade e complexibilidade de cada unidade industrial. A disponibilidade de água em períodos sazonais, pode ser uma janela de oportunidade de revisão dos diagramas de captação.

Este fluxograma proporciona uma visão de como se comporta a movimentação de água na unidade industrial. Como visto no capítulo introdutório, a gestão de equilíbrio da água nas áreas de mineração visa melhorar a consciência de quantidades reais de saldo de água em áreas de mineração para melhorar a previsão e gestão dos volumes de água.

Um dos objetivos desta pesquisa é explorar a quantidade de água a partir de um sistema on-line para a melhor gestão dos recursos hídricos. Isso vai ao encontro da afirmação de que “em uma situação ideal, uma mina teria apenas a quantidade suficiente de água para o seu processo produtivo, ou seja, possui o seu balanço hídrico equilibrado” (CSIRO, 2013).

O monitoramento on-line permite aos operadores da unidade industrial reagir rapidamente a perturbações e mudanças nos processos industriais. Para isso, foi necessário verificar a operação com instrumentos capazes de disponibilizar estas informações a uma plataforma computacional, como apresentado no tópico seguinte.

5.3.2 Instrumentação das linhas de captação e descarga

Somente após a construção do fluxograma indicado na primeira fase anterior, foi possível realizar o diagnóstico completo da instrumentação existente em campo na unidade industrial. Os medidores de vazão, equipados com sensores capazes de quantificar os dados de água que passam em seu interior, possuem a função de elemento primário do sistema de medição dos dados de campo. Sendo assim, as apurações propostas nesta fase foram:

- Verificação da existência de medidores de vazão nas linhas de saída da unidade industrial, baseada no diagrama elaborado anteriormente;
- Identificador do medidor por sigla ou TAG;
- Identificação do princípio de medição do equipamento – Parâmetro fundamental que irá determinar a sua precisão na quantificação de água que passa em seu interior;
- Tempo de resposta do equipamento – Parâmetro que possibilitará a leitura dos dados de forma instantânea no software de monitoramento;
- Protocolo de comunicação – Parâmetro que irá determinar a comunicação entre o dispositivo de campo e o dispositivo de aquisição de dados; e
- Procedimento de calibração – Técnica que irá permitir que o equipamento mantenha sua calibração a médio e longo prazo, reduzindo as possibilidades de medições incorretas;

Por meio fluxograma concebido, foi realizado o mapeamento e checagem em campo dos fluxos de captação da Usina I, representados no Quadro 5.

Quadro 5 – Instrumentação das linhas de captação da Usina I.

Fluxo Captação Planta Usina 1	**Linha 1 – Captação Barragem 1**	**Linha 2 – Captação Barragem 3**	**Linha 3 – Captação Poços**	**Linha 4 – Captação Usina 2**
Existência de medidor	SIM	SIM	NÃO	SIM
Identificação do medidor (TAG)	CEFI802001	CEFI802004	-	USFI905001
Princípio de Medição	Eletromagnético	Eletromagnético	-	Eletromagnético
Tempo de resposta do equipamento	Tempo real	Tempo Real	-	Tempo real
Protocolo de comunicação	Profibus PA	Profibus PA	-	Profibus PA
Procedimento de calibração	Inexistente	Inexistente	-	Inexistente

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A partir do Quadro 5 foi possível identificar que na Usina I existem em três linhas de captação medidores do tipo eletromagnético com a capacidade de transmissão destes dados em tempo real para a camada que coleta os dados dos instrumentos. Os medidores existentes possuíam um padrão de princípios de medição e de um mesmo protocolo de comunicação, diferenciando-se apenas pelos diâmetros nominais de cada tubulação. Especificamente neste caso, a linha 3, referente a captação de água dos poços artesianos, não possuía nenhum equipamento responsável por fazer a contabilização dos dados fornecidos a Usina I.

O mesmo procedimento de levantamento de dados foi feito para as linhas de descarga e recirculação mapeadas para a Usina I, apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Instrumentação das linhas de descarga da Usina I.

Fluxo Descarga Planta Usina I	**Linha 1 – Descarga Barragem 2**	**Linha 2 – Ciclonagem A**
Existência de medidor	SIM	SIM
Identificação do medidor (TAG)	CEFI952004	CEFI952006
Princípio de Medição	Eletromagnético	Eletromagnético
Tempo de resposta do equipamento	Tempo Real	Tempo Real
Protocolo de comunicação	Profibus PA	Profibus PA
Procedimento de calibração	Inexistente	Inexistente

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Com base nos dados apresentados no Quadro 6, é possível verificar que nas linhas de descarga da Usina 1, existe na Linha 1 – Descarga Barragem 2 e na Linha 2 – Ciclonagem A medidores do tipo eletromagnético e com a possibilidade de transmissão destes dados em tempo real para a camada superior. Para a medição deste tipo de material, no caso polpa, o medidor eletromagnético também se torna o mais recomendado. Como ocorrido com os medidores das linhas de captação, os medidores existentes possuem um mesmo padrão de método de medição e de um mesmo protocolo de comunicação.

Os dados de verificação dos equipamentos de medição de água da captação da Usina II são apontados no Quadro 7.

Quadro 7 – Instrumentação das linhas de captação da Usina II.

Fluxo Descarga Planta Usina II	**Linha 1 – Captação Barragem 2**	**Linha 2 – Captação Barragem 3**
Existência de medidor	SIM	SIM
Identificação do medidor (TAG)	CEFI998004	CEFI998005
Princípio de Medição	Eletromagnético	Eletromagnético
Tempo de resposta do equipamento	Tempo Real	Tempo Real
Protocolo de comunicação	Profibus PA	Profibus PA
Procedimento de calibração	Existente	Existente

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

De acordo com os dados levantados e apresentados no Quadro 7, as duas captações da Usina II possuem medidores eletromagnéticos capazes de transmitir o dado em tempo real, e com rotinas de calibração e aferição existentes. Um dos motivos que podem esclarecer a existência de uma rotina de calibração somente na Usina II é que esta planta foi construída entre os anos de 2011 e 2012, diferentemente da Usina I, construída na década de 70. Na concepção do empreendimento mais recente já foram determinadas ações mais modernas de aferição dos dados remotamente, por meio de softwares e inspeções em campo. Como forma de garantir a mesma condição para os equipamentos da Usina I, foi solicitado a replicação do plano de manutenção, já que os medidores da Usina I atualmente possuem a mesma base tecnológica. O Quadro 8 apresenta os dados de descarga da Usina II.

Quadro 8 – Instrumentação das linhas de descarga da Usina II.

Fluxo Descarga Planta Usina II	**Linha 1 – Descarga Ciclonagem**
Existência de medidor	SIM
Identificação do medidor (TAG)	CEFI991001
Princípio de Medição	Eletromagnético
Tempo de resposta do equipamento	Tempo Real
Protocolo de comunicação	Profibus PA
Procedimento de calibração	Existente

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Assim como nas linhas de captação, as linhas de descarga da Usina II possuem um medidor do tipo eletromagnético com possibilidade de transmissão dos dados e um procedimento de calibração e manutenção preventiva implantado.

Por fim, a partir do fluxograma elaborado, contatou-se que as Usinas I e II, enviam a descarga para um bloco denominado ciclonagem onde é utilizado nos processos de beneficiamento de minério de ferro como um separador de lama e água do rejeito, para que se aproveite ao máximo a água contida no rejeito para a recirculação interna nas usinas. Portanto, se tornou essencial a realização do mapeamento das saídas deste processo. A ciclonagem, além de otimizar os recursos aquosos na recirculação das plantas, é responsável por realizar a destinação final dos rejeitos na barragem. Os dados levantados neste processo são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Instrumentação das linhas de descarga da Ciclonagem.

Fluxo Descarga Planta Usina II	**Linha 1 – Ciclonagem Barragem 1**	**Linha 2 – Ciclonagem Barragem 3**
Existência de medidor	SIM	SIM
Identificação do medidor (TAG)	CEFI238001	CEFI238001
Princípio de Medição	Eletromagnético	Eletromagnético
Tempo de resposta do equipamento	Tempo Real	Tempo Real
Protocolo de comunicação	Profibus PA	Profibus PA
Procedimento de calibração	Existente	Existente

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

O processo de ciclonagem recebe descargas das Usinas I e II e possui saídas monitoradas por medidores com capacidade de transmitir os dados em tempo real. A partir dos dados levantados, e devidamente instalados, é necessário a transmissão das informações para o sistema de monitoramento.

A partir da consolidação dos dados de todos os medidores de vazão responsáveis por quantificar a movimentação de água que abastece a unidade industrial, constatou-se que

estes equipamentos já possuíam um nível tecnológico que possibilitava o monitoramento em tempo real. A única exceção foi a linha de captação de poços da Usina I, que não possuía medição do fluxo de água. Para sanar essa limitação, foi solicitado às equipes de operação a instalação de um medidor com a mesmas características dos outros demais equipamentos existentes. Essa estratégia adotada tem o intuito de padronizar um único modelo de equipamento, facilitando assim para as equipes de manutenção, a sustentabilidade destes. Além disso, esta padronização tem como propósito facilitar a gestão do conhecimento destas equipes, já que não será necessário implantar um ativo diferente, o que poderia exigir a capacitação das equipes para manusear o novo instrumento.

