



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU**



MÁRCIO FLÁVIO SOUSA SILVA

SISTEMA DE MONITORAMENTO ONLINE DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2019

MÁRCIO FLÁVIO SOUSA SILVA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO ONLINE DE BARRAGENS
DE MINERAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Adrielle de Carvalho Santana

Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
Julho/2019

S586s Silva, Márcio Flávio Sousa.
Sistema de monitoramento online de barragens de mineração [manuscrito] /
Márcio Flávio Sousa Silva. - 2019.

106f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientadora: Prof^a. MSc^a. Adrielle de Carvalho Santana.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Mineração - Barragens. 2. Geotécnica - Instrumentação. 3. Geotecnia - automação aplicada. 4. Barragens - Instrumentos - Automação. I. Santana, Adrielle de Carvalho. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br

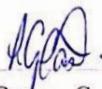
Monografia defendida e aprovada, em 09 de julho de 2019, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Profa. M.Sc. Adrielle de Carvalho Santana – Orientadora



Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis – Professor Convidado



Profa. Dra. Luciana Gomes Castanheira – Professora Convidada

*Dedico este trabalho a minha família,
sobretudo aos meus pais Eugênio e Lourdes, a
minha esposa Adrielhe e a minha filha Maria
Flor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que iluminou e guiou o meu caminho e não permitiu que eu desistisse perante os momentos difíceis de toda essa trajetória.

Agradeço aos meus pais Eugênio e Lourdes que desde sempre me incentivaram a estudar, tudo que tenho conquistado e todos os sonhos alcançáveis são fundamentalmente graças a vocês.

Agradeço aos meus irmãos Marcelo e Shirley, a minha cunhada Heloísa e a minha sobrinha afilhada Samara, por toda ajuda, conselhos e empatia.

Agradeço a todos os meus amigos e familiares que sempre prestaram apoio e me incentivaram.

Agradeço aos amigos do trabalho, em especial as áreas de Instrumentação e Automação que propiciaram a realização deste trabalho.

Agradeço a professora Adrielle pela orientação a esta monografia, além de todo o apoio e motivação desde o meu início na UFOP.

Agradeço especialmente a minha esposa Adrielhe por todos os momentos de apoio, cumplicidade, entendimento, paciência e sacrifício para eu chegar no final dessa etapa. Sem dúvidas, abdicou de muita coisa para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradecimento especial também a minha filha, a Maria Flor, com seu 1 ano e meio, ainda não tem ideia do que seja uma graduação, mas o seu amor incondicional, seu carinho, seu sorriso acolhedor, seus abraços e beijos quando chego em casa, me motivaram ainda mais a concluir este curso.

“Um dia, quando olhares para trás, verás que os dias mais belos foram aqueles em que lutaste.”

Sigmund Freud

RESUMO

As barragens de mineração são muito utilizadas pelas empresas mineradoras para o armazenamento de material que não possui valor econômico em um processo de lavra ou beneficiamento, além de serem utilizadas como depósitos de água para reutilização nos processos internos. Estas instalações são constituídas por grandes estruturas e devido ao seu porte expressivo e aos elevados danos potenciais à vida e ao meio ambiente, associados, requerem monitoramento e inspeção contínuas. O monitoramento das estruturas é realizado por inspeções visuais e análises através das variáveis geradas por um sistema de instrumentação instalado no corpo da barragem que deve ter um objetivo claro e específico. Em muitos dos casos a coleta das informações de instrumentação é feita de forma manual e periódica, o que torna esta tarefa demorada, considerando o período de extração dos dados até a conclusão sobre a estabilidade da estrutura. Neste aspecto, este trabalho propõe um sistema de automatização dos principais instrumentos para monitoramento de barragens de mineração e disponibilizar os dados gerados por eles à organização por protocolo de comunicação OPC, com posterior integração a um sistema de análise geotécnica ou sistemas PIMS, gerando informações *online* e disponíveis para consulta. Foram utilizados recursos tecnológicos como instrumentação *wireless*, integradas a unidades centrais que proveem a comunicação com o sistema de automação e integração a rede corporativa. A implantação de tal solução promoveu a possibilidade da consulta remota e em tempo real dos dados, além do armazenamento desses em um banco com informações históricas para análise pela equipe de especialistas geotécnicos. Este trabalho ainda serve como referência para construção de uma solução de automatização dos principais instrumentos de monitoramento de estruturas de barragens de mineração.

Palavras-chave: Barragens de mineração, instrumentação geotécnica, automação aplicada a geotecnia, automatização de instrumentos de barragens.

ABSTRACT

Mining dams are very used by mining companies for the storage of material that does not have economic value in a mining or beneficiation process, as well as being used as water reservoirs for reuse in internal processes. These facilities are constituted of large structures and due to their expressive size and associated potential damages to life and the environment, require continuous monitoring and inspection. Structural monitoring is performed by visual inspections and analysis through the variables generated by an instrumentation system installed in the body of the dam that must have a clear and specific objective. In many cases, the collection of instrumentation information is done manually and periodically, which makes this task time-consuming considering the period of data extraction until the conclusion about the stability of the structure. In this aspect, this work provide a automation system of the main instruments for monitoring mining dams and to provide the data generated by them to the organization through OPC communication protocol, with later integration to a geotechnical analysis system or PIMS systems, generating information online and available for consultation. Technological resources were used as wireless instrumentation, integrated to central units that provide communication with the automation system and integration to the corporate network. The implementation of such a solution promoted the possibility of remote and real time consultation of the data, besides their storage in a bank with historical information for analysis by the team of geotechnical specialists. This work also serves as reference for the construction of an automation solution of the main tools for monitoring structures of mining dams.

Keywords: Tailings dam, geotechnical instrumentation, automation applied to geotechnics, automation of dam instruments.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1.1 – Quantidades média de rejeitos gerados nos processos de beneficiamento.....	13
FIGURA 1.2 – Principais destinos de rejeitos dentro da mineração em Minas Gerais.....	13
FIGURA 1.3 – Processo sintetizado de uma mineradora.....	14
FIGURA 2.1 – Exemplo de uma barragem de mineração.....	18
FIGURA 2.2 – Esquema de projeto de instrumentação.....	21
FIGURA 2.3 – Diagrama de um programa de instrumentação.....	22
FIGURA 2.4 – Formas de entrada e saída de água das barragens.....	22
FIGURA 2.5 – Esquema de um piezômetro <i>standpipe</i>	24
FIGURA 2.6 – Detalhe do instrumento, instalação e princípio de funcionamento.....	26
FIGURA 2.7 – Esquema de piezômetro hidráulico.....	27
FIGURA 2.8 – Esquema de um piezômetro elétrico.....	28
FIGURA 2.9 – Esquema funcionamento piezômetros corda vibrante.....	29
FIGURA 2.10 – Exemplos piezômetros de corda vibrante.....	30
FIGURA 2.11 – Exemplo de régua graduada instalada em barragem.....	30
FIGURA 2.12 – Exemplo indicador de nível de água.....	31
FIGURA 2.13 – Esquema de um medidor de nível de água.....	32
FIGURA 2.14 – Estrutura do vertedouro triangular.....	34
FIGURA 2.15 – Medidor calha Parshall e equipamento para medição do nível.....	35
FIGURA 2.16 – Exemplo de arquitetura para automatização do monitoramento.....	37
FIGURA 2.17 – <i>Datalogger</i> utilizado em sistemas de automação de barragens.....	38
FIGURA 2.18 – Exemplo de software utilizado na configuração de <i>dataloggers</i>	39
FIGURA 2.19 – Esquema de utilização de <i>gateway</i> de rede.....	40
FIGURA 2.20 – Arquitetura de rede de automação com uso de <i>gateways</i>	41
FIGURA 2.21 – Solução <i>wireless</i> empregada para monitoramento de uma planta.....	43
FIGURA 2.22 – Dispositivos utilizados e função no padrão IEEE 805.14.2.....	44
FIGURA 2.23 – Diferentes topologias de rede para padrão IEEE 805.14.2.....	45
FIGURA 2.24 – Exemplo módulo RF utilizado em sensores de rede sem fio.....	46
FIGURA 2.25 – Evolução do protocolo <i>HART</i>	47
FIGURA 2.26 – <i>Overview</i> arquitetura rede <i>Mesh</i>	48
FIGURA 2.27 – Comparativo topologia <i>mesh</i> e star.....	48
FIGURA 2.28 – Arquitetura do OPC clássico.....	50
FIGURA 2.29 – OPC UA aplicado na pirâmide da automação.....	52
FIGURA 2.30 – Comparação do uso de aplicação do algoritmo de compactação de dados...	53
FIGURA 2.31 – Arquitetura sistema PIMS.....	54
FIGURA 2.32 – Estrutura das <i>tags</i> no sistema PIMS.....	54
FIGURA 2.33 – Pirâmide da automação com as especialidades TA x TI.....	56
FIGURA 2.34 – Exemplo arquitetura de rede DMZ.....	57
FIGURA 3.1 – Modelo do Piezômetro de Corda Vibrante utilizado.....	60
FIGURA 3.2 – Exemplo de equipamento utilizado para aquisição manual dos dados.....	60
FIGURA 3.3 – Arquitetura fornecedor RST automatização de instrumentos geotécnicos.....	62
FIGURA 3.4 – Módulo DT2055B para aquisição e transmissão dos dados dos piezômetros.....	63
FIGURA 3.5 – Detalhe do DT2055B e esquema de ligação.....	64
FIGURA 3.6 – L900 RTU - Master Node.....	64
FIGURA 3.7 – Unidade central para comunicação com os módulos em campo.....	65
FIGURA 3.8 – Exemplo de configuração no <i>LoggerNet</i> e <i>CRBasic Code</i> no aplicativo.....	66
FIGURA 3.9 – Sensor da GE utilizado para automação dos Piezômetros <i>Standpipe</i> e INA...	67
FIGURA 3.10 – Detalhe dos condutores e tubo de ventilação do PTX-1830.....	68

FIGURA 3.11 – Detalhe do adaptador <i>WirelessHART</i> e cabos do sensor GE PTX-1830	69
FIGURA 3.12 – Detalhes da bateria e interligação do sensor de pressão	70
FIGURA 3.13 – Instalação da unidade central da <i>Gateway</i>	71
FIGURA 3.14 – Tela inicial configuração <i>gateway</i> Emerson.....	72
FIGURA 3.15 – Detalhe de informação de um instrumento no <i>gateway</i>	72
FIGURA 3.16 – Detalhe do medidor de nível e vertedouro tipo “V” para cálculo de vazão ..	74
FIGURA 3.17 – Princípio de funcionamento do radar de onda guiada	75
FIGURA 3.18 – Métodos de interligação para configuração do instrumento.....	75
FIGURA 3.19 – KEPServer EX <i>Configuration</i> para os OPC DA Server.....	78
FIGURA 3.20 – OPC UA <i>Configuration</i>	79
FIGURA 3.21 – KEPServer <i>Configuration</i> no servidor da camada DMZ.....	80
FIGURA 3.22 – Esquema geral com implantação da camada DMZ entre TA e TI	81
FIGURA 4.1 – <i>Overview</i> geral da solução implementada	82
FIGURA 4.2 – Leitura piezômetros de corda vibrante	83
FIGURA 4.3 – Leitura dos instrumentos interligados a <i>Gateway</i> Emerson	84
FIGURA 4.4 – Testes das variáveis com o OPC <i>Quick Client</i>	85
FIGURA 4.5 – Visualização das variáveis de vazão do vertedouro pelo PIMS	86
FIGURA 4.6 – Visualização das variáveis de nível da barragem pelo PIMS	86
FIGURA 4.7 – Visualização dos piezômetros de corda vibrante no PIMS	87
FIGURA 4.8 – Tela sinótica para monitoramento dos dados no PIMS	87
FIGURA 4.9 – Monitoramento da estrutura pelo SHMS.....	88
FIGURA 4.10 – Árvore de monitoramento do <i>WhatsUp Gold</i>	89

LISTAS DE TABELAS

TABELA 3.1 – Frequência de inspeções rotineiras	58
TABELA 3.2 – Instrumentos considerados para monitoramento da barragem	59
TABELA 3.3 – <i>Pinout</i> piezômetro de corda vibrante Geokon	61
TABELA 3.4 – Softwares instalados, funções básicas e aplicação.....	76

SUMÁRIO

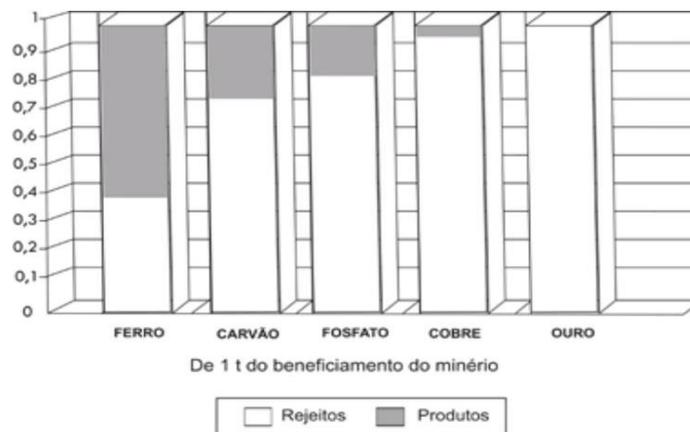
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo geral	16
1.2	Objetivos específicos.....	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Barragens de mineração	17
2.2	Monitoramento de barragens de mineração	18
2.3	Instrumentação de barragens de mineração.....	19
2.3.1	Piezômetros	23
2.3.1.1	Piezômetros de tubo aberto ou Standpipe.....	23
2.3.1.2	Piezômetros pneumáticos.....	25
2.3.1.3	Piezômetros hidráulicos	26
2.3.1.4	Piezômetros elétricos	27
2.3.1.5	Piezômetros de corda vibrante	28
2.3.2	Medição de nível de água.....	30
2.3.3	Medição de vazão.....	32
2.4	Automação em barragens de mineração.....	35
2.4.1	<i>Dataloggers</i>	38
2.4.2	<i>Gateway</i> de rede	39
2.4.3	Redes <i>Wireless</i>	41
2.4.3.1	Padrão IEEE 802.15.4	43
2.4.3.2	Padrão WirelessHART	46
2.4.4	Comunicação OPC	49
2.4.5	Sistemas PIMS	52
3	ESTUDO DE CASO.....	58
3.1	Barragem objeto de estudo	58
3.2	Automação dos Piezômetros de Corda Vibrante.....	59
3.3	Automação dos Piezômetros <i>Standpipe</i> e Indicadores de Nível de Água (INA).....	66
3.4	Automação dos Medidores de Vazão da Drenagem Interna	73
3.5	Comunicação OPC e Sistema PIMS	76
4	RESULTADOS	82
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	90

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS QUANTO AO POTENCIAL DE RISCO E AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO	102

1 INTRODUÇÃO

As atividades de mineração geram um volume significativo de rejeitos nas etapas de lavra e beneficiamento. O crescente consumismo da nossa sociedade e as novas tecnologias propiciam o aproveitamento de minerais de baixo teor ou de maior dificuldade nos processos de beneficiamento. Tal condição gera um aumento expressivo na quantidade de rejeitos produzidos, superando aquela advinda dos próprios minérios, conforme aponta Soares (2010). A figura 1.1 apresenta as quantidades médias de rejeitos e produtos gerados nos processos de beneficiamento.

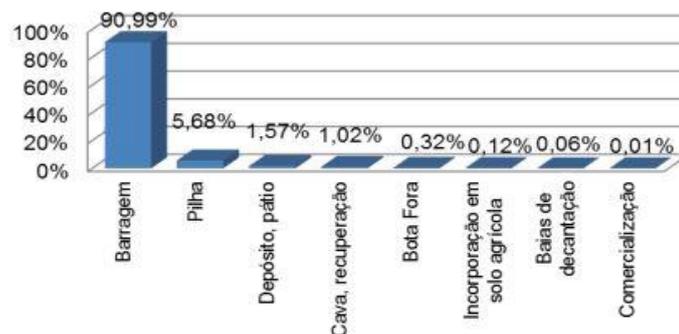
FIGURA 1.1 – Quantidades média de rejeitos gerados nos processos de beneficiamento.