Outra consideração importante é que foi adotado para a gestão dos dados de quantificação de água, os medidores de vazão do tipo eletromagnéticos. Conforme visto no início desta pesquisa, os medidores de vazão do tipo eletromagnéticos são os mais indicados para a medição de líquidos como água, polpa de minério de ferro, lamas e rejeito. Além disso, o processo interno de beneficiamento de minério de ferro desta unidade industrial já utiliza em larga escala este tipo de medidor em seu processo produtivo, realizando a medição de polpa de minério de ferro e lamas.

O medidor de vazão utilizado nestas linhas, é do fabricante *Endress Hauser*, modelo *Promag 400*, similar ao apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Medidor de vazão eletromagnético modelo *Promag 400.*

Fonte: Endress Hauser (2020).

É de fundamental importância a verificação nos manuais do fabricante do relatório de calibração dos medidores de vazão. Este relatório é emitido na saída da linha de

montagem, e é mais uma ferramenta que permite avaliar a eficácia da medição. A utilização de medidores de vazão eletromagnéticos com características do *Promag 400*, além de permitirem a quantificação dos dados bombeados, permitem a transmissão de dados de saúde e de calibração do equipamento para a central que recebe os dados deste equipamento. Estes dados podem ser acessados remotamente e o equipamento pode informar algum erro em suas medições. A partir destes instrumentos, juntamente com inteligência incorporada, que é uma das recomendações da Industria 4.0 citada no Referencial deste trabalho, é possível com que a unidade industrial consiga otimizar o gerenciamento das informações de seus processos. Aconselha-se que medidores com este tipo de tecnologia sejam considerados na avaliação de um monitoramento hídrico em outra unidade industrial.

Outro dado importante a ser verificado, é a indicação deste fabricante quanto ao período que é necessário para uma nova aferição. Como não foi possível identificar qual foi a última calibração dos medidores da unidade industrial, de forma preventiva foi solicitada uma aferição de todos os instrumentos mapeados nessa fase. Gerenciar os ativos de uma unidade industrial por rotinas de calibração e manutenção preventiva visam garantir mais do que a consistência dos dados, que a precisão dos mesmos não interfira na consolidação final dos dados hídricos.

Os medidores de vazão instalados nas tubulações em campo, como visto, são os elementos primários do sistema de automação que irá gerar as informações para o sistema de monitoramento, e que devem ser capazes de transmitir seus dados através de um meio físico e um protocolo específico. Esta condição de transmissão das informações é descrita no próximo subtópico.

5.3.3 Transmissão dos dados de campo

Em função da variedade de equipamentos e dispositivos de automação disponíveis no mercado, a integração dos dispositivos de medição instalados no campo ao sistema de aquisição de dados se dá por meio de protocolos comuns entre os dois dispositivos. Portanto para que a integração seja realizada de uma forma coerente, abrangendo todos

os dispositivos instalados em campo, foi necessária uma estruturação organizada, já que os dados precisam ser transmitidos e traduzidos computacionalmente.

Os meios de transmissão denominados Redes Industriais de Comunicação, permitem a troca de dados entre os equipamentos e os dispositivos do sistema de automação. Conforme apresentado no capítulo de Referencial desta pesquisa, os meios físicos podem ser por cabos elétricos, cabos fibra ótica ou redes sem fio. Já o protocolo é composto por regras e convenções para conversação, uma espécie de código que determina a comunicação entre dois dispositivos, sendo eles equipamentos ou computadores. Nos protocolos, é definida a forma como cada equipamento opera, de modo que fique entendido para ambos os lados que fazem parte da comunicação. Este protocolo deve estar contido nos medidores de campo e no controlador central, para que seja possível a troca de informação entre eles.

De acordo com as informações levantadas na segunda etapa da sistemática proposta, os medidores de vazão utilizam como meio físico a conexão por cabo elétrico e o protocolo *Profibus PA*. Este protocolo ainda permite que, remotamente, através de um software, seja possível realizar a calibração e diagnósticos dos medidores instalados nessa rede. Estas características são importantes em um sistema de monitoramento como esse, já que estes medidores podem estar geograficamente distanciados da central de operação e esta funcionalidade facilita a manutenção destes dispositivos.

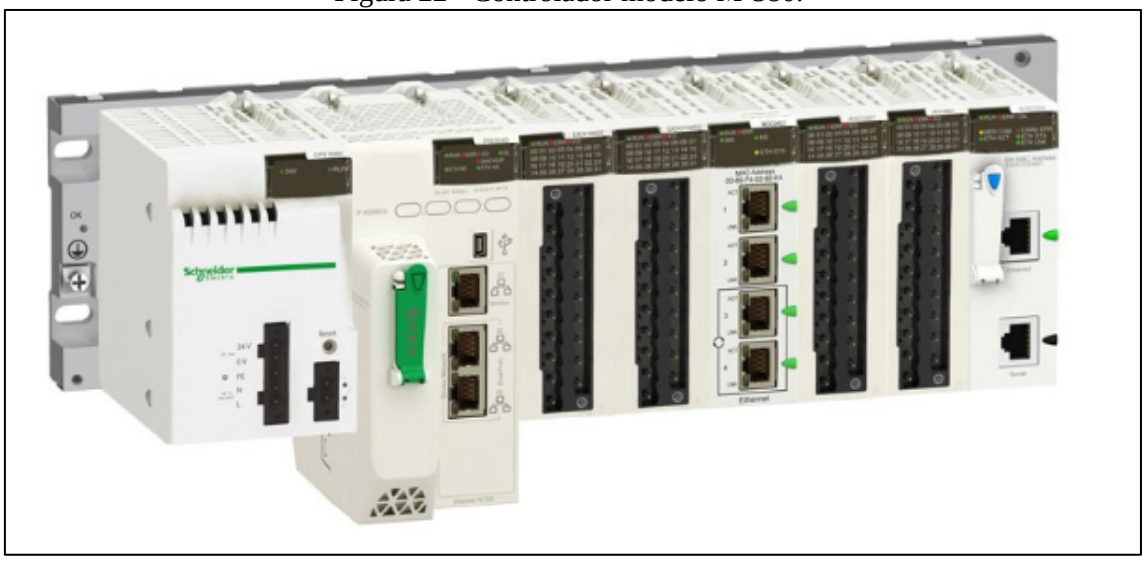
Para o tipo de monitoramento em tempo real proposto por esta pesquisa, a escolha da(s) rede(s) de comunicação mais adequada(s) tem como pré-requisito principal a condição de transmitir a informação no mesmo instante que ela é gerada. O mercado de Tecnologias de Automação vem a cada dia oferecendo mais opções de transmissão de dados em alta velocidade, a custos cada vez mais baixos. Existe ainda um crescimento exponencial de comunicação por redes sem fio, gerando economia na utilização de cabos e reduzindo os custos de instalação. Portanto, outros meios físicos devem ser avaliados nesta etapa, mas para que seja possível a transmissão de dados entre os equipamentos de campo e o equipamento receptor dos dados, a automação industrial determina que o protocolo entre estes dispositivos seja compatível.

Os meios físicos encaminham as informações contidas nos equipamentos de medição (neste estudo, os medidores de vazão) ao equipamento, que fazem a aquisição destas informações (neste estudo, o controlador) por um protocolo de comunicação comum que será utilizado entre estes dois dispositivos. Esta camada de aquisição dos dados de campo é apresentada no subtópico seguinte.

5.3.4 Aquisição dos dados de campo

O instrumento responsável por realizar a aquisição dos dados dos equipamentos de campo, é denominado Unidade Terminal Remota (UTR). Conforme visto, ele deve possuir um protocolo comum ao dispositivo de campo. A UTR é toda infraestrutura eletroeletrônica de proteção, aquisição, processamento e transmissão de dados. Na Unidade Industrial foram utilizados CLP's modelo M-580, do fabricante *Schneider Electric*, similares ao equipamento exposto na Figura 22.

Figura 22 - Controlador modelo M-580.



Fonte: Schneider Electric (2020).

Estes dispositivos são utilizados na Unidade Industrial em larga escala, já que estes são responsáveis por realizar o acionamento e operação de grande parte dos equipamentos das plantas de produção. Conforme visto no Referencial desta pesquisa, estes equipamentos são os "cérebros" do sistema de automação, pois além de realizar a aquisição dos dados através dos módulos de entradas, módulos de saídas e módulos de

comunicação, este controlador também realiza as interfaces entre o sistema computacional, alimentando os dados deste software.

A estrutura de funcionamento deste tipo de equipamento, apresentada no Referencial desta pesquisa, ainda possibilita a criação de sensores virtuais nos pontos sem medição, auxiliando na avaliação do balanço hídrico de cada módulo do fluxograma. Isso é feito realizando um cálculo de todas as entradas medidas, subtraído de todas as demais saídas, restando, assim, o resultado do ponto sem medição.

O mercado de automação oferece uma grande diversidade de controladores, mas para o tipo de monitoramento em tempo real de dados hídricos proposto neste trabalho, os requisitos principais indicados na definição de um controlador foram:

- Custo da ferramenta de programação – muitos destes equipamentos dependem de licenças de software, que podem ser mais caras que o próprio equipamento, portanto, é fundamental a verificação dos custos dos softwares que realizam a programação do equipamento;

- Desempenho do processador – deve ser dimensionado ao porte da unidade industrial. Não se deve escolher equipamentos com uma característica acima do necessário, pois isso leva ao desperdício de recursos;

- Portas de comunicação - deve ser dimensionada levando-se em conta a quantidade de equipamentos a monitorar, se atentando a possíveis expansões futuras. Como visto, deve ser compatível com os dispositivos que vão comunicar;

- Protocolos de comunicação – conforme visto, deve ser compatível com a plataforma computacional. Atualmente protocolos MODBUS / TCP- IP, Ethernet IP e OPC tem sido os mais difundidos no mercado;

- Capacidade de programação remota - este recurso se mostra como vantagem competitiva, pois permite alterações remotamente, reduzindo custos com deslocamento e agilizando as alterações nas configurações dos dispositivos;

- Facilidade de manutenção – deve ser considerada a substituição rápida de módulos que possam vir a apresentar problemas, além da necessidade de conhecimento das equipes de manutenção;

- Custo-benefício – apesar de conceitualmente ser a relação estabelecida entre o que se gasta e aquilo que se recebe em troca, o custo-benefício destes equipamentos e toda a estrutura para o monitoramento em tempo real, quando se trata de recursos hídricos, deve ser avaliada de forma qualitativa, pois existem inúmeros ganhos intangíveis, tais como os custos sociais e ambientais, já que as ferramentas irão disponibilizar uma melhor informação, que leva a uma maior capacidade de tomar decisões mais acertadas.

Foi necessário revisar toda a conexão dos dispositivos de campo a este controlador, já que não eram todos os medidores que transmitiam seus dados ao sistema computacional da unidade industrial. O controlador modelo M-580 possui um dimensionamento voltado a unidades industriais de grande porte, portanto, este equipamento se enquadrou em todos os pré-requisitos listados acima. A camada seguinte, no qual o controlador envia as informações, é a que recebe estes dados e as exibe graficamente.

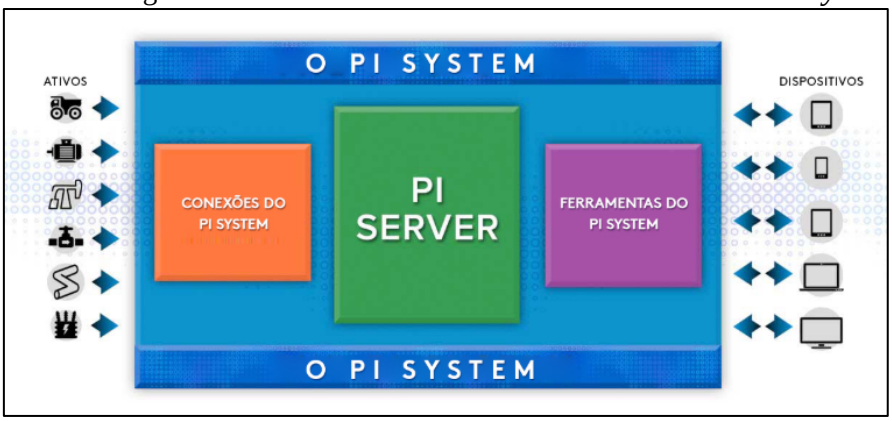
5.3.5 Tratamento e exibição dos dados graficamente

Para a consolidação dos dados enviados pelos controladores M-580 em uma plataforma computacional na unidade industrial, foi utilizado o software *PI System*, do fabricante Osisoft. A contabilização dos dados, cálculos e geração de indicadores, e a apresentação destas informações graficamente aos usuários foram feitas neste sistema.

De acordo com a Osisoft (2019), o *PI System* é um aplicativo que permite aos usuários criarem e visualizarem diagramas de fluxo de processo, valores e tendências em tempo

real. O *PI System* tem capacidade de coletar, analisar, visualizar e compartilhar grandes quantidades de dados de alta fidelidade e de séries cronológicas, de várias fontes para pessoas e sistemas em todas as operações (OSISOFT, 2019). Ao acessar os principais dados e informações em uma plataforma centralizada, o *PI System* auxilia os usuários a tomarem decisões que visam oferecer melhorias nos processos monitorados. A estrutura básica de coleta dos dados dos dispositivos, armazenamento dos dados e disponibilização das informações do sistema é apresentada na Figura 23.

Figura 23 - Estrutura de coleta de dados do sistema *PI System*.



Fonte: Osisoft (2020).

É possível observar que o *PI System* possui conexões com diversos dispositivos, um servidor central e ferramentas que permitem aos usuários, através de dispositivos como celulares e computadores, acessarem todas estas informações. O *PI System* é utilizado nessa unidade industrial como um historiador de dados do processo e dos equipamentos. O software realiza o registro de um evento, associado a um fato físico ocorrido em campo, com um horário associado a ele. Este registro de evento contém a data e hora da ocorrência, a identificação da variável envolvida e qual o estado ou valor da mesma. Neste sistema está contido todas as informações em tempo real e históricas das plantas industriais, tais como:

- Dados históricos e em tempo real de operação dos equipamentos como tensão de operação, corrente de operação, estado dos equipamentos (defeito, ligado, desligado, etc.)

- Dados de toda a instrumentação em campo, monitorando varáveis como: densidade, vazão, nível de tanques, pressão de tubulações, umidade do minério, dados produtivos de balanças que medem o minério produzido.

Por permitir a realização de cálculos pelos usuários, a consolidação dos dados de gestão hídrica da unidade industrial foi feita nesse sistema. Após o tratamento destas informações, foi gerado uma tela gráfica, representando os pontos mapeados para captação e descargas, a partir do levantamento realizado nas etapas anteriores. O principal objetivo de se utilizar este software é que a proposta do sistema de monitoramento em tempo real promova um ambiente colaborativo e interativo onde, além das questões relativas à segurança da informação, existe a necessidade de se modelar adequadamente toda a interconexão da movimentação de água na unidade industrial, visando atender a todos os processos da empresa.

A contabilização dos volumes captados, foram padronizados por volume diário, volume mensal e volume do mês anterior. Essas bases de tempo, após a realização da pesquisa de campo, indicam os parâmetros mais representativos na gestão do recurso hídrico da unidade industrial, levantados na primeira etapa. O Quadro 10 apresenta a fórmula de cálculo adotada no software *PI System* para a contabilização dos volumes totais.

Quadro 10 – Parâmetros de volumes captados.

Parâmetro	Descrição	Fórmula
Vazão Dia (m^3)	Adotou-se o valor atual do totalizador no dia corrente subtraído do valor do totalizador às 0h:00m do dia corrente	(Tagval('TAG_DO_INSTRUMENTO', '*') - Tagval(TAG_DO_INSTRUMENTO1, 't'))
Vazão Mês (m^3)	Adotou-se o valor atual do totalizador no dia corrente subtraído do valor do totalizador às 0h:00m do primeiro dia do mês corrente	(Tagval('TAG_DO_INSTRUMENTO', '*') - Tagval('TAG_DO_INSTRUMENTO', bom('*')))
Vazão Mês Anterior (m^3)	Adotou-se o valor do totalizador no último dia do mês anterior às 23h:59m subtraído do valor do totalizador às 0h:00m do primeiro dia do mês anterior	Tagval('TAG_DO_INSTRUMENTO', bom('*')-1) - Tagval('TAG_DO_INSTRUMENTO', bom(bom('*')-1))

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Os mnemônicos adotados nas fórmulas são específicos do software *PI System*, e podem ser interpretados pelo Quadro 11.

Quadro 11 – Simbologia para cálculos software PI, Osisoft 2019.

Símbolo	Significado
*	Recorre ao valor do TAG neste momento (AGORA)
t	Recorre ao valor do TAG às 00:00:00 do dia corrente (HOJE)
-	Operação de subtração
bom	Recorre ao valor do TAG às 23:59:59 do mês anterior ao corrente

Fonte: PI, Osisoft (2020).

Após a realização da contabilização total dos dados de movimentação de água, foram realizados os cálculos associados a visualização em tempo real, indicando a periodicidade de movimentação de água em cada linha, sendo estes:

- A visualização das informações por médias horárias diárias – indicando a periodicidade (em m^3/h) naquele momento exato, considerando a movimentação de água realizada desde o primeiro horário do dia corrente;
- A visualização das informações por médias horárias mensais – indicando a periodicidade (em m^3/h) naquele exato momento, considerando a movimentação total de água realizada desde o primeiro horário do primeiro dia do mês corrente;
- A visualização das informações por médias horárias do mês anterior – indicando qual foi a periodicidade (em m^3/h) de movimentação de água considerando todo o mês anterior.