FONTE: Soares (2010)

Existem diversos métodos para alocação dos rejeitos da mineração, mas de acordo com a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, 2017) no estado de Minas Gerais cerca de 91% deles são destinados às barragens, conforme pode ser visto na figura 1.2.

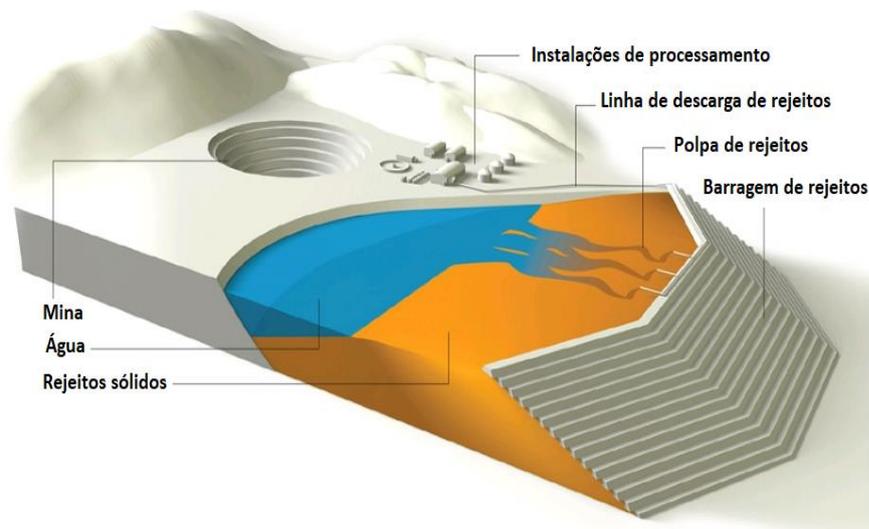
FIGURA 1.2 – Principais destinos de rejeitos dentro da mineração em Minas Gerais.



FONTE: FEAM (2017)

De acordo com a portaria divulgada pelo Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM as barragens de mineração são as estruturas construídas em cota superior à da topografia original do terreno, utilizadas de forma temporária ou não, e que têm por finalidade a contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos de mineração ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração (Brasil, 2017). A figura 1.3 ilustra uma instalação típica de uma planta de mineração, sintetizando o processo desde lavra até a barragem de rejeitos.

FIGURA 1.3 – Processo sintetizado de uma mineradora.



FONTE: The Wall Street Journal – WSJ (2016)

Notavelmente, conforme visto na figura 1.3, as barragens de rejeitos podem ocupar uma área considerável e pelo risco associado a este empreendimento, o monitoramento de tais estruturas é fundamental. Além disso, conforme critérios estabelecidos em Brasil (2017), para as barragens de mineração classificadas com Dano Potencial Associado (DPA) alto, existência de população após estes empreendimentos com pontuação 10 e características técnicas relacionadas ao método construtivo contendo pontuação 10 (a classificação para as barragens quanto ao DPA e a pontuação relacionada a população a jusante ou a respeito do método construtivo, encontra-se no Anexo A deste trabalho); a empresa detentora de tais estruturas é obrigada a manter monitoramento com acompanhamento integral adequado à complexidade da estrutura, sendo de sua responsabilidade a definição da tecnologia, dos instrumentos e dos processos de monitoramento.

O monitoramento das barragens de mineração passou a ser uma prioridade pelas próprias empresas mineradoras e pelos órgãos fiscalizadores, principalmente após os eventos de

rompimento da Barragem do Fundão da empresa Samarco Mineração em 2015 na cidade de Mariana em Minas Gerais, além da Barragem 1 da Mina do Córrego do Feijão na cidade de Brumadinho em janeiro de 2019, também em Minas Gerais.

Como aponta Machado (2007), são utilizados diversos instrumentos nas barragens para medir, entre outros fenômenos físicos, as tensões, deformações, subpressão, percolação, vazão, sismos e deslocamentos. De acordo com Soares (2010), a instrumentação básica para operação e acompanhamento da performance de barragens de rejeito consiste em:

- Piezômetros para a determinação dos níveis de água no corpo da barragem e suas fundações
- Equipamentos para medir velocidade de assentamento dos finos no reservatório e dos materiais grossos no corpo da barragem
- Coletores de água para determinar as vazões que se processam pelo corpo da barragem

A instrumentação disponível no mercado para atender as demandas da área, inclui equipamentos manuais e automatizados. Os manuais apresentam a grande desvantagem da necessidade de coleta manual dos dados, bem como o lançamento no sistema para histórico. Já o sistema automatizado tem como desvantagem o investimento relativamente alto e a necessidade de áreas especialistas (instrumentação, automação, Tecnologia de Informação – TI) para integração dos instrumentos com o sistema de monitoramento da empresa.

As vantagens dos sistemas automatizados no processo de monitoramento das barragens são diversas, dentre as quais, conforme aponta Veloso *et al.* (2007), podem-se citar:

- Leitura *online* das variáveis, auxiliando com uma maior rapidez para as tomadas de decisão diante de situações anômalas;
- Melhora na documentação dos dados, uma vez que serão armazenados em arquivos eletrônicos, evitando assim a interferência humana para inserção dos dados;
- Disponibilização dos dados para todos os integrantes da equipe responsável pelo monitoramento da barragem simultaneamente;
- Melhoria na análise dos dados, tendo em vista que será possível gerar gráficos em tempo real, fazer comparações e correlações entre as medidas;
- Confiabilidade dos dados obtidos.

Neste trabalho é apresentada uma sugestão para automatização do monitoramento da instrumentação de uma barragem, que em inúmeros casos, é realizado de forma manual. Um estudo de caso de aplicação deste sistema também é apresentado, bem como os resultados obtidos com esta implementação.

1.1 Objetivo geral

Apresentar uma sugestão para monitoramento online dos instrumentos de uma barragem de mineração. São especificados os instrumentos básicos e a sua integração em um sistema de comunicação para leitura e armazenamento das informações remotamente para uma organização.

1.2 Objetivos específicos

Propor a automatização do sistema de instrumentação básica de uma barragem de mineração, de forma que as informações coletadas em campo sejam disponibilizadas para análise em tempo real e que elas possam ser historiadas em um banco de dados. Além disso, pretende-se com esse trabalho, monitorar os ativos envolvidos no sistema e apresentar um estudo de caso da implementação da automatização da instrumentação básica de uma barragem na região das cidades de Mariana e Ouro Preto, em Minas Gerais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Barragens de mineração

De acordo com Machado (2007), as barragens de rejeitos são estruturas construídas pelas empresas mineradoras para reunir e armazenar os rejeitos produzidos em larga escala no processo de beneficiamento do minério. Maturano (2012) complementa essa definição ao apontar que uma barragem de rejeito é uma estrutura de terra construída para armazenar os rejeitos da mineração, estes por sua vez são definidos como uma fração estéril obtidos pelo beneficiamento do minério em processos que separam o minério bruto em concentrado e rejeito. A figura 2.1 ilustra uma barragem instalada em uma planta de mineração.

Em documento disponível em seu site, a Samarco (2016) aponta que as barragens de mineração funcionam como uma barreira para estes resíduos e que a medida em que são depositados, a parte sólida se acomoda no fundo destes reservatórios e a água decantada na parte superior é drenada e tratada, com parte sendo reutilizada no processo e parte sendo devolvida ao meio ambiente.

A Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 13028 tem como objetivo especificar os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projetos de barragens de mineração, que incluem as barragens para disposição de rejeitos, as barragens de contenção de sedimentos gerados por erosão e os reservatórios de água para os processos de mineração. Ela conceitua as barragens como barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos que são associados às atividades minerárias e que são utilizados para contenção, acumulação ou decantação do rejeito proveniente dos processos de mineração ou descarga de sedimentos gerados pelos processos de mineração, onde pode haver ou não a captação de água e que compreende a estrutura do barramento e as demais associadas. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

FIGURA 2.1 – Exemplo de uma barragem de mineração



FONTE: Revista Mineração (2018)

Conforme exemplo apontado pela figura 2.1, pelo porte de tais estruturas e os riscos associados a estas instalações, faz-se necessário um projeto bem elaborado e executado. Além disso, o monitoramento desde o projeto até a saturação do empreendimento deve ser contínuo, a fim de verificar com antecedência possíveis anomalias que possam vir a fragilizar a estrutura.

2.2 Monitoramento de barragens de mineração

O monitoramento das barragens de mineração é de responsabilidade do empreendedor e os registros devem ser armazenados e reportados aos órgãos competentes. A portaria 70389 divulgada em maio de 2017 pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) aponta que as empresas detentoras de barragens de mineração deveriam implementar sistema de monitoramento de segurança com limite de 24 meses após a publicação deste documento. Além disso, a complexidade do sistema de monitoramento depende da classificação do Dano Potencial Associado (DPA), que caso seja considerado alto, onde exista população após a barragem com pontuação 10, e as características de construção contendo pontuação 10, exige que este acompanhamento seja integral, sendo de responsabilidade da empresa a escolha da tecnologia, dos instrumentos e processos de monitoramento.

Segundo Junior, Moreira e Heineck (2018) é necessário que as barragens tenham monitoramento e controle com certa periodicidade a fim de prever comportamentos de deformação das barragens. Para Castro (2008), além do monitoramento detalhado, o próprio programa de monitoramento deve passar por constante avaliação, analisando sua performance

e verificando se as condições apresentadas estão sendo satisfatórias. Ele ainda cita que o projeto construtivo bem elaborado, servirá como o primeiro passo para o monitoramento da barragem e que este deve fornecer as condições para que o responsável avalie a eficiência da instrumentação instalada e quando será necessário ajustá-la.

A norma ABNT 13028 em sua seção de requisitos para a elaboração e apresentação do projeto no capítulo 5.4.16 no item “i”, exige que sejam considerados o manual de operação da estrutura incluindo procedimentos de inspeção de campo e monitoramento. Para o monitoramento a norma rege que devem ser indicados os elementos a serem monitorados, a frequência da inspeção de campo, as leituras dos instrumentos e os critérios de análise dos dados obtidos.

Portanto, conclui-se que o monitoramento efetivo das barragens de mineração depende das inspeções em campo, realizadas por uma equipe técnica e por informações de variáveis que suportam a tomada de decisões acerca da integridade das estruturas. Diversos autores como Machado (2007), Castro (2008), Soares (2010) apontam em seus trabalhos que os principais dados a serem amostrados para o monitoramento das barragens estão ligados às diferentes formas de entrada e saída da água do reservatório que apontarão as variações hidrostáticas das estruturas e conseqüentemente a sua estabilidade. Estas informações fundamentais são obtidas com o uso de um sistema de instrumentação implementado nas barragens de mineração e que auxiliarão nas tomadas de decisão, apresentando o real estado das estruturas.

2.3 Instrumentação de barragens de mineração

A instrumentação de barragens é importante para assegurar o constante monitoramento de suas estruturas, obtendo maior segurança e confiabilidade com relação a estabilidade deste empreendimento e, além disso, para cumprir os requisitos legais (VIEIRA, 2017).

Para Silveira (2006), todo instrumento deve ser selecionado e instalado com alguma finalidade clara e específica. Ele ainda cita que planejar o monitoramento com uso de sistemas de instrumentação é similar a outros projetos de Engenharia, ao passo que deve ser realizado partindo da definição de um objetivo e então para o planejamento de como os parâmetros necessários para a medição serão implementados.

Existe a necessidade de soluções individuais para a instrumentação das barragens de mineração pois cada uma representa uma situação única. O projetista precisa entender a quais fenômenos

físicos e mecânicos os instrumentos estarão submetidos na instalação em campo e como será o desempenho deles sob as condições de trabalho (MACHADO, 2007).

A instrumentação das estruturas, como aponta Fonseca (2003), permite fazer um processo de aquisição, registro e processamento detalhado dos dados obtidos, a partir dos instrumentos de medida instalados em diferentes seções e zonas das barragens. As análises incluem os limites de cada ponto monitorado em um programa de instrumentação para agilizar a detecção de possíveis anomalias. Dessa maneira, um programa de instrumentação tende a garantir acurácia e fornecer parâmetros relacionados à confiabilidade das leituras e alinhamento entre os critérios de projeto e da metodologia construtiva.

Segundo Gaioto (2003) os instrumentos instalados em barragens ou em sua fundação podem fornecer informações a respeito do seu comportamento, sendo que em fase do projeto do empreendimento contribuem indicando a possibilidade de adequação e revisão, já durante a operação apontam os possíveis desvios que requerem ações corretivas. Além disso, servem como base de dados e parâmetros para construção de novos projetos.

Para Soares (2010), a instrumentação das barragens tem a finalidade de assegurar a segurança ambiental e das estruturas do empreendimento. No que tange o comportamento estrutural das barragens, a aplicação da instrumentação deve ter como diretriz as fases principais da obra que são a implantação, operação e desativação.

Há um alinhamento dos autores com relação às premissas e objetivos da instrumentação nas diferentes fases citadas da utilização das barragens de mineração, abaixo segue a síntese bem descrita apontada por Soares (2010).

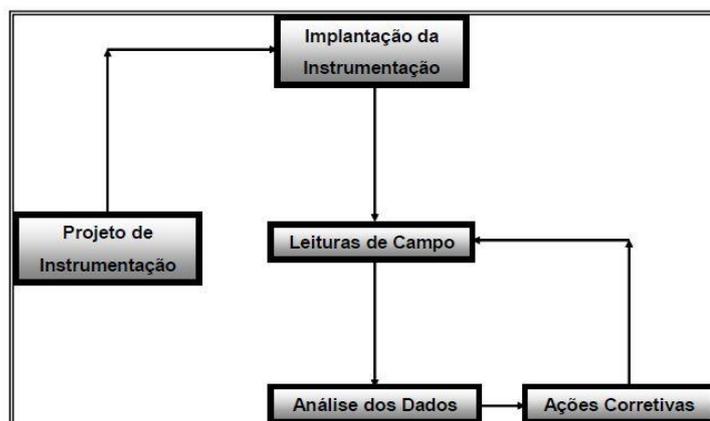
- Fase de implantação das barragens:
 1. Indicar eventos de anomalias no comportamento das barragens ou de situações que possam favorecer o surgimento de aspectos incompatíveis com o esperado em projeto;
 2. Sugerir revisões no projeto, uma vez que as soluções até tal fase se mostrem conservadoras demais, ou o oposto, indicando a redução ou necessidade de aditivo a obra.

- Fase de operação das barragens:
 1. Indicar eventos de anomalias que possam comprometer a estabilidade das estruturas;
 2. Avaliar o desempenho das estruturas comparando as medidas apontadas pelos instrumentos com aquelas esperadas por modelos matemáticos teóricos;
 3. Auditar a conformidade dos critérios utilizados do projeto;
 4. Avaliar o desempenho geral da barragem, conforme previsto em projeto;
 5. Caracterizar o comportamento dos materiais das estruturas com o desenvolvimento da obra, no intuito de levantar os parâmetros de tempo para estabilização dos deslocamentos, das tensões internas, estabilização das vazões, dentre outros.

- Fase de desativação:
 1. Avaliar a estabilidade estrutural resultante do lançamento de rejeitos;
 2. Avaliar o desempenho estrutural, através das medições de tensão interna, variações de vazão, dentre outros.

Como visto, o emprego de instrumentos para o monitoramento das barragens de mineração requer projeto bem elaborado, além de um programa de instrumentação que deve ser um mecanismo vivo para acompanhamento e avaliação dos dados. A Figura 2.2 apresenta o esquema sintetizado de projeto de instrumentação.

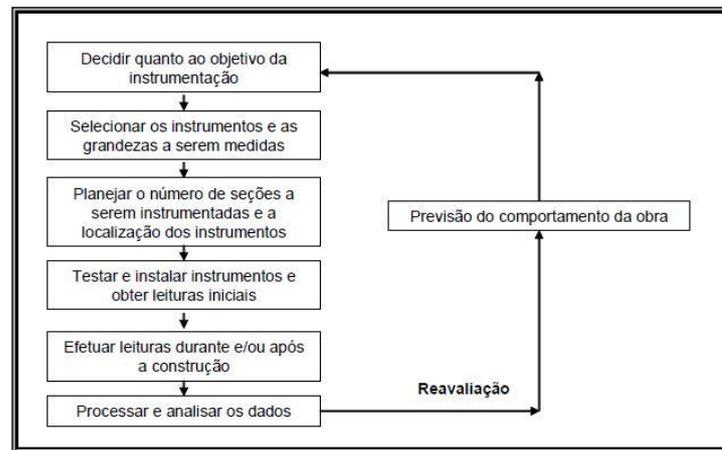
FIGURA 2.2 – Esquema de projeto de instrumentação



FONTE: Machado (2007)

O programa de instrumentação visa sobretudo a adequação do monitoramento da obra aos parâmetros necessários para acompanhamento da saúde da barragem e deve ser um mecanismo ativo e sempre reavaliado. A figura 2.3 apresenta um esquema de programa de instrumentação.

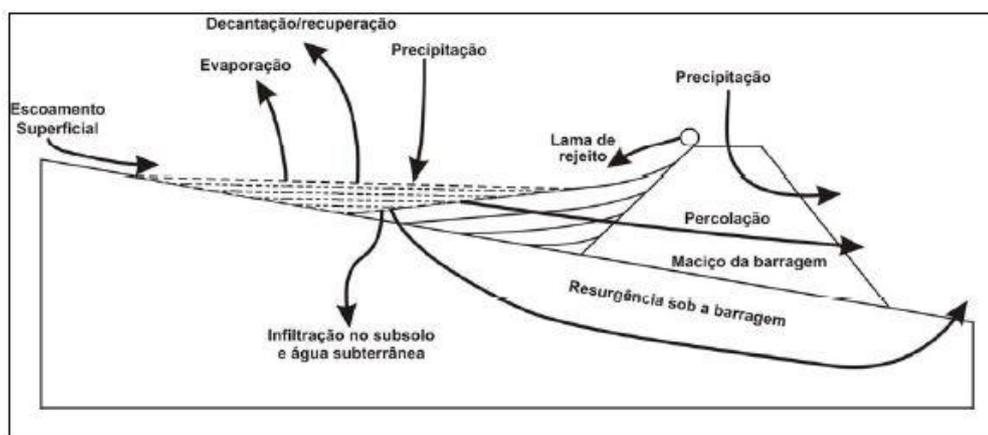
FIGURA 2.3 – Diagrama de um programa de instrumentação



FONTE: Machado (2007)

Os principais dados monitorados pelos instrumentos são os de piezometria, vazão de jusante, pluviometria, nível de água do reservatório e os marcos topográficos superficiais. Como já descrito, tais informações apresentarão principalmente o comportamento da variação de água no reservatório e nas estruturas, além da capacidade da barragem em absorver, drenar e vertê-la para a jusante. A figura 2.4 apresenta genericamente os principais meios de entrada e saída de água dos reservatórios das barragens de mineração.

FIGURA 2.4 – Formas de entrada e saída de água das barragens



FONTE: Castro (2008)

2.3.1 Piezômetros

A instrumentação geotécnica com o uso de piezômetros é amplamente utilizada para monitoramento e previsão do comportamento de barragens em todo o mundo conforme aponta Machado (2007).

A avaliação das condições das barragens depende geralmente do conhecimento da amplitude e evolução das pressões internas que se desenvolvem nos maciços compactados e nos solos de fundação das estruturas. Além disso, é necessário o controle e monitoramento das poropressões nas zonas de contatos com estruturas de concreto e no sistema de drenagem interna da barragem para avaliar o desempenho das funções de dreno e filtro dos materiais empregados durante a construção. Os piezômetros são os instrumentos convencionalmente utilizados para essas medidas de poropressões nos empreendimentos geotécnicos. Eles podem ter diferentes naturezas e princípio de funcionamento (FONSECA, 2003).

Mudanças no estado de tensão do solo resultam em deformações que por sua vez, podem ser decorrentes de variações do nível do lençol freático, e por consequência, das poropressões que existem no subsolo. Os piezômetros são instrumentos utilizados para determinação dos valores de poropressões no monitoramento geotécnico. Estes instrumentos são instalados em um furo preenchido com areia na região de interesse onde será determinado o valor de poropressão, acima deste ponto utiliza-se uma camada de material impermeável e o restante do furo com uma mistura de cimento e bentonita. A presença de camadas impermeáveis de solos argilosos, resulta em poropressão no solo e estes valores são determinados pelo aumento da coluna d'água no interior dos piezômetros (SESTREM, 2012).

Existem diversos tipos de piezômetros disponíveis no mercado. Conforme citado por Machado (2007), Castro (2008), Soares (2010), Fonseca (2003) e Sestrem (2012) os mais comuns são os piezômetros de tubo aberto ou *Standpipe*, pneumáticos, hidráulicos, elétricos e corda vibrante.

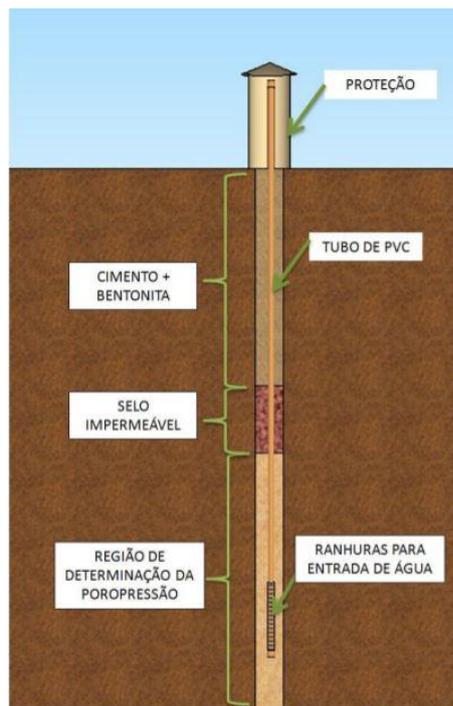
2.3.1.1 *Piezômetros de tubo aberto ou Standpipe*

Os piezômetros de tubo aberto são frequentemente utilizados nos programas de instrumentação de barragens. Convencionalmente são instalados nas fundações, ombreiras e em zonas específicas no próprio maciço da barragem. São constituídos por um tubo de PVC cuja parte inferior é acoplada a um trecho perfurado de tubo envolvido por material geotêxtil, trecho

chamado de célula. A célula é instalada em um bulbo de material drenante e confinada em um trecho limitado por uma camada selante para vedar o espaço entre o tubo e o furo. A pressão da água na região do bulbo é convertida diretamente em uma altura da água equivalente (FONSECA, 2003).

Como estes piezômetros são instalados em furos de sondagem de maior diâmetros, a água fica livre para fluir através da célula, sendo estabilizada no tubo de ascensão à altitude piezométrica. Mede-se a poropressão através da coluna d'água no tubo. A figura 2.5 ilustra o piezômetro *Standpipe*. A leitura é realizada por um medidor de nível de água que consiste em uma sonda elétrica com uma fita graduada e um carretel. Quando a sonda toca a água no interior do tubo é emitido um sinal sonoro ao operador, com isso, mede-se a distância que o sensor desceu determinando a profundidade do nível de água (RIZZO, 2007).

FIGURA 2.5 – Esquema de um piezômetro *standpipe*



FONTE: Sestrem (2012)

Como aponta Silveira (2006), a água passa pelos filtros do bulbo drenante do piezômetro até atingir o equilíbrio com a poropressão das estruturas. Portanto, a poropressão corresponde à altura da água acima do bulbo do equipamento. Ele ainda cita que os primeiros piezômetros utilizavam como elemento poroso uma vela de filtro, sendo conhecidos como Piezômetros Casagrande, nome dado devido ao seu criador Arthur Casagrande.

A limitação do instrumento de tubo aberto ocorre principalmente pois as medições são realizadas manualmente e requerem operador experiente. Como já citado é utilizado um equipamento graduado de metro em metro que emite um sinal quando a sonda de nível entra em contato com a água. Quando esta medição é realizada ele deve anotar este valor. Sabendo-se a elevação topográfica do tubo, calcula-se a elevação do nível de água no interior do tubo que neste caso é a cota piezométrica ao redor do bulbo (MACHADO, 2007).

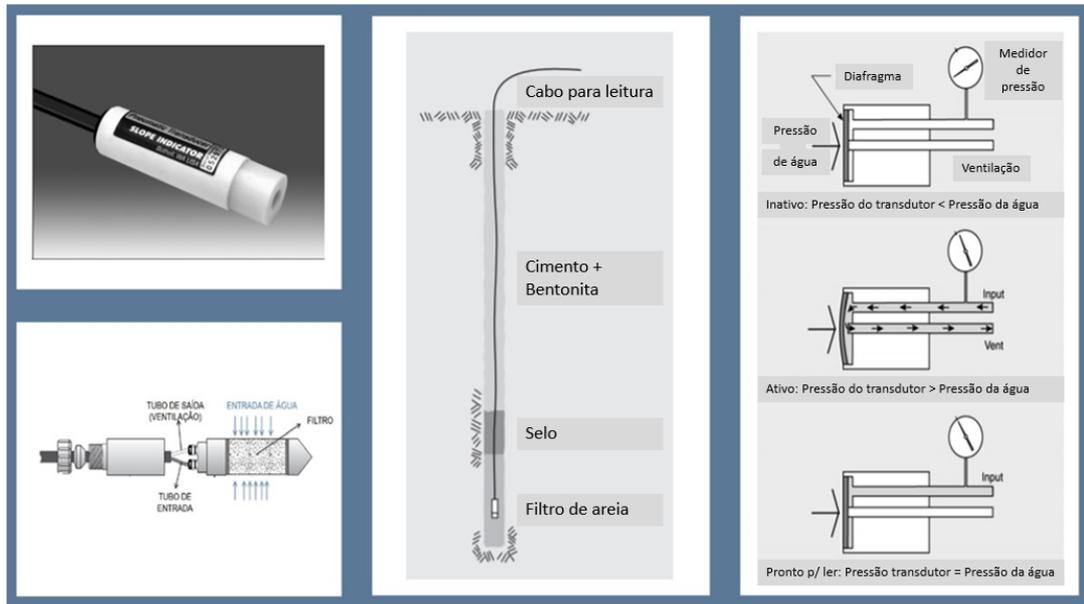
2.3.1.2 *Piezômetros pneumáticos*

Os piezômetros devem refletir com exatidão e maior rapidez possível as variações de poropressões nas estruturas das barragens. Diante tais requisitos há a necessidade de uso de instrumentos que precisam de pouca drenagem da água intersticial para serem ativados plenamente. Os piezômetros pneumáticos têm essas características e são muito utilizados. Eles realizam as medições através de um processo pneumático com a injeção de um gás que geralmente é o nitrogênio que tem por objetivo buscar a equalização das pressões internas na célula piezométrica e forçar a deflexão de um diafragma. Esta célula piezométrica é ligada a um medidor de pressão (manômetro) através de um tubo de alimentação e um tubo de retorno (FONSECA, 2003).

Em funcionamento, a pressão da água comprime a membrana do instrumento em um lado e o gás no outro. Para a realização da leitura o indicador pneumático é conectado diretamente a tubulação. Quando a pressão do gás assume valores superiores ao da água o diafragma é forçado além do tubo de ventilação, e dessa forma, o excesso de gás é retirado pelo escape. O instrumento então detecta este refluxo de gás na superfície que é imediatamente cortado. Assim, a pressão do gás vai caindo gradativamente até que a pressão da água faça com que a membrana assumira a posição inicial. Neste instante, a pressão do gás se iguala a da água sendo possível medir de forma indireta o valor da poropressão (SESTREM, 2012).

De acordo com Machado (2007), na leitura do instrumento, é aumentada gradativamente a pressão do gás comprimido e observa-se a indicação de refluxo no painel do equipamento. Neste momento, as válvulas de pressão de gás são fechadas e aguarda-se a estabilização da pressão lida no manômetro. A figura 2.6 apresenta o exemplo de um piezômetro pneumático, bem como o esquema de funcionamento e instalação.

FIGURA 2.6 – Detalhe do instrumento, instalação e princípio de funcionamento.



FONTE: DGSÍ (2017) – Adaptado

2.3.1.3 Piezômetros hidráulicos

De acordo com Gaioto (2003), os piezômetros hidráulicos são instrumentos que possuem uma célula constituída de um elemento poroso conectada a um par de tubos que são interligados a um terminal de leitura. O princípio de funcionamento assemelha-se aos piezômetros pneumáticos exceto que o meio transmissor de pressão é um fluido líquido. As poropressões das estruturas em contato com a célula são transmitidas pelos tubos até manômetros para indicação local.

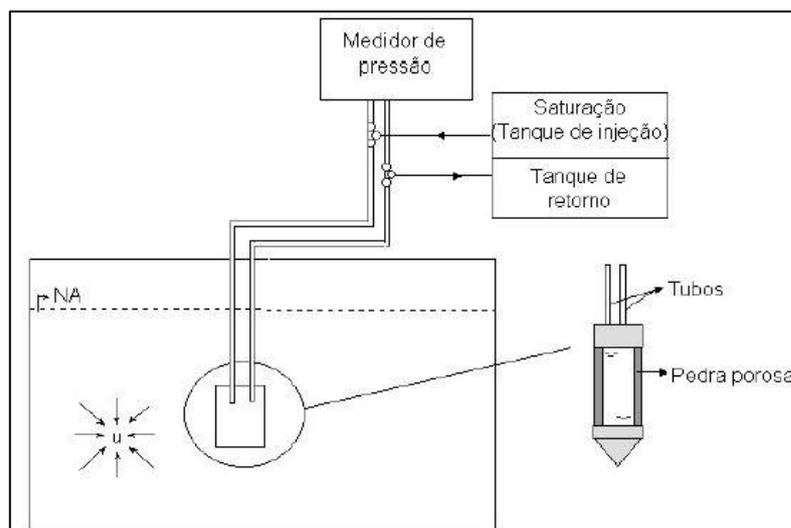
Sestrem (2012) afirma que a leitura em ambas as tubulações devem ser as mesmas e caso estejam diferentes, um procedimento de circulação de água deaerada deve ser realizado para remover as bolhas de ar no sistema até que a pressão seja equalizada.

Conforme salienta Rizzo (2007), os piezômetros hidráulicos de dois tubos foram amplamente utilizados em barragens e obras de solo mole até os anos 70, mas têm instalação e operação complexa.

Por meio da pedra porosa, a água das estruturas da barragem está em contato direto com a água do interior da tubulação do instrumento e do painel de leitura. Dessa maneira, qualquer variação de poropressão na localização da célula será transmitida ao indicador externo de pressão que

podem ser manômetros mecânicos ou de mercúrio, transdutores de pressão, dentre outros. A leitura da pressão é realizada abrindo registros que conectam um dos tubos aos medidores externos e aguardando a estabilização da variável. A figura 2.7 apresenta um esquema deste instrumento (FONSECA, 2003).