Os cálculos foram realizados para todo o cenário de captação e recirculação de água e rejeitos na planta de beneficiamento. O Quadro 12, apresenta a fórmula de cálculo utilizada no software *PI System*.

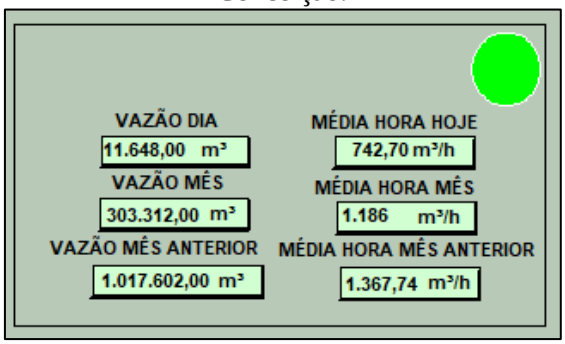
Quadro 12 – Periodicidade de volumes bombeados.

Parâmetro	Descrição	Fórmula
Média Hora Hoje (m^3/h)	Adotou-se o valor atual do totalizador no dia corrente subtraído do valor do totalizador às 0h:00m do dia corrente / dividido pela quantidade de horas corridas no dia atual.	(Tagval('TAG_DO_INSTRUMENTO', '*') - Tagval('TAG_DO_INSTRUMENTO', 't')) / (hour('*')+ minute('*')/60)
Média Hora Mês (m^3/h)	Adotou-se o valor atual do totalizador no dia corrente subtraído do valor do totalizador às 0h:00m do primeiro dia do mês corrente / dividido pela quantidade de horas corridas no mês atual	(Tagval('TAG_DO_INSTRUMENTO', '*') - Tagval('TAG_DO_INSTRUMENTO',bom('*'))) / ((Day('*') - Day(Bom('*')))*24 + (hour('*')+ minute('*')/60))
Média Hora Mês Anterior (m^3/h)	Adotou-se o valor do totalizador no último dia do mês anterior às 23h:59m subtraído do valor do totalizador às 0h:00m do primeiro dia do mês anterior / dividido pela quantidade de horas corridas no mês anterior	(Tagval('TAG_DO_INSTRUMENTO', bom('*')-1) - Tagval('TAG_DO_INSTRUMENTO', bom(bom('*')-1)))/(Day (bom('*')-1)*24)

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Após a realização de todos os cálculos, criou-se, por meio das ferramentas disponíveis no software, o layout de visualização destas informações. A Figura 24 apresenta um bloco gráfico com os dados já calculados no software *PI System*.

Figura 24 - Bloco de contabilização dos dados de captação de água em uma linha da Usina de Conceição.

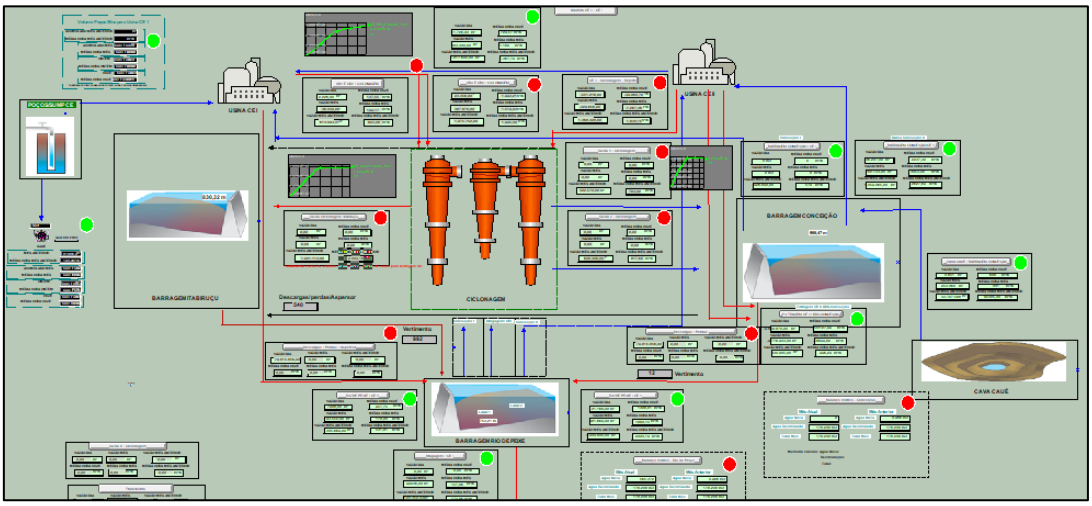


Fonte: Autor do estudo, (2020).

O bloco representado na Figura acima, apresenta os dados de uma linha de captação. Na primeira coluna são exibidos os valores totais movimentados daquela linha em m³/h. Já na segunda coluna são apresentados os dados instantâneos em m³/h, indicando os dados médios de movimentação de água do dia atual, do mês atual e do mês anterior. A próxima

fase contempla o acompanhamento da variação destas informações. Após a construção dos blocos, para cada linha de fluxo de captação e descarga, foi gerado o painel final, que se encontra, atualmente, em operação.

Figura 25 - Tela de gestão dos dados de captação de água da unidade industrial.



Fonte: Autor deste estudo (2020).

A tela de gestão contém todo o fluxo atualizado das tubulações e o seu respectivo direcionamento. Cada bloco, no qual foram instalados os medidores, apresenta os dados totais bombeados e seu respectivo ritmo. Outras informações em tempo real, que já existiam na unidade industrial, como o nível das barragens e dados de pluviometria, foram integradas a este painel. O sistema permite a visualização de gráficos e determinação de metas. Todos os dados trabalham on-line, e o software ainda permite que cada usuário customize esta tela, com a forma gráfica que lhe for mais conveniente.

Como visto no capítulo introdutório, a gestão de equilíbrio da água nas áreas de mineração visa melhorar a consciência de quantidades reais de saldo de água em áreas de mineração para melhorar a previsão e gestão dos volumes de água. Apesar do painel ainda não conter todas as variáveis que interferem no balanço hídrico da unidade industrial analisada, como dados em tempo real de evaporação, vertimento, vazão afluente, dados de densímetros para estimar a água no rejeito, entre outras possíveis entradas, a movimentação de água na unidade industrial pode ser mais bem interpretada por este painel. Outros dados disponíveis em tempo real, como pluviometria, nível das barragens, e vazão de outorga foram incorporados ao sistema de monitoramento.

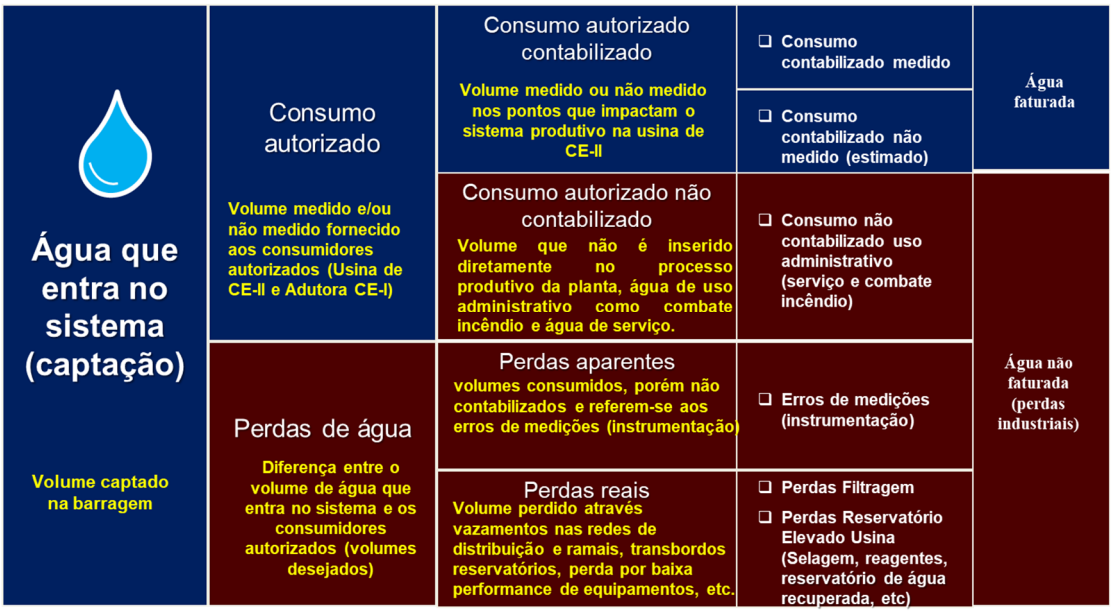
Este painel também tem permitido subsidiar a tomada de decisões operacionais, fazendo com que a unidade industrial tenha apenas a quantidade suficiente de água para os seus processos produtivos. Além disto, este painel tem permitido um melhor controle dos volumes outorgados. O painel é apresentado de forma ampliada no anexo 1, com o intuito de visualizar melhor as informações geradas.