FIGURA 2.7 – Esquema de piezômetro hidráulico



FONTE: Fonseca (2003)

2.3.1.4 Piezômetros elétricos

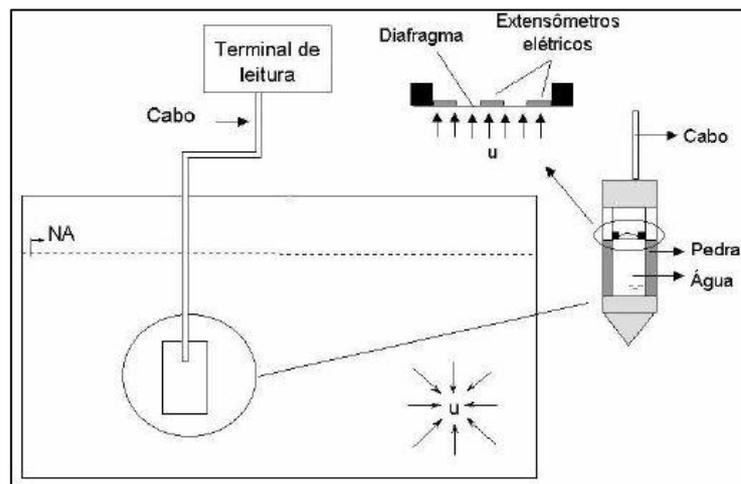
De acordo com Fonseca (2003), os piezômetros elétricos são equipamentos constituídos de um diafragma de aço inoxidável onde são fixados extensômetros de resistência elétrica. A deformação deste diafragma gera uma alteração no valor da resistência elétrica dos extensômetros fixados à sua superfície e por consequência alteração no valor do sinal elétrico resultante que é proporcional à poropressão do interior da estrutura da barragem. Este sinal elétrico é então lido por uma unidade que realiza a conversão entre o sinal elétrico e o sinal de pressão do interior do barramento.

Para Gaioto (2003), a poropressão no interior da barragem é transmitida através da célula constituída de uma pedra porosa o que provoca a deflexão de um diafragma. No outro lado do diafragma ocorre uma variação pneumática e a posição de equilíbrio deste diafragma é indicada por um circuito elétrico que se fecha quando a pressão pneumática se estabiliza com a pressão da água.

Conforme aponta Niz (2010), estes instrumentos têm funcionamento baseado em uma ponte de *Wheatstone*. As variações das poropressões são mecanicamente transmitidas a uma resistência elétrica que apresentará uma variação equivalente de acordo com as mudanças de pressão. A variação da resistência elétrica de acordo com a lei de *ohm* irá gerar uma variação no valor da tensão elétrica que será proporcional a pressão onde um transdutor deverá ser instalado.

Estes instrumentos são frequentemente utilizados para automação dos piezômetros *Standpipe*, têm a característica de medições dinâmicas pois os dados podem ser registrados de forma contínua. Entretanto, existe a necessidade de instalação de um transdutor para cada local onde será utilizado, bem como a rotina de calibração do equipamento. A figura 2.8 apresenta um exemplo de piezômetro de resistência elétrica (SILVEIRA, 2006).

FIGURA 2.8 – Esquema de um piezômetro elétrico



FONTE: Fonseca (2003)

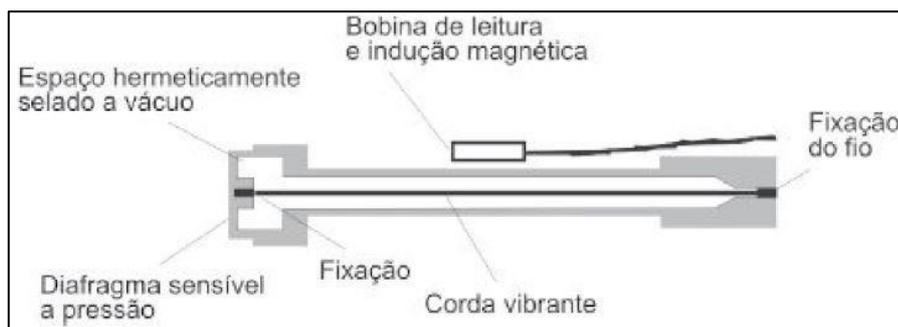
2.3.1.5 Piezômetros de corda vibrante

De acordo com Dunnicliff (1988), os piezômetros de corda vibrante são instrumentos constituídos de um fio tensionado que é conectado a um diafragma interno e a uma pedra porosa que ao ser submetida a poropressão das estruturas, provoca deformação e conseqüente mudança no tensionamento do fio. Tais variações são então transmitidas pela corda vibrante e enviadas a um transdutor.

Segundo Silveira (2006), a pressão da água intersticial no interior da barragem é transmitida pela pedra porosa ao diafragma interno do instrumento e a deflexão é medida por um transdutor

de corda vibrante que é instalado perpendicular ao plano do diafragma. A figura 2.9 ilustra o esquema de funcionamento deste equipamento. Ainda segundo Silveira (2006) tais piezômetros têm sido frequentemente empregados ao monitoramento de barragens, devido a sua precisão, alta sensibilidade e possibilidade de integração a um sistema automatizado uma vez que podem ser lidos a distância.

FIGURA 2.9 – Esquema funcionamento piezômetros corda vibrante



FONTE: Silveira (2006)

A corda do instrumento é um fio de aço tensionado que passa através de um eletroímã. Quando a água interna das estruturas passa pela pedra porosa e aplica determinada deformação no diafragma ocorre conseqüentemente a tensão da corda que passa a vibrar. A vibração neste fio, devido as variações magnéticas, provoca uma oscilação elétrica de frequência proporcional que é transmitida ao painel de leitura por cabos elétricos blindados para evitar interferências eletromagnéticas. Assim, a medida da variação de frequência de oscilação da corda vibrante é correlacionada às pressões atuantes sobre o diafragma (FONSECA, 2003).

De acordo com Niz (2010), tais instrumentos assim como os piezômetros de resistência elétrica podem ser fixados diretamente em furos de sondagem ou também utilizados para automação dos piezômetros *Standpipe*, entretanto, o uso destes equipamentos impõe a necessidade de uso de um equipamento para cada painel de leitura.

Em sua obra, Rizzo (2007) aponta que além da possibilidade de automação das leituras, os sinais de frequência podem ser transmitidos por distâncias até 2km sem perda de qualidade e imune à influência de resistência do cabo, além de não ser influenciado por fatores como presença de umidade e água em contato com os cabos. A figura 2.10 apresenta alguns exemplos de piezômetros de corda vibrante.

FIGURA 2.10 – Exemplos piezômetros de corda vibrante



FONTE: Geonor (2019)

2.3.2 Medição de nível de água

A medição do nível de água no reservatório da barragem juntamente as medidas dos piezômetros, das vazões de percolação e dos pluviômetros contribuirá para uma avaliação fidedigna a respeito da estabilidade das estruturas. Esta medição pode ser realizada com a instalação de réguas graduadas no próprio reservatório, nas quais as cotas de elevação da estrutura devem estar explícitas, tais condições são práticas comuns nas barragens de mineração. A figura 2.11 apresenta um exemplo de régua graduada instalada em uma barragem (CASTRO, 2008).

FIGURA 2.11 – Exemplo de régua graduada instalada em barragem



FONTE: DIG (2017)

Para Fonseca (2003), a informação do nível do lençol freático no interior das estruturas da barragem é imprescindível para realização das análises de sua estabilidade ou para interpretação dos resultados piezométricos. A aplicação destes instrumentos para medição de nível de água das estruturas, baseia-se em acessar diretamente a água em profundidade e realizar a medição da cota da superfície. Geralmente o acesso a água é realizado por meio simples como a sondagem ou furos de trado e na medição da cota utiliza-se comumente um cabo graduado que possui um sensor na extremidade inferior e que emite um sinal sonoro e luminoso quando alcança a água. A figura 2.12 apresenta em exemplo o medidor do nível de cota de água.

FIGURA 2.12 – Exemplo indicador de nível de água

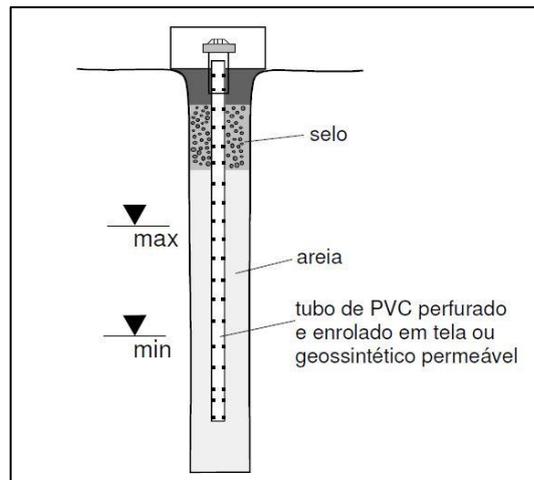


FONTE: Agsolve (2019)

Conforme aponta Machado (2007), o medidor de nível de água é certamente o instrumento mais simples de ser construído e operado e tem objetivo de determinar o nível do lençol freático na estrutura. Este instrumento tem a mesma configuração do piezômetro, utilizando-se um tubo geralmente de PVC com furos na extremidade inferior permitindo a entrada de água. Além disso, nesta parte, coloca-se uma tampa estanque e esta região é envolvida com material filtrante como manta geotêxtil. Após instalação e operacionalidade deste medidor, deve ser realizada uma leitura para referencial “zero” do instrumento, a partir do qual serão baseadas as análises.

Para Rizzo (2007), que intitula tais instrumentos como indicadores de nível de água, estes são adaptações dos piezômetros de tubo aberto, possuem o mesmo princípio de funcionamento, mas o bulbo situado na região da variação do nível de água tem comprimento maior se comparado ao primeiro. A figura 2.13 apresenta o esquema de instalação de um medidor de nível de água.

FIGURA 2.13 – Esquema de um medidor de nível de água



FONTE: Georio (2000)

De acordo com Niz (2010), a medição de nível pode ser totalmente automatizada, mas há a necessidade de implementação de um transdutor em cada ponto. Para isso, seriam utilizados transmissores de pressão hidrostáticos, o que consiste em um método simples e um dos mais utilizados na indústria para medição de nível de fluidos com densidade constante. O sensor é suspenso por um cabo e posicionado no local onde deseja-se realizar a medição. O valor do nível será determinado em função da pressão exercida pela coluna do líquido no diafragma do transdutor.

2.3.3 Medição de vazão

Os valores da medição de vazão possuem correlação direta com a análise de desempenho de uma barragem de mineração. Algumas características de localização, de quantidade e qualidade da água que passa pela barragem ou por sua fundação, além de variações significativas dessas características, traduzem possíveis problemas na estrutura como obstrução de drenos, erosão interna e aumento de poropressões. Tais condições são mais visíveis durante a operação da barragem, quando os valores de referência já estão definidos (FONSECA, 2003).

De acordo com Castro (2008), a medição de vazões de drenagem e das infiltrações pelo corpo da barragem são importantes do ponto de vista de segurança das estruturas e devem ser analisadas com certa prioridade quando deseja-se verificar tais aspectos. Para barragens de pequeno porte pode-se utilizar de métodos simples para a obtenção da vazão, bastando apenas

coletar um volume conhecido em um tempo cronometrado e calcular a vazão (Q) conforme equação 2.1:

$$Q = \frac{V}{T} \quad (2.1)$$

Onde,

Q: Vazão calculada (L/min)

V: Volume coletado (L)

T: Intervalo de tempo de coleta (min)

Para empreendimentos de médio e grande porte onde a medição indireta seja inviável, existem alguns métodos como o medidor triangular, retangular ou trapezoidal e as chamadas calhas Parshall. Para os medidores triangulares é recomendada a faixa de 0 à 600L/min, atingindo um máximo de 8000 L/min, já para medidores retangulares este valor pode chegar até a 40000 L/min (SILVERA, 2006).

De acordo com Fonseca (2003), o procedimento típico para a medição de vazão consiste em desviar o fluxo das barragens para caixas e galerias de concreto, nas quais são instalados vertedouros triangulares, retangulares ou calhas Parshall. Para vazões mais reduzidas os triangulares permitem mais precisão, sendo os mais apropriados. Neste caso, o fluxo de água é direcionado e passa através de uma chapa metálica com abertura triangular em “V” com lados ortogonais e iguais (para este caso, o ângulo de abertura de 90°) e é medido o valor da lâmina de água neste vertedouro, conforme apresentado na figura 2.14. A vazão é obtida através da fórmula de Thompson conforme expressão 2.2:

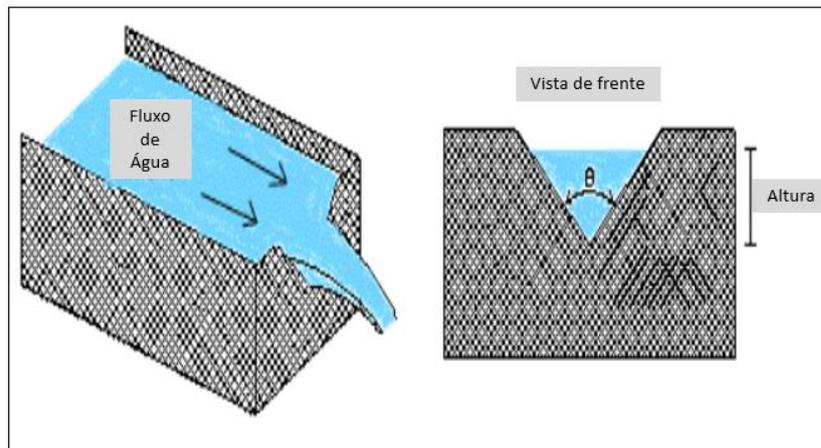
$$Q = 1,4 \times H^{\frac{5}{2}} \quad (2.2)$$

Onde,

Q: Vazão (m³/s)

H: Altura da lâmina de água (m)

FIGURA 2.14 – Estrutura do vertedouro triangular



FONTE: Irrigation (2019) – Adaptado

De acordo com Azevedo Netto (1952), os medidores Parshall foram inicialmente idealizados com o objetivo de irrigação. Consistem em uma seção convergente, uma seção estrangulada ou garganta pela qual, diante de sua largura, são geralmente indicados e uma seção divergente.

Os tamanhos das calhas Parshall são dimensionados pelas larguras das gargantas. Apesar de existir uma norma brasileira para este assunto, a maior parte destes equipamentos são designados conforme norma da *American Society for Testing & Materials* (ASTM) 1941:1:1975. A medição de vazão pode ocorrer por escoamento livre quando a vazão é obtida através da medição da lâmina de água na seção convergente ou por escoamento afogado em que a vazão real apresentará valor inferior àquela obtida com as fórmulas comuns e tabela e, neste caso, um fator de correção negativo deverá ser empregado (NUNES, 2016).

De acordo com Fonseca (2003), estes medidores são dispositivos para medição de vazão em canais abertos e a partir da altura da lâmina da água na seção convergente é possível encontrar o valor de vazão pela aproximação com a seguinte relação:

$$Q = 2,2 \times W \times H^{\frac{3}{2}} \quad (2.3)$$

Onde,

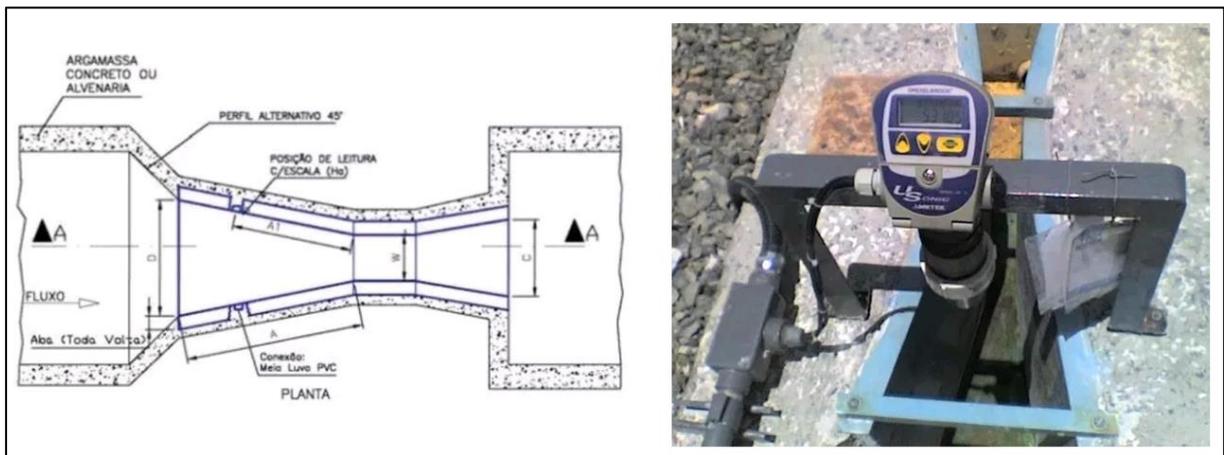
Q: Vazão (m³/h)

W: Largura da garganta (m)

H: Altura da lâmina de água (m)

Para Castro (2008), equipamentos medidores de vazão por ultrassom podem ser acoplados diretamente a calha Parshall. Com este instrumento composto por um sensor ultrassônico e uma unidade eletrônica e com a configuração de parâmetros básicos como tipo da calha ou vertedouro, o equipamento realiza as conversões e já disponibiliza o valor em vazão instantânea. A figura 2.15 ilustra um medidor de calha Parshall e o equipamento para medição de nível.

FIGURA 2.15 – Medidor calha Parshall e equipamento para medição do nível



FONTE: Nunes (2016) – Adaptado

As vazões da fundação das barragens tendem a ser maiores que aquelas que percolam através do aterro compactado da barragem. É interessante individualizar as medições de vazão para conhecimento da contribuição das distintas zonas da barragem como drenos e ombreiras por exemplo. Além disso, recomenda-se a leitura na fase inicial da barragem no intuito de verificar possíveis captações advindas do lençol freático das ombreiras. Dentre outras funcionalidades, os locais onde estão instalados estes tipos de medidores de vazão permitem a análise visual da cor da água, além de servirem como ponto para a coleta de amostras para análises físico-químicas e medição de turbidez que tem aspecto qualitativo com relação ao funcionamento da estrutura (FONSECA, 2003).

2.4 Automação em barragens de mineração

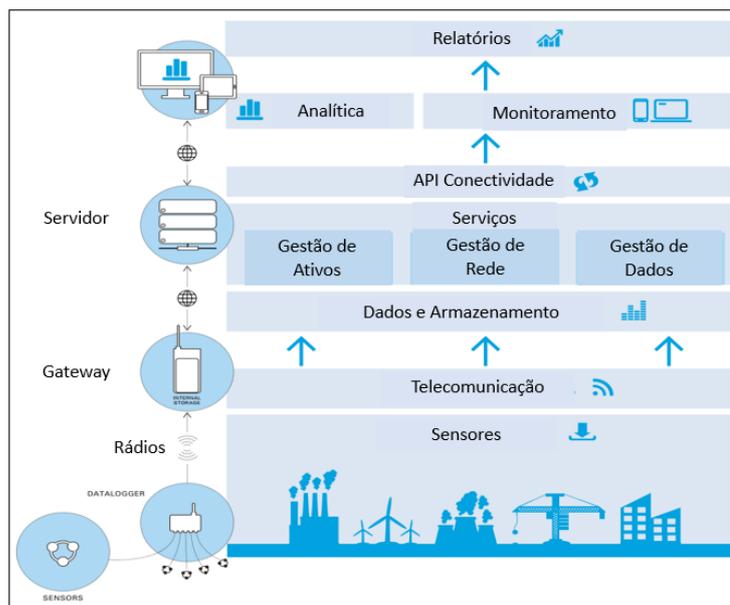
Em empreendimentos geotécnicos de grande porte os sistemas de instrumentação e monitoramento que podem detectar pontos críticos de segurança estrutural e operacional são imprescindíveis. A automatização do monitoramento e da instrumentação destas estruturas

permitem que a equipe técnica responsável pelo gerenciamento dos dados das barragens, tenha acesso a informação da instrumentação em tempo real. Dessa maneira, o processo torna-se eficiente, com maior agilidade na interpretação dos dados e conseqüentemente confiabilidade na tomada de decisões. Além disso, a automação das barragens propicia o aumento da frequência de leituras e dispensa o trabalho de coleta manual dos dados por um técnico habilitado (CHAMMAS, 2016).

Com o avanço da tecnologia o conceito de automatização surgiu na área de instrumentação de barragens. Sendo que para os instrumentos mais utilizados nestes empreendimentos, como indicadores de nível de água, piezômetros, inclinômetros e marcos superficiais existem as suas versões automatizadas e que devem ser utilizadas tanto na construção quanto na operação da barragem. A correta leitura e interpretação dos resultados gerados pela instrumentação permite verificar as restrições que determinam a estabilidade da barragem, definindo níveis de alarmes para atuações de forma preventiva. O desenvolvimento de microcontroladores, *dataloggers*, e entre outros, a transmissão de dados via rádio, fibra ótica e até satélite propiciou um sistema de automatização da instrumentação de barragens e com a evolução de tecnologias para instrumentação, foram alcançados significativos avanços relacionados à coleta de dados, transmissão, processamento e análise de dados (QUISPE, FONTES e CARDOSO, 2018).

Ainda de acordo com Quispe, Fontes e Cardoso (2018) os instrumentos automatizados asseguram confiabilidade para aquisição dos dados, entretanto, há um custo considerável para implantação e previsão de retorno a longo prazo. Este valor elevado se deve principalmente a necessidade de uma estrutura de rede de telecomunicações para tráfego dos dados, a necessidade de softwares para gestão e conversão dos dados que exigem licenciamento prévio. A figura 2.16 ilustra um exemplo de uma rede automatizada para monitoramento, nela é possível notar a considerável infraestrutura necessária para prover a automatização dos instrumentos em campo. Ainda é possível notar, que diversas etapas desde a aquisição dos dados dos instrumentos em campo devem ser seguidas, como um sistema *wireless* neste caso utilizado, um sistema de servidores de alta performance para compilação e tratamento dos dados, dentre outros.

FIGURA 2.16 – Exemplo de arquitetura para automatização do monitoramento



FONTE: Iotone (2019) - Adaptado

De acordo com Machado (2007), em desvantagem ao sistema convencional, o sistema com instrumentação automática pode apresentar defeito nos sensores e nos equipamentos eletrônicos devido a sua sensibilidade diante das reais condições de operação em campo. Além disso, o custo de operação da barragem torna-se maior, uma vez que tais equipamentos exigem equipes altamente capacitadas para manutenção. Para a automação de barragens são geralmente selecionados instrumentos com transdutores elétricos e, outros tipos, de acordo com o grau de importância para segurança do empreendimento.

O monitoramento automático é realizado através de um conjunto de equipamentos eletrônicos formando um sistema programável, onde as tarefas de medição e controle são realizadas. A este dá-se o nome de sistema de aquisição e transmissão automática de dados (SATAD). Os dados de cada instrumento são enviados ao SATAD e este por sua vez transmite os dados para um Centro de Controle onde os dados são processados e avaliados pela equipe competente. Nesta central é realizado o gerenciamento dos dados com o auxílio de um programa de controle que pode armazenar e organizar as informações recebidas. Além disso, este programa possui as funções de indicar o *status* atual de segurança vigente para cada instrumento ou conjunto deles, possibilidade de modificação da frequência das leituras, criação de *reports*, emissão de alertas sonoros e visuais (MACHADO, 2007).

2.4.1 Dataloggers

O *datalogger* é um equipamento eletrônico composto por um microcontrolador e um voltímetro com memória. Este dispositivo possui as funcionalidades para realizar diversas tarefas como produzir tensão pré-estabelecida com intervalos definidos, ler tensões e também para armazenar dados. Além disso, pode ser configurado para fazer cálculos e armazenar os resultados, como por exemplo, converter a leitura de um piezômetro para diferentes unidades. Os instrumentos são interligados às conexões ou às chamadas “portas” no equipamento e a coleta de leitura é realizada em intervalos selecionados. Dispositivos periféricos, podem ser interligados às portas de controle e de excitação para efetuar funções específicas, como telefonia celular e testadores de cabo. Os *dataloggers* interligados à instrumentação eletrônica podem executar tarefas distintas automaticamente, como em determinado nível de alarme de um sensor ativar uma ação, como alarme de luz, sirene (KANE e BECK, 2000).

De acordo com Cerqueira *et al.* (2016), o *datalogger* é o principal componente de uma estação de campo para automatização da instrumentação de uma barragem. Este dispositivo tem por finalidade receber, armazenar e converter os dados de campo. Com a interligação dos instrumentos a este equipamento, é possível realizar a programação para registro contínuo das leituras dos piezômetros eliminando a necessidade de coleta periódica manual dos instrumentos. Santos *et al.* (2012) complementa que os *dataloggers* podem também realizar a medição desejada periodicamente em intervalo pré-definido e estas serem salvas em um banco de dados interno. Sendo necessário de acordo com o grau de automação a conexão e extração destes dados no equipamento. A figura 2.17 apresenta um exemplo de um *datalogger* frequentemente utilizado em projetos para automação de barragens de mineração.

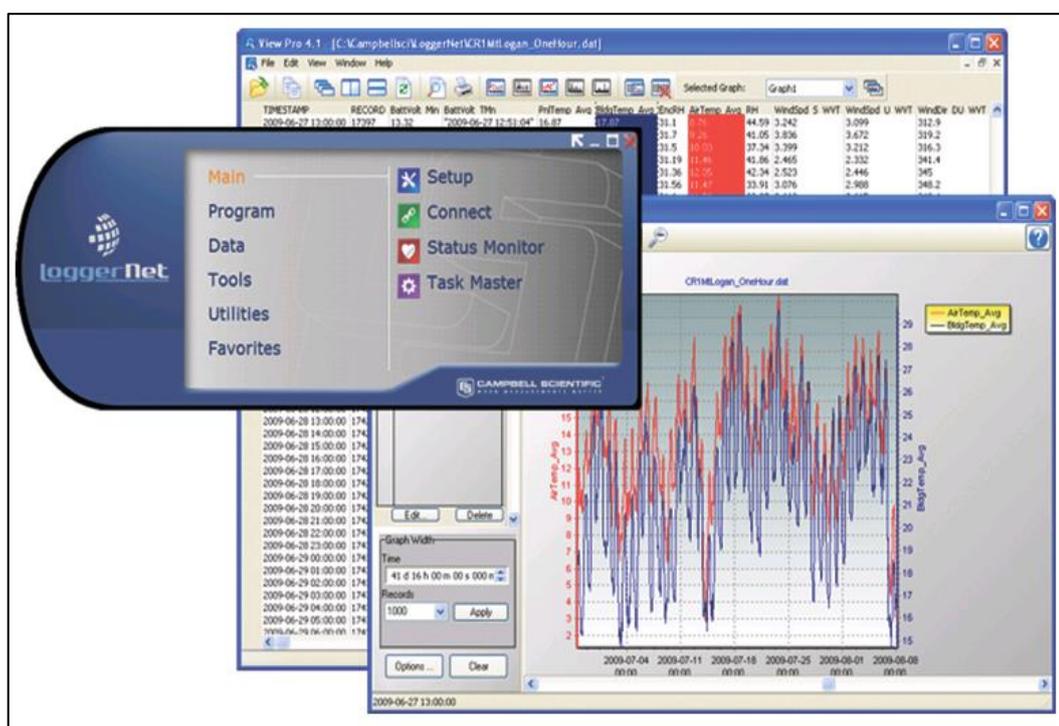
FIGURA 2.17 – *Datalogger* utilizado em sistemas de automação de barragens



FONTE: Solitech (2019)

Em grande parte das aplicações, os *dataloggers* são parte de uma solução de automação e são interligados via rede para a aquisição dos dados por eles coletados. São instalados próximos aos sensores e os resultados são armazenados em formato de arquivo e compartilhados com estações servidores remotos nos quais tem softwares proprietários capazes de interpretar, plotarem gráficos e realizar novas configurações nestes equipamentos. A figura 2.18 apresenta o software de exemplo com algumas destas funcionalidades explícitas. Além disso, estes softwares checam os arquivos de dados durante um intervalo de tempo determinado e inserem as novas gravações no banco de dados, além de que, com o uso de alguns complementos, possuem o recurso de realizarem a publicação de tais dados em protocolo *Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control (OPC)* (MAXWELL, 2005).

FIGURA 2.18 – Exemplo de software utilizado na configuração de *dataloggers*



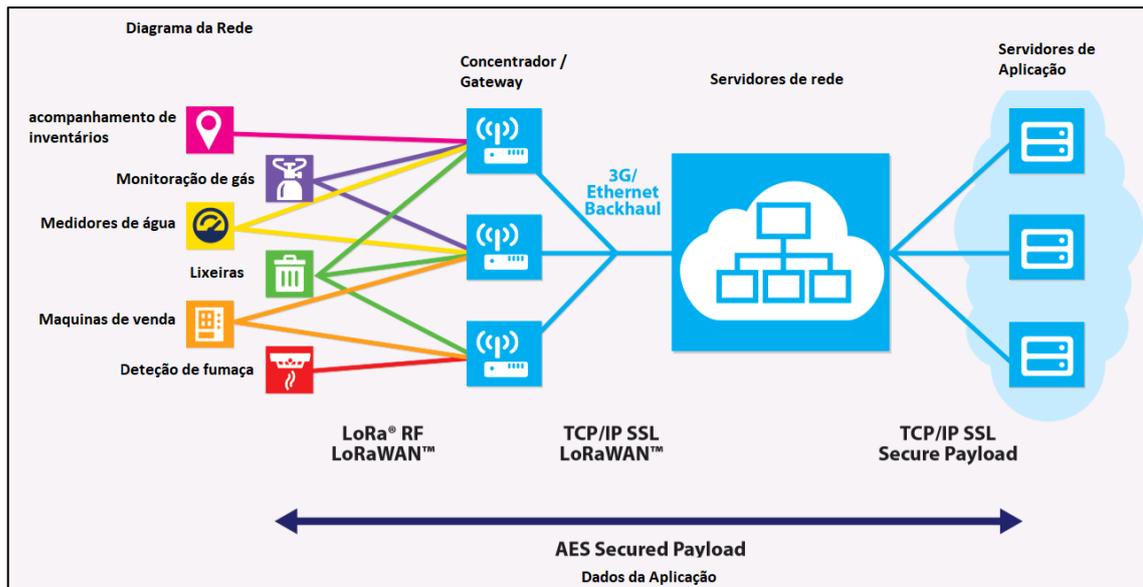
FONTE: Campbell (2019)

2.4.2 Gateway de rede

Conforme aponta Franciscatto, Cristo e Perlin (2014), um *gateway* de rede é um dispositivo que promove a comunicação entre diferentes tipos de redes. Eles podem ser classificados basicamente em dois tipos. O primeiro chamado de *gateway* conversor de meio que é mais simples e que tem como função receber um pacote de rede de nível inferior, tratá-lo e enviar a um destino. O segundo, conhecido como tradutor de protocolo ou *gateway* de aplicação, traduz

mensagens de uma rede de entrada para outra. Este equipamento pode ser visto como um dispositivo complexo para conexão das redes, combinando diferentes funções de *bridge*, roteadores e repetidores e, desta maneira, promove a interconexão entre diferentes redes. A figura 2.19 apresenta um exemplo de utilização de *gateway* a qual recebe diferentes protocolos e traduz para a organização.