5.3.6 Operação assistida

Nesta fase final foi observado todo o comportamento das variáveis monitoradas, presenciando as tendências e comportamentos dos dados durante um período que permita os operadores e técnicos de manutenção se sentirem seguros com relação as informações geradas pelo sistema. Para este painel, elaborado na unidade industrial, um período de 90 dias foi utilizado para acompanhamento dos dados. Este tempo foi determinado devido à complexidade de linhas das duas usinas de produção, e a utilização de uma estratégia de comparação aos dados de fechamento de movimentação de água manuais, que eram realizados mensalmente. Durante este período foram realizadas várias comparações dos dados exibidos na plataforma computacional com os dados gerados nos medidores instalados em campo, passando por ajustes nos parâmetros, aferição dos instrumentos, entre outros, com o objetivo de sanar imediatamente possíveis inconsistências, diagnosticar e relatar falhas que ocorreram e tomar as devidas ações para prevenir a repetição destas falhas.

Nesta fase, foi possível elaborar um mapeamento de fluxos que podem explicar possíveis perdas no sistema, apresentado na Figura 26:

Figura 26 - Contabilização de recursos hídricos em uma unidade de beneficiamento de minério de ferro.



Fonte: Autor, baseado em *International Water Association* (IWA,2020).

Na matriz elaborada para a unidade industrial é possível observar que mesmo que não seja possível identificar ou medir possíveis desvios de água, conforme visto no Referencial deste estudo, a existência de incertezas relacionadas a movimentação de água se torna natural, todavia se torna estratégico mapear estes pontos. Esta matriz permite analisar pontos que não possuem medição, e dependendo dessa avaliação, prever a instalação de dispositivos de medição. Também é possível segmentar as áreas da unidade industrial, estabelecendo limites de controle e consumo aceitáveis para a rede de água.

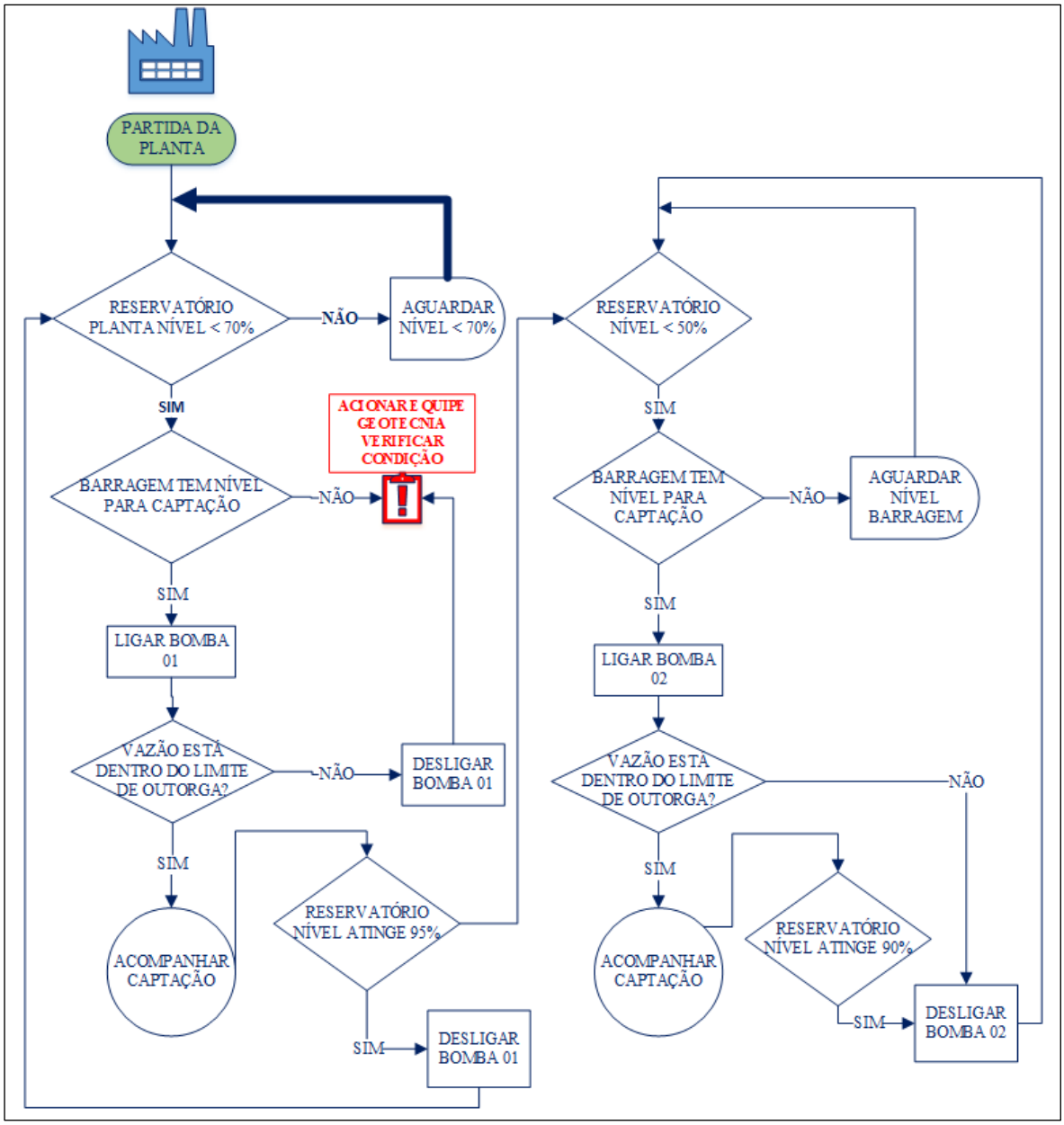
A matriz elaborada ainda permite documentar pontos passíveis de perdas, mesmo que sejam consideradas como “insignificantes” na unidade industrial.

A implantação das rotinas de manutenção também deve ser acompanhada nesta fase. Apesar dos sistemas produzirem informações em tempo real e de forma automática, o acompanhamento da saúde destes dispositivos, conforme descrito anteriormente, faz parte de um sistema de automação eficiente.

5.4 Fluxograma para tomada de decisões operacionais

Após a consolidação dos dados no painel de gestão, verificou-se a necessidade da geração de um fluxograma para auxiliar a equipe operacional da unidade industrial, indicando as condicionantes a se verificar na operação da planta e que possuem associação a algum procedimento operacional. Este fluxograma foi produzido após a consolidação das regras operacionais definidas pelas equipes da unidade industrial, e é apresentado na figura 27.

Figura 27 - Fluxograma para auxílio a tomada de decisões operacionais.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A partir da Figura 27 é possível observar que a variável primária que determina o início da captação de água é o nível do reservatório que abastece a unidade industrial. Após a averiguação que este reservatório apresente um nível inferior a 70%, é necessário a verificação do nível operacional da barragem para o acionamento da bomba de captação número um. Esta verificação pode ser realizada por meio de algum instrumento de medição de nível instalada na barragem ou através de quaisquer outros métodos de verificação desta condição. Na unidade industrial, objeto deste estudo, esta verificação é feita através de uma inspeção local, já que algumas outras considerações operacionais da barragem devem ser consideradas e este aval pode ser dado somente pela equipe responsável pela estrutura. As etapas seguintes consistem no acionamento das bombas, de acordo com o nível operacional do reservatório que abastece a planta de beneficiamento.

Ressalta-se que este tipo de fluxograma tem como funcionalidade auxiliar os operadores da planta que não possuem o conhecimento de todas as variáveis que influenciam a gestão dos dados da unidade industrial e documentar as regras operacionais na gestão do recurso hídrico da unidade industrial.

5.5 Indicadores qualitativos da relevância deste trabalho

De forma a avaliar quais foram as contribuições práticas advindas da implementação dos resultados deste trabalho na gestão dos recursos hídricos no Complexo de Itabira, foram realizadas entrevistas com os gestores responsáveis pelas áreas de Meio Ambiente, Operação da Unidade Industrial e Hidrogeologia. Destas entrevistas, pode-se destacar um apanhado das principais mudanças ocorridas na organização em termos operacionais e administrativos após a implementação do sistema de gestão proposto neste trabalho, as quais serão descritas a seguir.

Com relação as mudanças operacionais, foi observada a redução nos deslocamentos de funcionários ao campo. Estes deslocamentos tinham como objetivo a verificação das informações dos medidores in loco. Entretanto, já que grande parte dos dados após a implantação do sistema podem ser acompanhados remotamente, houve uma redução na frequência desta atividade. Como consequência, é possível também inferir uma moderada

redução na exposição dos funcionários a fatores de riscos inerentes as atividades operacionais de uma unidade industrial. Estes riscos podem estar relacionados a circulação de veículos em áreas operacionais, exposição a fatores ambientais (intempéries, exposição a descargas atmosféricas, exposição a insolação, a poeira e ruídos), além de riscos relacionados a picadas de insetos e animais peçonhentos.