FIGURA 2.19 – Esquema de utilização de *gateway* de rede



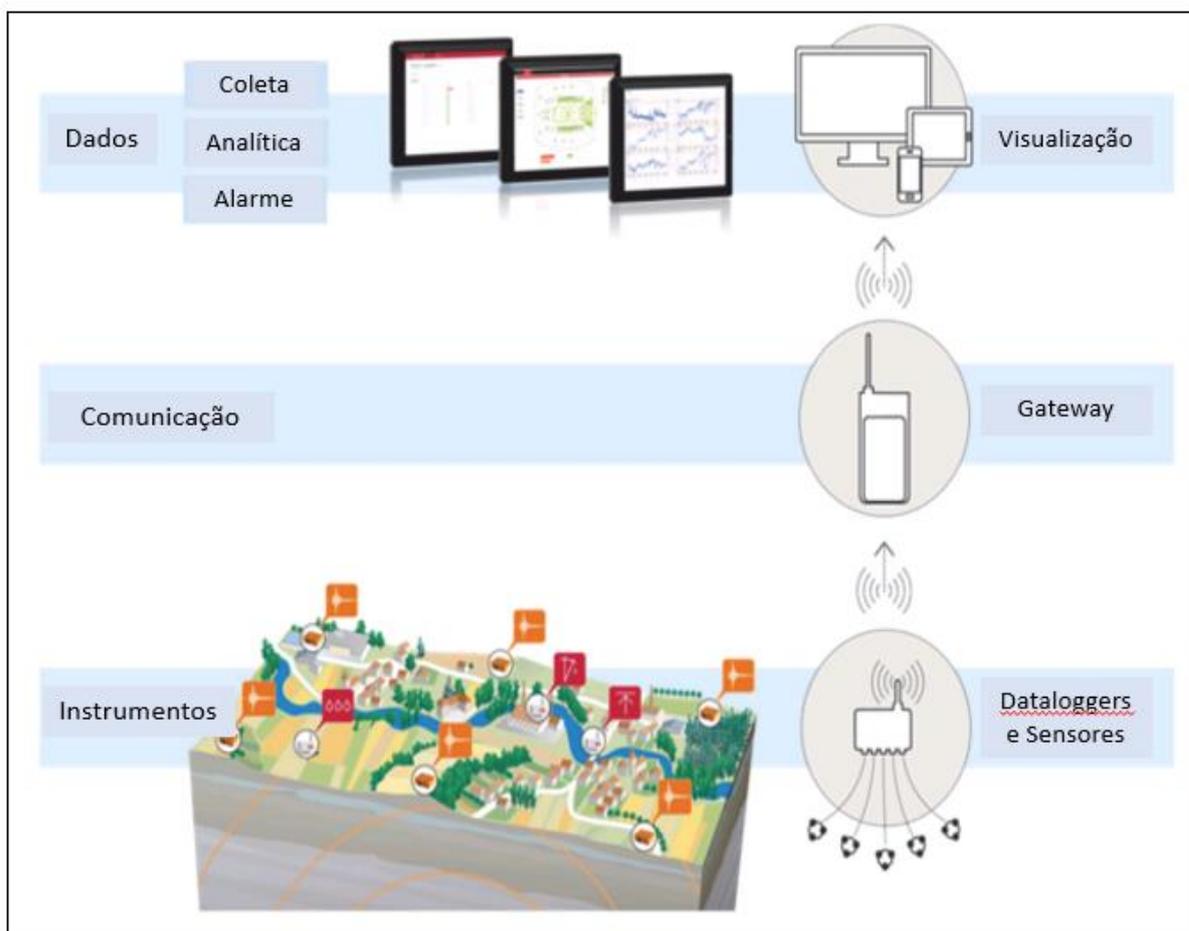
FONTE: Amâncio (2018)

Venturelli (2016) corrobora e traz um exemplo de uma situação, na qual uma planta com comunicação em Ethernet/IP e um dispositivo em campo em rede *Profinet*, nestes casos, um *gateway* de rede é implantado de forma a integrar os diferentes protocolos. O autor ainda aponta que em uma infraestrutura de rede há a necessidade de dispositivos que permitam a convergência de todos os dados da planta, independentemente do protocolo e isso é proporcionado pelo *gateway*. Com uso deste dispositivo podemos ter diferentes sistemas, em diferentes meios operáveis em toda a planta.

No artigo de Bonifácio, Pantoni e Brandão (2009) é apontada a *gateway* como dispositivo utilizado para conectar uma rede *WirelessHart* com o sistema de uma planta de automação. Dessa maneira, o sistema de automação possui acesso aos dispositivos que estão interligados nessa rede *Wireless*, e se houver a necessidade, ainda traduz os diferentes protocolos. Assim, os autores ainda caracterizam esse tipo de *gateway* como um instrumento que faz a interface entre os dispositivos em campo e o sistema de automação através de um canal de comunicação

Ethernet ou *WiFi* por exemplo. A figura 2.20 apresenta um *overview* de arquitetura de um sistema de comunicação com *gateway wireless* para aquisição dos dados de instrumentação.

FIGURA 2.20 – Arquitetura de rede de automação com uso de *gateways*



FONTE: Abancó *et al.* (2016) - Adaptado

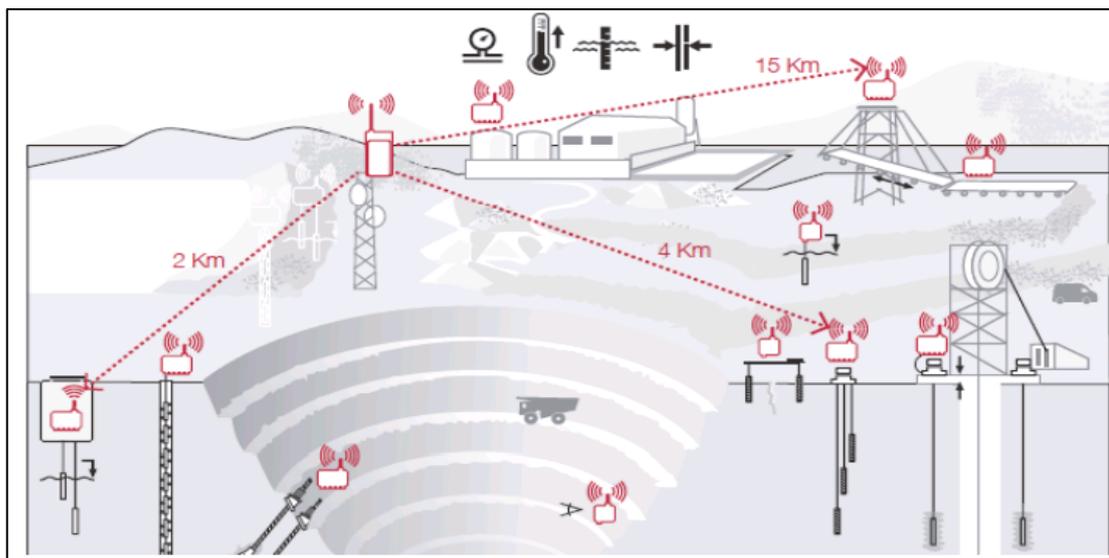
2.4.3 Redes Wireless

As redes *wireless* ou redes de transmissão e comunicação sem fio são alternativas viáveis em substituição aos meios de transmissão cabeados, uma vez que se utilizam do ar para enviar e receber sinais de comunicação. A comunicação por este meio é muito útil em situações onde a utilização cabeadas é inviável. A tecnologia de transmissão via ondas de rádio possibilita a comunicação entre pontos distantes, possui facilidade na geração das ondas e possui certa flexibilidade para adição de novos dispositivos em determinada rede. A transmissão com a utilização de rádios pode ser feita de forma direcional, onde antenas de rádios, geralmente parabólicas, de uma rede, estão apontadas diretamente a outra com necessidade de visada direta,

ou então, de forma não direcional, onde são utilizadas antenas do tipo omnidirecional (propaga as ondas em diferentes direções a partir da fonte) interligadas a rádios conhecido por *Access Point* e que proveem acesso a determinada rede pelo sinal captado por antenas de rádios clientes (FRANCISCATTO, CRISTO E PERLIN, 2014).

Diante do aumento da credibilidade e facilidade de instalação, as tecnologias de comunicação *wireless* começam a tomar o espaço das redes de transmissão via cabos. Tais características, alinhadas a redução de preços dos componentes, produz um aumento na demanda por redes de acesso sem fio e impõe que as empresas fabricantes invistam cada vez mais nesta área de telecomunicações. A maior parte dos sistemas de transmissão sem fio são utilizados para aquisição de dados, mas há uma tendência de crescimento para aplicação desta tecnologia em controle de plantas industriais. Para viabilizar a comunicação *wireless* para aquisição de dados ou controle e monitoramento de processos na indústria e devido as dificuldades encontradas nas tecnologias sem fio atuais, novos padrões deste tipo de rede estão surgindo. A escolha da tecnologia *wireless* empregada em uma planta deve estar associada às necessidades próprias e de cada aplicação e deve buscar alinhamento entre consumo de energia dos transmissores, a velocidade de transmissão dos dados e a acurácia do sistema de telecomunicação (BONIFÁCIO, PANTONI E BRANDÃO, 2009).

Conforme aponta Abancó *et al.* (2016), o desenvolvimento de um monitoramento estratégico consistente para barragens de mineração é crucial. Uma solução de monitoramento *wireless* consiste de um sistema de aquisição de dados que coletam os dados dos sensores e enviam tais informações sem fio para uma *gateway* que automaticamente disponibiliza os dados para a rede de automação local. Para isso, um sistema de telecomunicações via rádio é utilizado e provê a comunicação entre *dataloggers* que estão próximos aos sensores e a *gateway*. A figura 2.21 apresenta a solução *wireless* utilizada no trabalho de Abancó *et al.* (2016) na qual entre alguns pontos a distância de comunicação é de aproximadamente 15km.

FIGURA 2.21 – Solução *wireless* empregada para monitoramento de uma planta

FONTE: Abancó *et al.* (2016)

Para atender as requisições pelos setores industriais, quanto as redes sem fio, surgiram diversos protocolos de comunicação como o *WirelessHART* e o *Zigbee* que são embasados conforme padrão do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) 802.15.4.

2.4.3.1 Padrão IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 descreve técnicas e métodos para aplicações de redes de sensores sem fio industriais. Tal norma define as camadas física e de acesso ao meio, aprovendo comunicação *wireless* entre dispositivos com baixo consumo de energia e baixo custo, em aplicações com baixa taxa de transferência de dados. Este padrão funciona em bandas de frequência não licenciadas e até 27 canais para comunicação são definidos (GOMES *et al.*, 2014).

Ao nível físico esta rede opera em três bandas de frequência de rádio conhecidas como *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) que não requerem licenciamento. Estas, correspondem a faixa de 2.4GHz em demais localizações, 915MHz para Estados Unidos e 868MHz para Europa. Basicamente, os dispositivos são classificados em *reduced function device* (RFD) que são os dispositivos mais simples, onde a comunicação é realizada apenas entre dois nós, são terminais usados pelo padrão para as portadoras com funcionalidades limitadas, ficam as margens das redes. A outra classificação é a *full function device* (FFD) que

são os dispositivos que desempenham funções mais complexas, são responsáveis pelo encaminhamento das mensagens entre os nós da rede e podem funcionar em qualquer lugar independentemente da arquitetura da rede. A figura 2.22 apresenta uma tabela com os dispositivos utilizados e a sua função conforme padrão (BONIFÁCIO *et al.*, 2009).

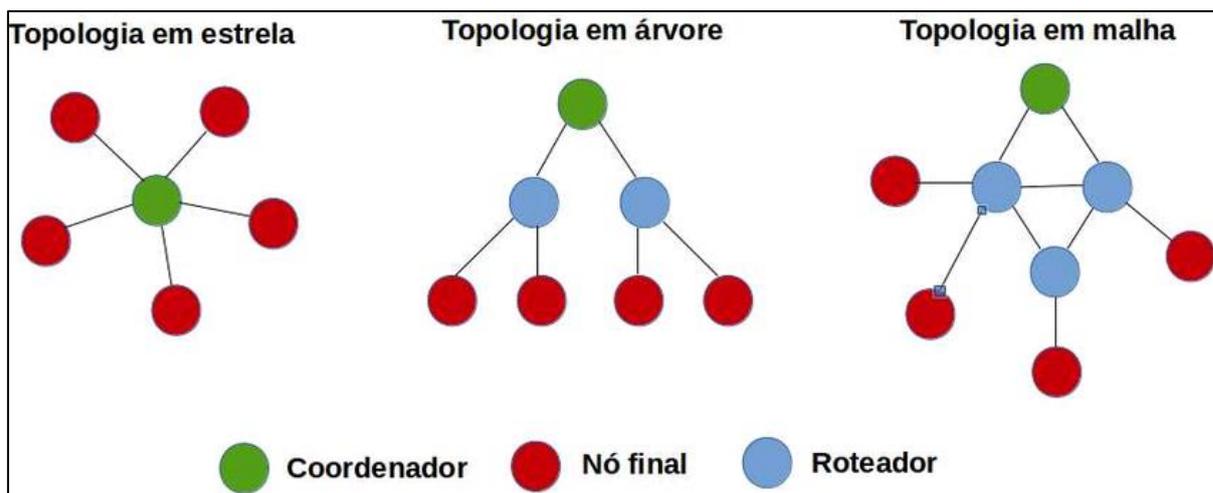
FIGURA 2.22 – Dispositivos utilizados e função no padrão IEEE 805.14.2

Dispositivo	Tipo de Dispositivo físico (IEEE 802.15.4)	Função
Coordinator	FFD	Forma a rede, atribui endereços, suporta binding table. Existe somente um por rede.
Router	FFD	Permite que mais nós se juntem á rede, ao aumentar seu alcance físico. Pode também efetuar funções de controle ou monitoramento. A sua existência é opcional.
Endpoint	RFD ou FFD	Efetua ações de controle ou monitoramento através de um dispositivo que lhe esteja associado (sensor, controlador, atuador...)

FONTE: Bonifácio *et al.* (2009)

A camada de rede possui usualmente as topologias de árvore, estrela e malha. De acordo com a topologia empregada, teremos as características se determinado sistema é robusto, de menor custo, se é centralizado ou distribuído. No tipo estrela existe um único coordenador central e como vantagem está a simplicidade e vida útil elevada da bateria, em contrapartida possui menor alcance e dependência em um único dispositivo. Para a topologia tipo malha (*mesh*) há grande flexibilidade, segurança e escalabilidade tendo como vantagem rotas alternativas entre os nodos que estejam dentro do alcance, mas mesmo nessa topologia há apenas um coordenador. E na topologia do tipo árvore (árvore agregada ou *cluster tree*) a vantagem está na presença de mais de um coordenador, possui configuração híbrida, combinando as topologias malha e estrela, obtendo maior segurança para o alcance da rede. A figura 2.23 apresenta a configuração das diferentes topologias citadas (DANTAS, 2010).

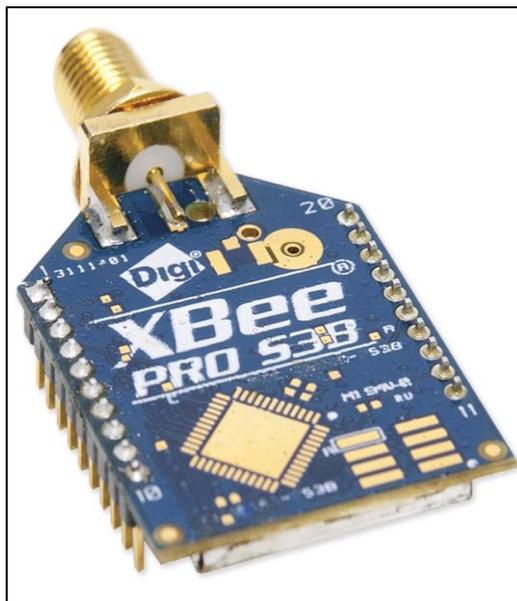
FIGURA 2.23 – Diferentes topologias de rede para padrão IEEE 805.14.2

FONTE: Gomes *et al.* (2014)

Alguns padrões para camadas superiores foram propostos para sensores sem fio baseadas no padrão IEEE 802.15.4. O protocolo ZigBee é o mais empregado, foi proposto no ano de 2003, construído e homologado conforme padrão IEEE 802.15.4 que define a camada física e a camada de controle de acesso ao *Media Access Control* (MAC). A ideia dos desenvolvedores foi de criar um padrão capaz de possibilitar flexibilidade, mobilidade, controle seguro, e ainda que tivesse baixo custo e potência em redes sem fio para o monitoramento remoto e soluções de automação. Este protocolo foi desenvolvido para comunicação sem fio de dispositivos de curtas distância e baixa taxa de transmissão, consequentemente com uma racionalização do consumo de energia (MUÑOZ, 2009).

Para Stuhler *et al.* (2012), o ZigBee é um padrão de comunicação sem fio que tem por finalidade prover uma rede para monitoramento e controle com baixas taxas de dados e processamento e, com autonomia elevada de funcionamento. Conforme o autor aponta, ele foi desenvolvido especificamente para aplicações de baixo custo que requerem baixa potência, sendo alimentados por baterias, tais como os sensores para uso em automação industrial, residencial ou comercial. Seu desenvolvimento foi atrelado a uma alternativa de comunicação relativamente simples, tornando-se viável para aplicações com custo baixo. Na figura 2.24 é apresentando um módulo de rádio frequência (RF) de 900MHz construído conforme protocolo IEEE 802.15.4.

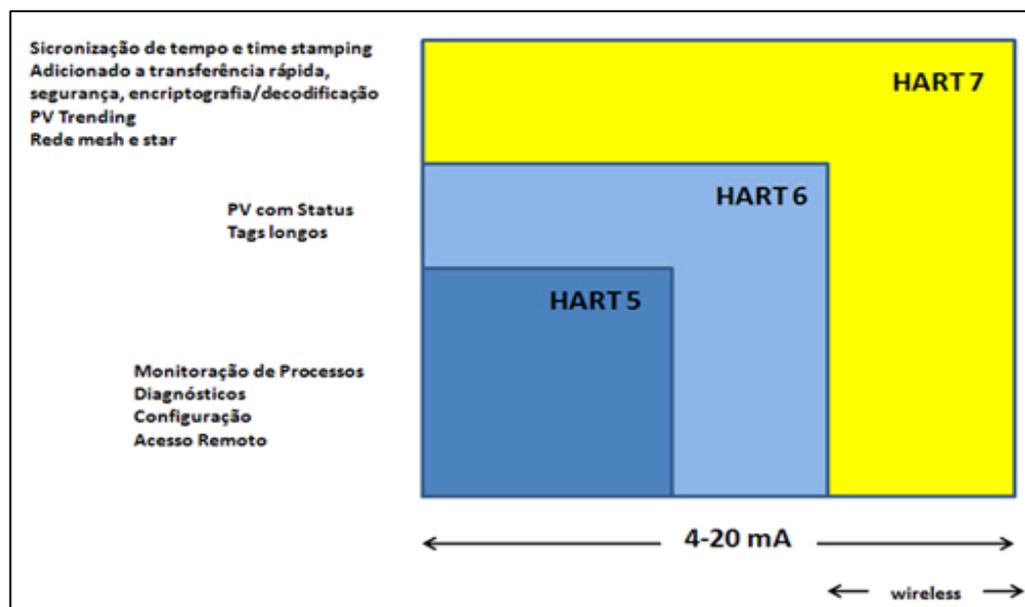
FIGURA 2.24 – Exemplo módulo RF utilizado em sensores de rede sem fio



FONTE: Digi (2019)

2.4.3.2 Padrão WirelessHART

O protocolo *Highway Addressable Remote Transducer* (HART) é muito utilizado em aplicações industriais, tendo como principal vantagem o uso de instrumentos inteligentes através da comunicação digital de forma flexível modulada no sinal de 4 a 20mA para a parametrização e monitoração de informações. Ele foi introduzido em 1989 com o objetivo de facilitar a calibração, ajustes de *range* e *damping* de instrumentos analógicos. Este protocolo está em contínua atualização e na sua versão 7 incluiu várias características agregando a funcionalidade *wireless* com as topologias *mesh* e *star*, conforme pode ser visto na figura 2.25. O *WirelessHART* é o primeiro padrão aberto de comunicação sem fio desenvolvido especificamente para atendimento às necessidades da indústria de processo (CASSIOLATO, 2019).

FIGURA 2.25 – Evolução do protocolo *HART*

FONTE: Cassiolato (2019)

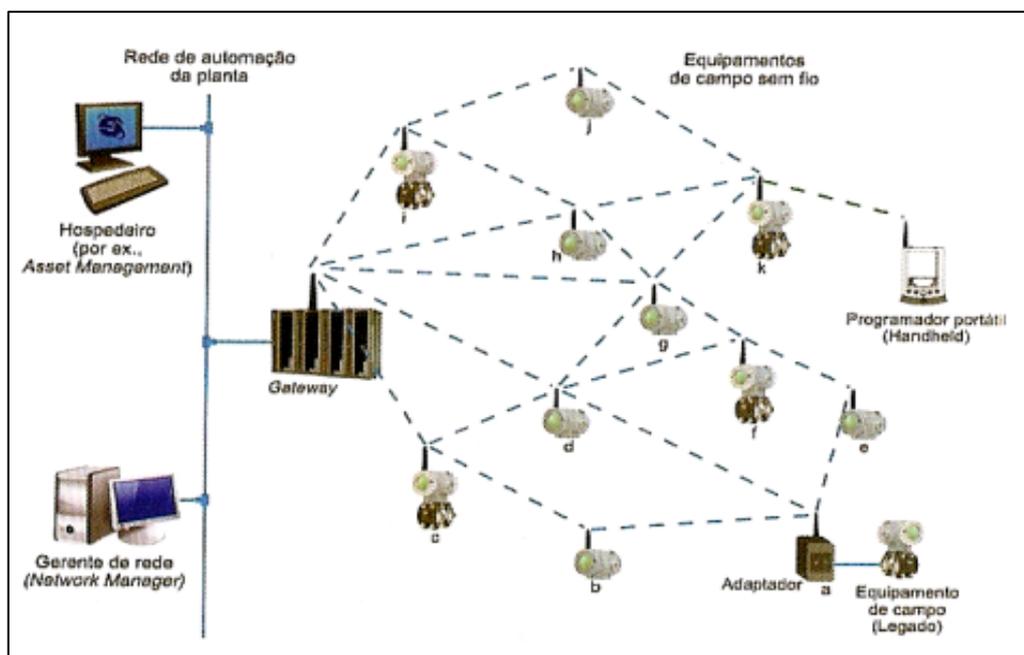
De acordo com Guarese (2014), o protocolo *WirelessHART* possui diversas vantagens, dentre as quais podem-se citar:

- Comunicação em topologia de rede Malha, o que torna a comunicação mais robusta, uma vez que pelos algoritmos de roteamento é possível automaticamente redefinir as rotas caso um dos nodos de comunicação falhe;
- Utilização do algoritmo de *Frequency Hopping*, o que faz com que todos os nodos comunicantes da rede alterem a frequência de comunicação a cada evento, evitando que um canal interfira em toda a rede;
- O modelo de comunicação permite a todos os nodos da rede desligarem temporariamente com intervalo de tempo pré-definido, o que economiza energia e aumenta a vida útil da bateria

Conforme apontado por Cassiolato (2019), uma rede *WirelessHART* é estruturada em malhas, onde cada sensor desempenha papel de repetidor. Assim, o alcance da rede não está atrelado apenas ao *gateway*, permitindo a configuração de uma ampla estrutura de rede distribuída. Tal vantagem garante que o sistema, de forma dinâmica, remaneje a comunicação e consiga rotas alternativas diante falha, garantido assim a disponibilidade do sistema. Dessa maneira, pode-se entender que quanto maior a rede, maior a confiabilidade pois teremos mais opções de rotas alternativas criadas automaticamente.

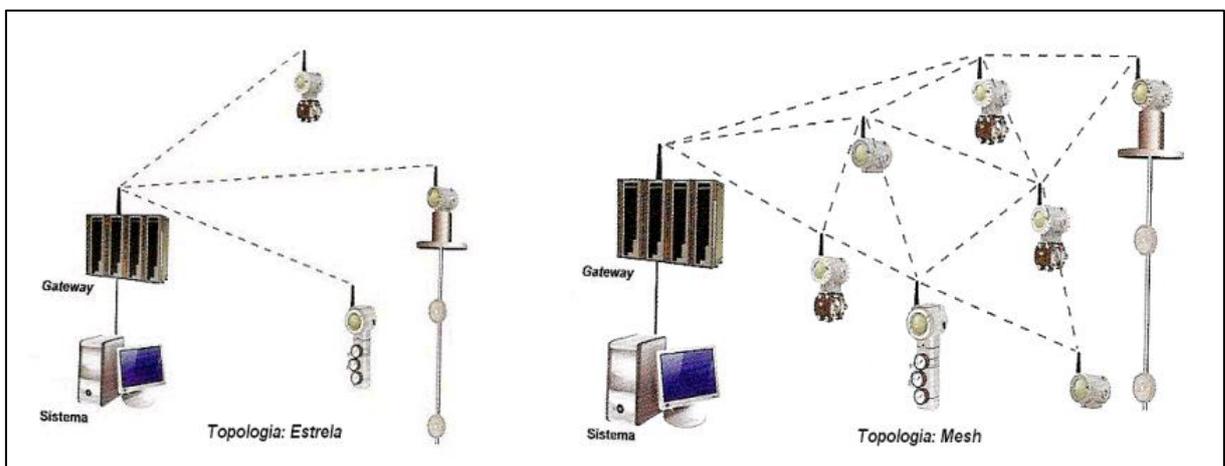
Uma rede *WirelessHART* típica, de acordo com Bonifácio *et al.* (2009), é formada por um *Network Manager*, ao menos um *gateway* e os instrumentos e adaptadores *WirelessHART* que juntos formam uma rede *mesh* onde os equipamentos comunicam-se bidirecionalmente. Há a possibilidade de topologia de rede *star*, mas esta configuração é recomendada para pequenas aplicações, uma vez que neste caso, vários instrumentos estão interligados a apenas um *gateway*. A figura 2.26 ilustra a arquitetura de uma rede *mesh* e a 2.27 a comparação entre as topologias.

FIGURA 2.26 – *Overview* arquitetura rede *Mesh*



FONTE: Bonifácio *et al.* (2009)

FIGURA 2.27 – Comparativo topologia *mesh* e *star*



FONTE: Bonifácio *et al.* (2009)

2.4.4 Comunicação OPC

O padrão OPC foi lançado no ano de 1996 como iniciativa de um grupo de empresas com objetivo de desenvolvimento de um padrão de comunicação baseado nas tecnologias *Object Linking and Embedding (OLE)* e *Distributed Component Object Model (DCOM)* tornando possível o acesso à dados em tempo real dentro do sistema operacional Windows. Sucintamente, este padrão, estabelece as normas para que sejam desenvolvidos sistemas com interfaces padrões provendo comunicação entre dispositivos do chão-de-fábrica como Controladores Lógicos Programáveis (CLP), instrumentos e sistemas de monitoramento, supervisão e gerenciamento como o *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)*, *Process Information Management System (PIMS)*, *Manufacturing Execution System (MES)* e *Enterprise Resource Planning (ERP)*. A organização *OPC Foundation* estabelece especificações no intuito de orientar os desenvolvedores para a implementação de aplicações cliente e servidor para seus equipamentos (FONSECA, 2002).

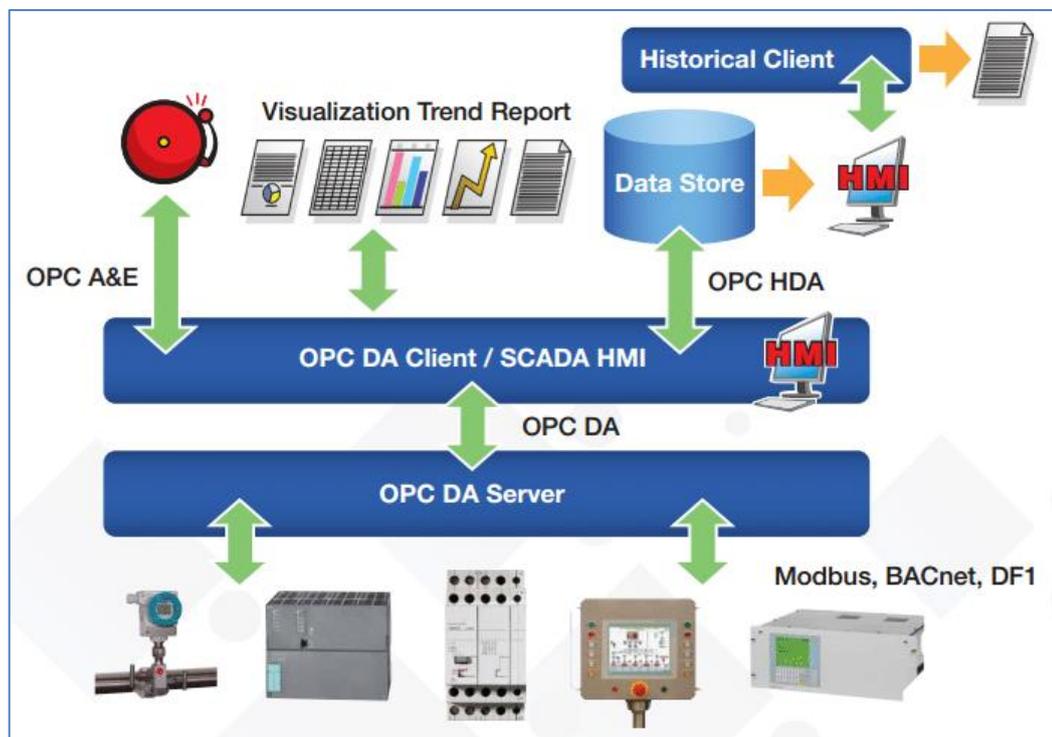
De acordo com o *OPC Foundation* (2019), a comunicação OPC é um padrão de comunicação transparente entre equipamentos de diferentes fabricantes utilizado para troca de dados de forma segura e confiável no ambiente de automação industrial. Ele garante o fluxo contínuo de informações entre dispositivos de distintos fornecedores. Este padrão é composto por uma série de especificações técnicas para elaboração que definem a interface entre sistemas clientes e servidores ou entre servidores, incluindo acesso a dados em tempo real, monitoramento de alarmes e eventos, acesso a dados históricos, entre outros aplicativos. Originalmente, o OPC tinha como finalidade abstrair protocolos específicos de CLP (Modbus, Profibus etc) em uma interface padronizada para permitir que os sistemas supervisórios fizessem uma interface com um intermediário que convertesse dados genéricos. A figura 2.28 apresenta a arquitetura do OPC clássico.

Ainda de acordo com Fonseca (2002), a publicação das especificações, proporcionou a criação de diversos produtos para automação industrial, para os quais foram disponibilizados com as seguintes vantagens contidas neste protocolo:

- Facilidade na integração e intervenção em sistemas clientes e servidores de dados, devido a padronização das suas interfaces de comunicação;

- Não há mais a necessidade do uso de *drivers* de comunicação específicos para os dispositivos, eliminando o uso de sistemas proprietários;
- Aumento do desempenho e otimização da comunicação entre dispositivos de automação;
- Comunicação “transparente” entre sistemas de automação de distintos fabricantes;
- Integração entre aplicações para o Windows e sistemas industriais como o MES, ERP, PIMS;
- Redução no custo com a contratação de empresas integradoras para desenvolvimento de sistemas, uma vez que há uma redução no tempo para desenvolvimento de interfaces e a eliminação de *drivers* para comunicação;
- Facilidade no desenvolvimento e na intervenção em sistemas para aplicações de comunicação em tempo real;
- Facilidade no treinamento e capacitação de pessoal.

FIGURA 2.28 – Arquitetura do OPC clássico



FONTE: Melo (2017)

Atualmente, o padrão OPC que era restrito a plataformas com sistema operacional Windows é conhecido como *OPC Classic*, inclusive a sigla OPC foi renomeada para *Open Platform*

Communications, dando lugar a um padrão com arquitetura de plataforma aberta com alta tecnologia, escalável, extensível e visando as possíveis atualizações do mercado e além disso, com o desenvolvimento de uma nova ferramenta conhecida como *Unified Architecture* (UA) OPC que integra todas as funcionalidades das especificações do OPC *Classic*, além de ser uma arquitetura orientada a serviços independentemente da plataforma. O *Unified Architecture* (UA) OPC foi lançado em 2008 e tem arquitetura constituída em camadas que além das características já citadas, é seguro com o uso de criptografia, autenticação e auditoria e tem estrutura de modelagem de informações com recursos orientados a objetos, transformando dados em informações (OPC FOUNDATION, 2019).