A coleta de dados remotamente também permitiu a integração aos sistemas de alertas. Estes sistemas consistem no envio de mensagens de texto a uma equipe específica, alertando qualquer desvio ou não-conformidade de uma variável monitorada, confiando assim, de forma antecipada, ações corretivas para a normalização das condições ideais de captação de água. Outro fato relevante observado no início da operação do monitoramento em tempo real, refere-se à possibilidade de identificação de vazamentos em tubulações por meio do comparativo das vazões em cada linha nas movimentações de água da unidade industrial. Com isso, torna-se possível implementar cálculos que sinalizam uma possível diferença na quantidade de água movimentada nas linhas de processos, visando a redução de perdas por estes vazamentos.

Com relação as mudanças administrativas, foi apontado pelos usuários a possibilidade da geração de Indicadores-Chave de Desempenho (ou *KPI - Key Performance Indicator*), esboçando as métricas essenciais para avaliação do processo de gestão hídrica no Complexo Industrial. De forma prática, isso significa que é possível determinar um valor "ideal" ou um limite mínimo e/ou máximo aceitável para uma variável específica. A partir dessa definição, é possível realizar o acompanhamento das tendências em tempo real e compará-las aos limites pré-estabelecidos. Um exemplo, aplicado a unidade industrial, é o acompanhamento da taxa de consumo de água associada ao volume produzido. Este parâmetro permite gerar um valor numérico de consumo de água por cada tonelada de minério de ferro produzido. Este parâmetro foi associado a uma meta de consumo considerada ideal. Assim, estes indicadores têm suma importância, uma vez que ajudam a compreender qualquer desvio ou não-conformidade ocorrida durante um processo produtivo, mas isso se torna mais evidente quando o sistema opera em tempo real, já que a visibilidade global de dados de captação, recirculação, reuso e água destinada a terceiros permitiu um melhor entendimento da movimentação de água na unidade industrial.

Outra importante mudança se refere as formas utilizadas para a realização da contabilização total dos dados de movimentação de água na unidade industrial. Por meio dos dados automatizados percebeu-se que esta tarefa se tornou mais eficaz, já que anteriormente, para a consolidação destes dados, era necessário o envolvimento de uma equipe multidisciplinar, envolvendo distintos setores da unidade industrial, debatendo o volume movimentado e utilizado por cada setor para, posteriormente, alimentar planilhas que tinham como função quantificar os volumes de movimentação de água na unidade operacional. Com o monitoramento armazenado no sistema de automação, observou-se uma significativa redução no tempo médio gasto para a contabilização destes dados, o que pode resultar em um aumento na produtividade dos funcionários em outras atividades.

A redução no tempo médio gasto para a contabilização dos dados também está atrelada a uma melhoria significativa na maneira de reportar os dados de movimentação de água aos órgãos de fiscalização. Neste sentido, periodicamente as Unidades Mineradoras do Estado de Minas Gerais, visando atender as condicionantes ambientais e exigências legais, reportam ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), dados para a cobrança de uso da água. A Portaria IGAM nº 48, de 04 de outubro de 2019, é a norma que estabelece diretrizes para a regularização dos recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais, além de dar outras providências.

Assim, de acordo com os usuários, notou-se que a implementação do sistema de monitoramento em tempo real permitiu aumento do controle, uma melhor gestão dos dados ambientais e um ganho na eficiência e agilidade na consulta das informações, possibilitando a extração dos dados do sistema de acordo com os parâmetros desejados. Isso permite que os dados sejam reportados de acordo com as exigências de uma rotina de fiscalização, habitualmente realizadas na unidade industrial pelo IGAM, Instituto Estadual de Florestas (IEF) ou ANA.

A consolidação dos numerosos dados de vazões projetadas e executadas por cada outorga da unidade industrial, com a finalidade de uso de captação e lançamento, também são informadas ao SISCAD (Sistema de Cadastro de Usuários de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais) junto ao IGAM. O SISCAD, de acordo com o IGAM (2020), tem como objetivo o registro das informações sobre o uso da água de pessoas físicas ou

jurídicas, de direito público ou privado, em todo o Estado de Minas Gerais. Os dados visam auxiliar no processo de implementação dos instrumentos de gestão das águas, em particular a outorga, o enquadramento de corpos d'água, os planos diretores de bacia hidrográfica e a cobrança pelo uso da água. Portanto, a consolidação destes dados de forma organizada em um banco de dados, confere eficiência e agilidade no fornecimento destas informações, além de dar suporte ao balanço hídrico da unidade operacional.

Quanto aos compromissos firmados junto à comunidade local, ressalta-se que a unidade industrial é responsável por parte do fornecimento de água potável a companhia de tratamento e distribuição de água do município, sendo assim, monitoramentos desta espécie são fundamentais na identificação e atuação no caso de desvios no fornecimento de água de forma mais rápida, evitando possíveis problemas no abastecimento de água potável.

Por todos estes fatores mencionados, pode-se dizer que a implantação do sistema de monitoramento em tempo real também contribui para o cumprimento da meta da unidade industrial para a redução de consumo de água até o ano de 2030. Este compromisso está associado ao sexto objetivo da Agenda 2030 da ONU. O sexto objetivo visa "assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos". Em seu quarto item (ONU, 2020), é definido que até 2030 é necessário:

> "[...] aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água, e reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez de água".

Em contrapartida, nesta unidade industrial, percebeu-se que é desafiador para as equipes que manipulam e são responsáveis pela gestão dos dados de movimentação de água, dispor de uma qualificação mínima que permita compreender e implantar melhorias tecnológicas nos processos de monitoramento ambiental, além da manipulação de softwares de forma mais apurada. Isso se deve a constante e acelerada atualização tecnológica no qual os softwares/equipamentos industriais vem sendo submetidos. O conhecimento não pode ser limitado. O envolvimento de departamentos de tecnologia para dar suporte a estas equipes, se torna essencial. Nas empresas de grande porte esta

constatação pode se tornar mais evidente, já que as equipes responsáveis pelos dados hídricos e as equipes de tecnologia podem não se comunicar com tanta frequência, devido as responsabilidades de cada setor, portanto, isso deve ser considerado, e estratégias para que essa comunicação possa ser facilitada, precisam ser pensadas.

Neste contexto, a utilização de medidores com tecnologia embarcada exigiu a elaboração de um normativo interno, determinando o nível de confiança dos instrumentos de medição. Este documento normativo foi elaborado com o objetivo de determinar o nível de confiabilidade dos dados gerados para cada grupo de medidores de vazão utilizado para contabilizar a movimentação de água na unidade industrial, já que existe uma grande variedade de fabricantes de medidores, com procedimentos distintos de leitura. Além disso, o normativo visou fornecer orientações básicas para elaborar uma declaração de precisão, indicando o nível de confiabilidade da informação gerada por cada medidor de vazão, como forma de melhorar e evidenciar onde os esforços devem ser direcionados com o intuito de aumentar a confiança nos dados gerados. O normativo indica os fluxos medidos, estimados ou simulados (para locais que não possuam medidores) de volume de água na unidade industrial, juntamente com o nível de confiança destes dados, sendo classificados como alto, médio ou baixo.

Por fim, constatou-se a pretensão de expandir esta solução de monitoramento em tempo real para todo o Complexo Industrial, enfatizando assim a importância dos resultados obtidos com esta pesquisa e a necessidade de que a metodologia proposta possa ser replicada.

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bacia do rio Piracicaba, região de estudo desta pesquisa, está inserida em uma importante região econômica do estado, com forte presença das atividades de mineração, siderurgia e celulose. Estas atividades, realizadas no entorno desta região, estão estritamente associadas à utilização de recursos hídricos em seus processos produtivos. Cerca de 80% da circulação de água na mineração está relacionada com o manejo de rejeitos, que também podem causar as maiores perdas no circuito de água de uma unidade industrial.

A implantação de ferramentas de gestão hídrica nas instalações de uma unidade industrial de beneficiamento de minério de ferro é um fator extremamente importante na tentativa de atingir o equilíbrio de água adequada para toda a área de mineração, pois existem incertezas nas modelagens atuais de controle dos volumes disponíveis. Além disso, o monitoramento remoto em tempo real tem como função agilizar as ações a serem tomadas em uma possível movimentação indevida de água na unidade industrial. Uma gestão inadequada deste recurso pode afetar toda a comunidade a jusante das linhas de captação da unidade mineradora.

No desenvolvimento deste trabalho observou-se que existe uma escassez de referências bibliográficas que associam os sistemas de automação à gestão dos recursos hídricos, demonstrando assim a importância deste tipo desta pesquisa.

Portanto, a proposta desse trabalho foi elaborar uma sistemática com o objetivo de auxiliar a implantação de um programa de monitoramento em tempo real. Como forma de verificar a eficácia desta proposta, foi feita a aplicação desta metodologia em uma unidade industrial de mineração, tendo como produto final um painel de gestão de dados hídricos em tempo real.

A metodologia utilizada nesta pesquisa permitiu identificar os principais problemas na gestão dos recursos hídricos de uma unidade industrial de grande porte:

- Impossibilidade de modelar cenários que indiquem a quantidade real de água disponível, prejudicando a tomada de decisões;

- Incapacidade de fazer intervenções proativas do operador e mudanças no sistema, devido à falta de monitoramento em tempo real;
- Desatualização de dados e informações distribuídas em diversas equipes fazendo com que esforços sejam desprendidos para projeções a curto prazo;
- Ausência de uma visão global da movimentação da água no processo de captação; e
- Dependência do escasso conhecimento especializado, onde poucos funcionários conhecem as linhas de captação e recirculação de água;

A metodologia utilizada neste trabalho, a qual apresenta um sequenciamento formal para este tipo de atividade, se mostrou muito útil na análise e verificação destes problemas existentes. Este sequenciamento de atividades serviu de guia para a análise e implantação das ações. Portanto, esta metodologia pode ser utilizada como uma ferramenta auxiliar na determinação de controles por órgãos fiscalizadores, além do acompanhamento de volumes outorgados utilizados no setor industrial. Existe também o aspecto didático deste trabalho, que pode ser utilizado como material complementar no estudo de sistemas de automação aplicados ao monitoramento hídrico.

Por meio dos resultados desta pesquisa percebeu-se que a implantação de um sistema de monitoramento automatizado permite uma visão global do processo de movimentação da água. Esta visão permite fornecer subsídios para a tomada de decisões operacionais, fazendo com que a unidade industrial tenha apenas a quantidade suficiente de água para os seus processos produtivos, mantendo estabilidade em seu balanço hídrico. Isso possibilita prever o comportamento futuro e avaliar alternativas. Os resultados obtidos também demonstraram uma melhoria neste controle da quantificação de água reutilizada e recirculada nos processos, possibilitando a criação de planos mais detalhados para a gestão da água e, portanto, possibilitando a preparação contra eventuais mudanças no ciclo hidrológico.

Além disso, foi possível entender como a água é fundamental nos processos de mineração. É um recurso que precisa ser utilizado com responsabilidade na visão da indústria. O sucesso no gerenciamento de recursos hídricos está intimamente ligado ao avanço do

conhecimento sobre esta temática. Com os dados obtidos por esses sistemas de automação é proposto uma nova alternativa na gestão dos recursos hídricos.

Assim sendo, este trabalho de pesquisa acredita ter atingido o objetivo geral proposto inicialmente que foi a elaboração de uma sistemática para a implantação de um monitoramento em tempo real para a gestão de dados hídricos em uma unidade industrial. Os resultados obtidos também contribuem para o fornecimento de ferramentas e metodologias para avaliação, aperfeiçoamento e integração dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, além de oferecer um modelo para aperfeiçoamento da gestão dos recursos hídricos na mineração. Para isso foi produzido um relatório técnico, que apresenta as etapas para implantação de um monitoramento em tempo real.

Conforme evidenciado aqui, apesar do trabalho contribuir no entendimento do balanço hídrico da unidade industrial, não foi um objetivo desta pesquisa elaborar o painel em tempo real de todas as variáveis que compõem o sistema, já que variáveis como taxa de evaporação, densidade do rejeito, ainda não puderam ser integradas, pois as mesmas ainda não fornecem dados em tempo real. Será necessário a substituição destes medidores para poder integrá-los ao sistema. Portanto uma das sugestões para pesquisas e trabalhos futuros é a integração destas variáveis ao sistema de monitoramento em tempo real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA, INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. **A gestão dos recursos hídricos e a mineração.** Brasília: ANA, 2006. 334 p. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2006/AGestaoDosRecursosHidricosEAMineracao.pdf>. Acesso em: jan. De 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Sistemas de Informação na gestão de águas: conhecer para decidir** / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **O Comitê de Bacia Hidrográfica: o que é e o que faz?** / Agência Nacional de Águas. - Brasília: SAG, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **O Comitê de Bacia Hidrográfica: prática e procedimento** / Agência Nacional de Águas. - Brasília: SAG, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: Relatório pleno** / Agência Nacional de Águas. - Brasília: ANA, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Metadados.** Brasil, 2018. Disponível em: <http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>. Acesso em: out. de 2019.

Agência Nacional de Águas. **Água na indústria: uso e coeficientes técnicos.** Brasília, 2017.

ALBUQUERQUE, P. U. B.; ALEXANDRIA, A. R. de. **Redes Industriais: aplicações em sistemas digitais de controle distribuído.** 2. ed. Brasil: Ensino Profissional, 2009.

BICHUETI, R. S.; GOMES, C. M.; KNEIPP, J. M.; ROSA, L. A. B. **Gestão Estratégica do uso da Água na Mineração: um Estudo Multicasos em Empresas Brasileiras**. Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 9, n. 2, p. 102-119, 2015.

CAMPISTA, M. E. M., Ferraz, L. H. G., Moraes, I. M., Lanza, M. L. D., Costa, L. H. M. K., e Duarte, O. C. M. B. -" **Interconexão de Redes na Internet do Futuro: Desafios e Soluções** ", em Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC'2010, pp. 47-101, Gramado, RS, Brasil, maio de 2015.

CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce: Volume I, Relatório Final.** 2010. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/pirh-parh-pap/pirh>. Acesso em nov. de 2019.

CSIRO. **Helping miners find the right water balance**. 2013. Disponível em: <http://www.csiro.au/Portals/Media/Helping-miners-find-theright-water-balance.aspx.> Acesso em: out. de 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Anuário mineral brasileiro.** Brasília: DNPM, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **PORTARIA Nº 70.389, DE 17 DE MAIO DE 2017.** Brasília: DNPM, 2017. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/portaria-dnpm-no-70-389-de-17-de-maio-de-2017-seguranca-de-barragens-de-mineracao>. Acesso em: maio de 2019.

EMERSON PROCESS, **Medições de Vazão.** 2019. Disponível em: < https://www.emerson.com/pt-br/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement>. Acesso em: maio de 2019.

ENDRESS HAUSER, **Soluções para medição de vazão**. 2019. Disponível em: < https://www.br.endress.com/pt/soluções/soluções -medição-vazão >. Acesso em: junho de 2019.

ENGECORPS ENGENHARIA S.A. Produto 3 - **Diagnóstico Técnico: Participativo dos serviços de saneamento básico.** 2015. Disponível em: <http://www.itabira.mg.gov.br/portal/wp-content/uploads/2015/09/Produto-3.pdf>. Acesso em: out. de 2019

FENNEL, J. **Total water management: a necessary paradigm for sustainability**. In: Water in Mining 2012 – 3rd International Congress on Water Management in the Mining Industry. 2012. Santiago, Chile; Anais… GECAMIN - Conferences for mining e Centre for Water in the Minerals Industry. 2012.

FISCHER, G. **Acelerações em escala regional: A transformação do vale do Rio Doce**, ca. 1880-1980. Varia hist., Belo Horizonte, v. 34, n. 65, p. 445-474, ago. 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-87752018000200445&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 16 ago. de 2020. https://doi.org/10.1590/0104-87752018000200007.

FONSECA, A., McAllister, M.L., Fitzpatrick, P., 2014. **Sustainability reporting among mining companies: a constructive critique of the GRI approach**. J. Clean. Prod. 84, 70 e 83. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.050.

GERAES. **Fundamentos de Automação**, 2015. 1. ed. Brasil: Editora Érica, 2015.

GOVERNO FEDERAL DO BRASIL, **A indústria 4.0.** Disponível em: < http://www.industria40.gov.br/>. Acesso em: out. de 2019

GUNSON, A.J. et al. Reducing mine water requirements. **Journal of Cleaner Production**. v. 21, n. 1, p. 71-82, 2012.

HESSEL, R.; FRESCHI, A. A.; SANTOS, F. J. dos. **Lei de indução de Faraday: uma**

verificação experimental. : Uma verificação experimental. Revista Brasileira de Ensino de Física, [s.l.], v. 37, n. 1, p. 1506, mar. 2015. Fap UNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1806-11173711719.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba (DO2)**. Disponível em: <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/cobranca-pelo-uso-dos-recursos-hidricos>. Acesso em nov. de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. 2012. **Gestão para a sustentabilidade na mineração: 20 anos de história.** Disponível em <www.ibram.org.br>. Acesso em: nov. de 2019

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. 2014. **A indústria da mineração para o desenvolvimento do brasil e a promoção da qualidade de vida do brasileiro.** Disponível em <www.ibram.org.br>. Acesso em: nov. de 2019

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. 2018. **A indústria da mineração para o desenvolvimento do brasil e a promoção da qualidade de vida do brasileiro.** Disponível em <www.ibram.org.br>. Acesso em: nov. de 2019

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. 2020. **Resultados do setor mineral 2° trimestre 2020.** Disponível em <http://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2020/07/Coletiva-Resultados-2TRI2020-VERSAO-FINAL-21JUL2020.pdf>. Acesso em: julho de 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14046: **Environmental management water foortprint principles requirements and guidelines.** Genebra: ISO:2014.

JULIEN, M.R.; GOWAN, M.; NALECKI, P.; KISSIOVA, M. (2005). **"Water balance and its integration in mine operation through the use of real-world systems modelling tools".** Anais do Symposium Mines and the Environment, Rouyn- Noranda, Quebec, Canada, 2005.

MCA. **Water Accounting Framework for the Minerals Industry, User Guide, Version 1.3**. January 2014. Minerals Council of Australia (MCA). Disponível em: < https://minerals.org.au/sites/default/files/WAF_UserGuide_v1.3_(Jan_2014).pdf>. Acesso em: julho de 2020.

MDIC (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior). **Balança comercial brasileira: semanal. 2016.** Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/index.php/comercioexterior/estatisticas-de-comercio-exterior/balanca-comercial-brasileira-semanal>. Acesso em: março 2020.

MCPHAIL, G. **Getting the Water Balance Right. Tailings & Paste Management Decommissioning**. Australian Centre for Geomechanics, 2005.

MONACO, R. Investimentos em automação potencializam competitividade da indústria. 2013. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br>. Acesso em: março de 2020.

NORTHEY, S. A.; MUDD, G. M.; SAARIVUORI, E.; WESSMAN-JÄÄSKELÄINEN, H.; HAQUE, N. **Water footprinting and mining: where are the limitations and opportunities?** Journal of Cleaner Production, [S.L.], v. 135, p. 1098-1116, nov. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.024.

OCDE, Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. **Governança dos Recursos Hídricos no Brasil**, OECD Publishing, Paris, 2015.

ONU, **Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** Disponível em: <.https://www.undp.org/content/dam/brazil/docs/agenda2030/undp-br-Agenda2030-completo-pt-br-2016.pdf>. Acesso em: agosto de 2020.

OSISOFT.**PI System**. 2019. Disponível em: < https://www.osisoft.com/pi-system/>. Acesso em: nov. de 2019.

PAVANI, S.A. **Instrumentação Básica / Sérgio Pavani**. – 3. ed. – Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2009. Disponível em: **<**http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_autom_ind/instrum_basic/161012_instrum_basic.pdf>. Acesso em: maio de 2020.

PINK, B. **Water Account Australia 2008-09. (4610.0)**. Canberra: Australian Bureau of Statistics. 2010. Disponível em: < https://www.ausstats.abs.gov.au/Ausstats/subscriber.nsf/0/D2335EFFE939C9BCCA2577E700158B1C/$File/46100_2008-09.pdf>. Acesso em: julho de 2020.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITABIRA – PMI.**Revisão do Plano de Manejo do Parque Natural Municipal do Intelecto (Itabira – MG)**. 2018. Disponível em: <http://meioambiente.itabira.mg.gov.br/wp-content/uploads/2020/02/Resumo-Executivo-PNMI-Versao-Final-Codema-19-06-18.pdf>. Acesso em: maio de 2020.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITABIRA - PMI. **Elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) do Município de Itabira.** 2015. Disponível em: <http://www.itabira.mg.gov.br/portal/wp-content/uploads/2015/09/Produto-3.pdf>. Acesso em: maio de 2020.

SILVEIRA, P. R. **Automação e controle discreto**. 2. ed. Brasil: Editora Érica, 1998.

STARLING, A.N. **Controle e automação I: introdução a instrumentação industrial**. Belo Horizonte, 2003. 102 p

TANENBAUM, A.S. **Redes de computadores.** Elsevier Brasil, 2003.

TOVAR, E. **Introdução à informática industrial.** Disponível em: <http://www.dei.isep.ipp.pt/~emt/infind/ii_1b.pdf>. Acesso em: maio de 2020.

VALE, **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração,** 2011.

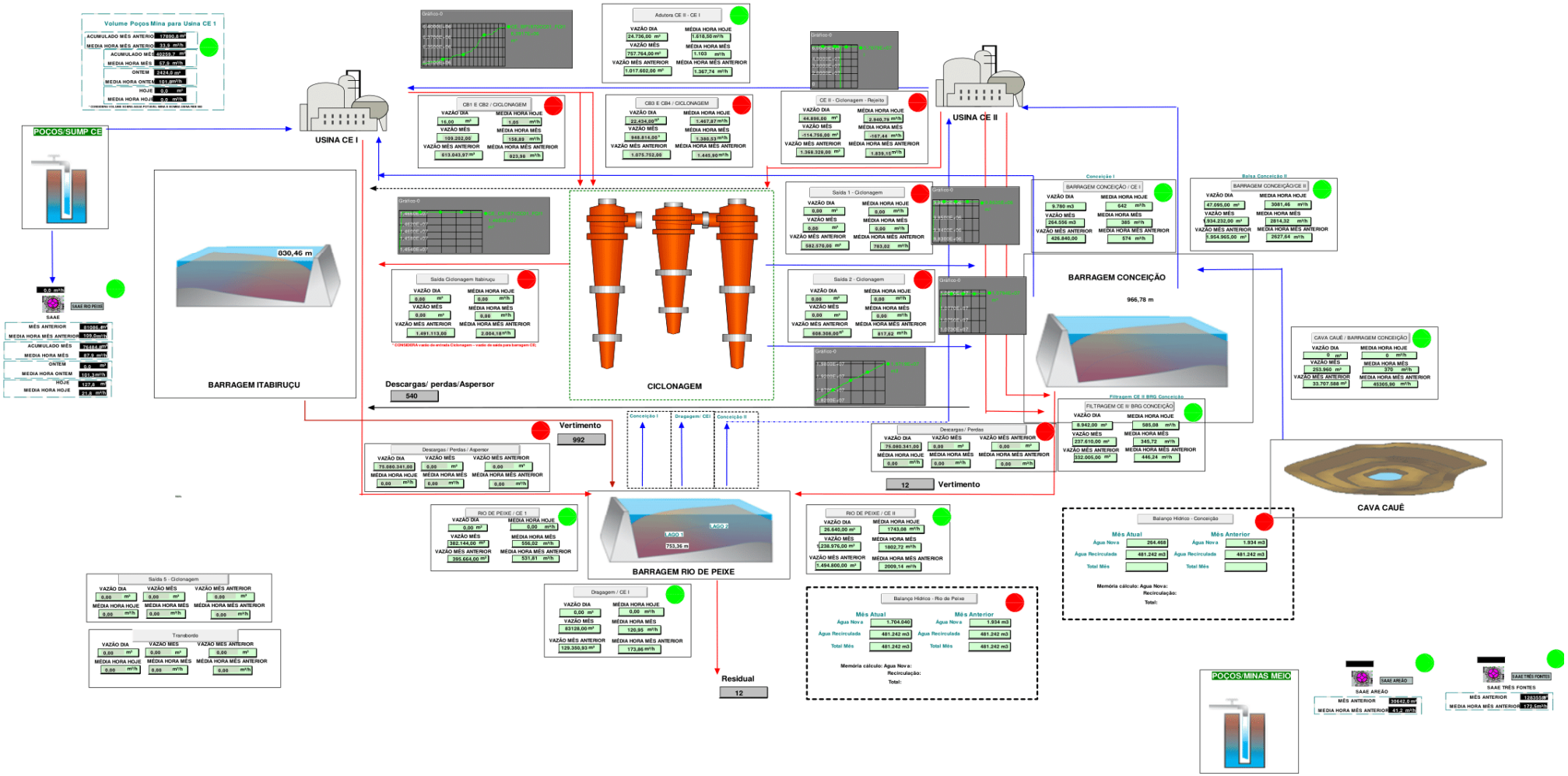
VALE, **Relatório de Produção Anual**, 2017. Disponível em: < http://www.vale.com/PT/investors/information-market/quarterly-results/ResultadosTrimestrais/2016%204Q%20Production%20Report_p.pdf>. Acesso em: nov. de 2019

VALE, **Relatório de Sustentabilidade,** 2017. Disponível em: < http://vale.com/rs2017>. Acesso em: nov. de 2019.

VASCONCELOS, F. B.; ROCHA, M. X.; ALEXANDRIA, A. R. de. **Automação em um Sistema de Tratamento e Distribuição de Água: um estudo de caso.** . Conexões - Ciência e Tecnologia, [s.l.], v. 12, n. 3, p. 25, 21 dez. 2018. IFCE. http://dx.doi.org/10.21439/conexoes.v12i3.1323

VERMEULEN, A. **Water management an important aspect of mine productivity.** 2013. Disponível em: <http://www.miningweekly.com/article/water-management-an-importantaspect-of-mine-productivity-2013-05-03>. Acesso em: mai. de 2019.

YAMAGUCHI, M.Y. **Sincronização das Bases de Tempo de CLPs Distribuídos numa Rede de Automação de Processo Industrial**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

WILLIAMS, T.J. **A Reference Model for Computer Integrated Manufacturing from the Viewpoint of Industrial Automation.** Ifac Proceedings Volumes, [s.l.], v. 23, n. 8, p. 281-291, ago. 1990. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s1474-6670(17)51748-6

ANEXO I
PRODUTO - Painel de monitoramento em tempo real