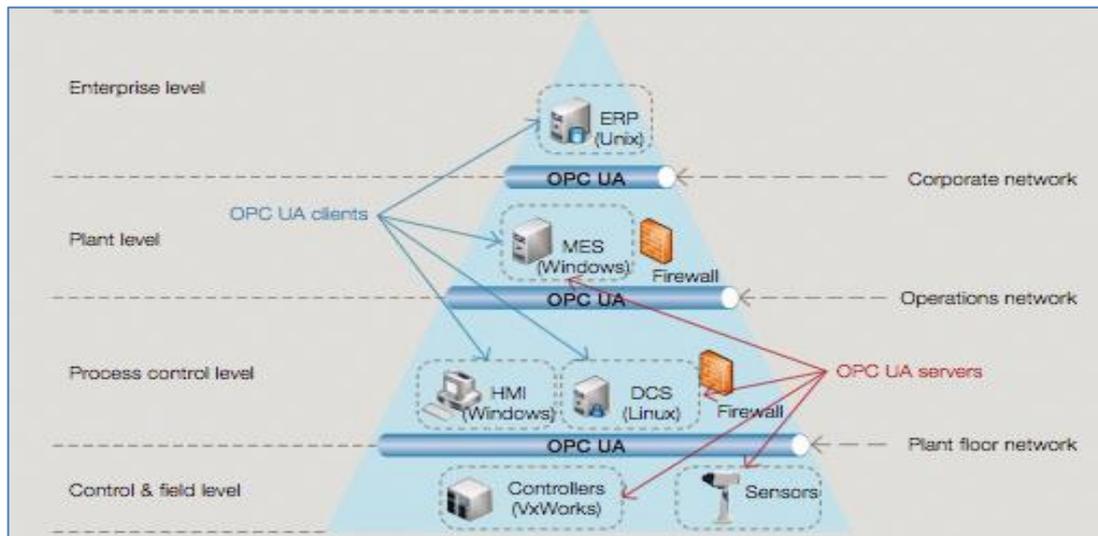
A especificação OPC *Data Access* (DA) é a mais importante do padrão, sendo que tal interface permite a leitura, escrita e monitoramento de variáveis do processo. A sua principal finalidade é mover em tempo real os dados dos dispositivos de controle para sistemas de monitoramento. O cliente OPC DA seleciona as variáveis que deseja ler, escrever ou monitorar, chamados OPC *Items*, e estabelece comunicação com o servidor OPC pela criação do objeto *OPCServer* que por sua vez oferece métodos para navegar entre os espaços de endereços para ler/escrever as variáveis e as suas propriedades. Quando declarados em um *OPCGroup* os *Items* podem ser lidos ou escritos pelo cliente, onde é definida uma taxa periódica para atualização dos dados e usada no servidor para *check* cíclico de mudança de valores, para *update* dos valores no cliente (GONÇALVES, 2012).

Para os *items* existem os parâmetros de *value*, *timestamp* e *status* na entrega dos dados que são fornecidos pelo OPC *Classic*. O *value* contém o valor de acordo com o tipo de dado, o *timestamp* é a informação fornecida pelo servidor através da leitura dos dispositivos de campo ou por configurações internas e o *status* refere-se a qualidade do estado do dado fornecido pelo servidor podendo ser *good* para dados válidos, *bad* em casos de perda de comunicação e *uncertain* caso tenha comunicação, mas os dispositivos estejam indisponíveis (OPC FOUNDATION, 2002).

Conforme aponta Melo (2017), o OPC UA é um protocolo para comunicação industrial embasado no padrão *International Electrotechnical Commission* (IEC) 62541 e definido como um padrão independente de plataforma. Vários tipos de equipamentos e sistemas podem comunicar-se por meio de troca de mensagens entre os clientes e servidores em diferentes tipos

de rede, utilizando arquitetura baseada em tecnologias *web*. Dessa maneira, o OPC UA é aplicável em todos os domínios industriais, visando troca de informações nas diferentes camadas da pirâmide da automação, conforme é explicitado na figura 2.29.

FIGURA 2.29 – OPC UA aplicado na pirâmide da automação



FONTE: Melo (2017)

Conforme apontado, as informações coletadas a partir de uma interface OPC são muito utilizadas para monitoramento de sistemas supervisórios e análise de dados e monitoramento via sistemas PIMS para concentrar estes dados de diferentes fontes e transformá-los em informação.

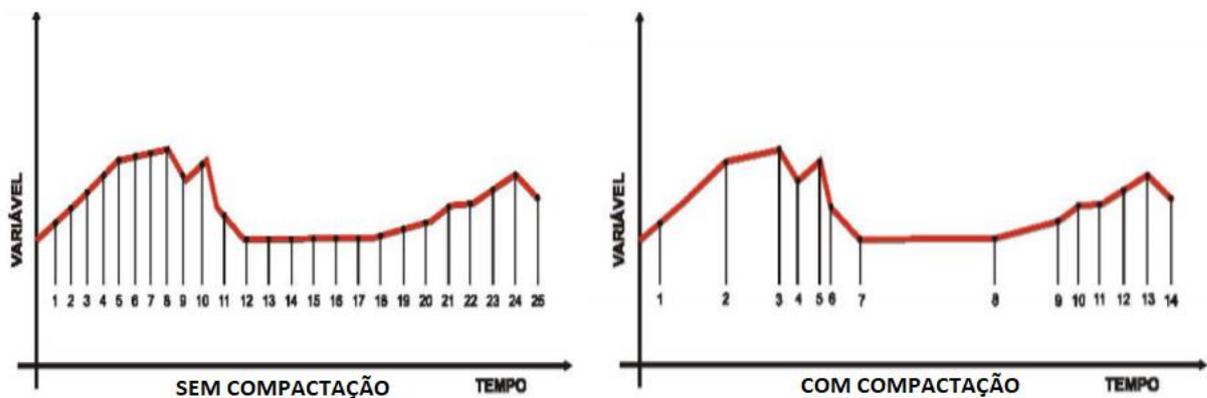
2.4.5 Sistemas PIMS

Os sistemas PIMS são soluções de sistemas para aquisição de dados que coletam os dados de processo de fontes distintas, os armazenam em um banco de dados único e disponibilizam as informações com uso de diversas ferramentas. Através de uma estação de trabalho com acesso à rede corporativa da indústria é possível acessar as variáveis de processo em tempo real, como históricos da planta, gerar gráficos, tabelas, telas sinóticas e relatórios dinâmicos, de maneira que os dados dispersos sejam compilados, gerando assim uma informação ao usuário, promovendo a visão unificada de todo o processo produtivo. A capacidade do PIMS em gerar novos dados com uso de cálculos e de armazená-los a partir de variáveis historiadas por um longo período, sem a necessidade de utilizar um *mainframe*, beneficia consideravelmente a análise de processos, uma vez que nesta etapa não existe mais a preocupação quanto as fontes dos dados (CARVALHO *et al.*, 2005).

Conforme aponta Souza (2005), o PIMS contém um repositório, onde estão concentradas todas as informações de um sistema de processo de produção, diretamente ligadas aos sistemas de supervisão e controle. Este sistema coleta os dados dos sistemas supervisórios, CLPs, Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCD) e sistemas legados e os armazena em banco de dados com funcionalidade *real time*. A base de dados do sistema PIMS possui características peculiares se comparada aos bancos de dados convencionais, sendo que existe grande capacidade de compactação (tipicamente 10:1) e há alta velocidade na resposta à consulta ao banco, além disso, é possível armazenar grande volume de dados com recursos mínimos.

O PIMS tem a função de transformar os dados obtidos em informação e a informação em conhecimento para análise dos especialistas de processo. Existem algoritmos eficientes para a compactação dos dados coletados, otimizando desta forma o espaço de armazenamento necessário. Isto é feito com a exclusão de dados desnecessários, sem, no entanto, alterar a essência da informação. A figura 2.30 ilustra a mesma variável e a coleta do PIMS com otimização de compactação e sem este recurso (SOUZA, 2005).

FIGURA 2.30 – Comparação do uso de aplicação do algoritmo de compactação de dados

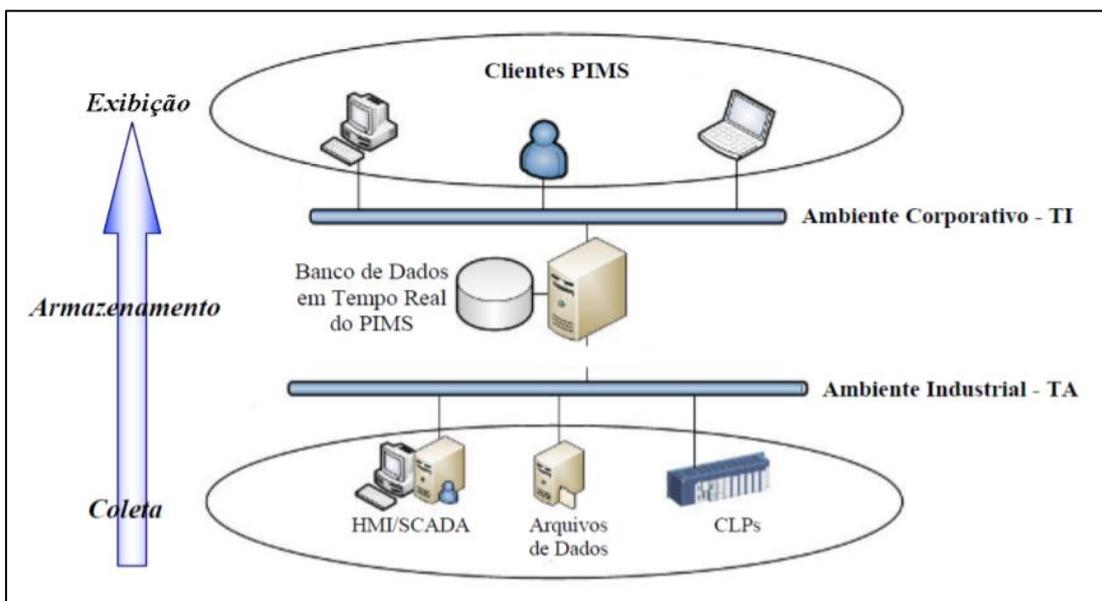


FONTE: Souza (2005)

Tal como pode ser visto na figura 2.30, o primeiro gráfico apresenta a variável sem o algoritmo de compactação e, neste caso, em um mesmo intervalo de tempo 25 pontos são amostrados, já no segundo, a atuação do algoritmo de compactação sobre a mesma variável considera 14 pontos. Os pontos da variável original que foram suprimidos, do ponto de vista do algoritmo, são considerados irrelevantes e não afetam a informação.

A arquitetura de um sistema PIMS pode ser entendido em camadas. A camada inferior é a camada de coleta, na qual os dados são coletados de equipamentos interligados diretamente às fontes de informação, sejam os equipamentos de chão de fábrica, sistemas SCADA ou SDCD. As variáveis coletadas são chamadas de *tags* e são as principais unidades da camada de armazenamento. A camada de armazenamento tem por função manter os dados de forma centralizada em um servidor de banco de dados que utiliza algoritmos para compressão de dados. E por último, existe a camada de exibição onde estão alocados os recursos para recuperação histórica e em tempo real das *tags* e exibi-las de forma gráfica, como relatórios, sinóticos ou gráficos de tendência. A figura 2.31 apresenta a arquitetura das camadas que compõe uma solução PIMS (JESUS, RAMOS e GUEDES, 2012).

FIGURA 2.31 – Arquitetura sistema PIMS



FONTE: Urbano (2009)

Souza (2005) e Jesus, Ramos e Guedes (2012) apontam que os dados ou as *tags* como são chamados, são disponibilizados em uma lista de registros temporais e possuem formatação básica tal como apresentado na figura 2.32.

FIGURA 2.32 – Estrutura das *tags* no sistema PIMS



FONTE: Souza (2005)

Os autores ainda apontam a funcionalidade de cada bloco, conforme se segue:

- *Timestamp*: trata-se de um indicador de tempo, geralmente com unidade em milissegundos (ms), delimitando o início e final do armazenamento de um dado;
- Identificador de dado (*tag*): informa o tipo do dado a ser tratado;
- Valor: guarda o dado em si armazenado;
- Qualidade do dado: trata-se de um identificador com a finalidade de repassar sobre as condições e a credibilidade do dado analisado.

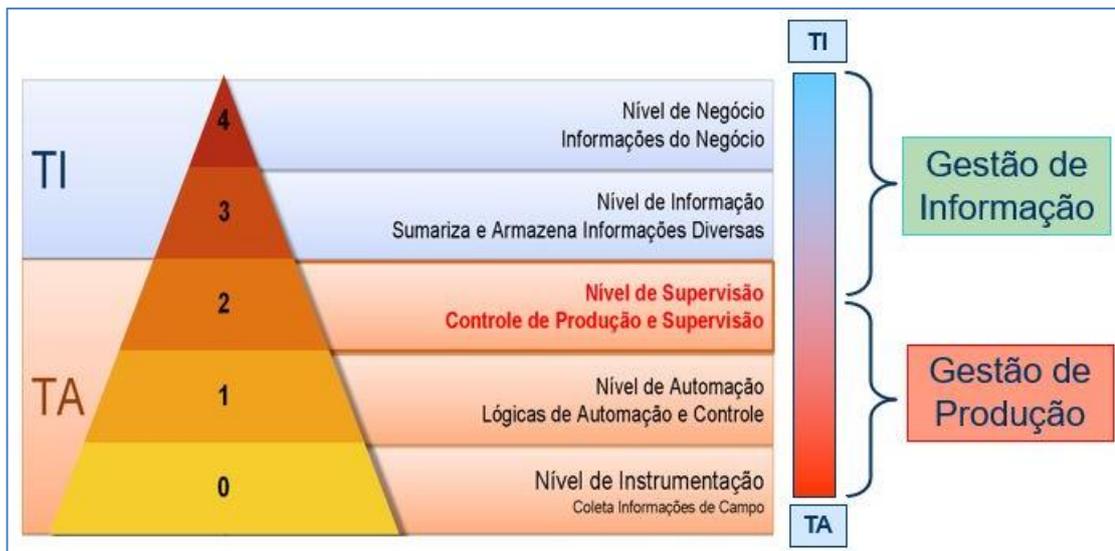
De acordo com Carvalho *et al.* (2005), a infraestrutura típica necessária para aplicação do PIMS, consiste no uso dos seguintes recursos com suas devidas descrições:

- Servidor Principal: equipamento responsável pela centralização das informações e disponibilização aos clientes. É nesta estação que os dados ficam armazenados e estes por sua vez são obtidos dos servidores de comunicação, geralmente através do protocolo OPC;
- Servidores de Comunicação: equipamento ou conjunto de equipamentos de acordo com a aplicação responsáveis pela interligação entre o servidor principal com os sistemas de controle, SCADA ou SDCD. Na maior parte das aplicações as variáveis são requisitadas via protocolo OPC, sendo o PIMS um OPC *Client* e os sistemas de controle da planta os OPC *Server*;
- Estações Clientes: são estações de trabalho interligadas a rede corporativa e que possuem uma versão de software cliente do PIMS para a visualização das informações;
- Banco de Dados Relacional: utilizado em algumas aplicações mais específicas, quando há a necessidade de por exemplo controle de bateladas e gerenciador de eventos;
- Infraestrutura de rede (corporativa e automação): são os equipamentos e configurações necessárias no ambiente para interligação e troca de dados de informações permitidas entre as redes corporativa ou da tecnologia de informação (TI) e as redes de controle e supervisão da tecnologia de automação (TA).

Os sistemas PIMS, podem ser entendidos do ponto de vista de redes, como sistemas híbridos, haja visto que os dados de processo são coletados em um ambiente TA e disponibilizados no ambiente corporativo da TI. Diante das características específicas de cada ambiente e distinção nas finalidades básicas de cada um, existem governanças específicas para gestão de cada setor. Alinhados a proteção da sua camada de rede, existem arquiteturas conhecidas como

Desmilitarized Zone (DMZ) para a integração de sistemas PIMS de forma que não exista vulnerabilidade no tráfego de informações entre os ambientes. A figura 2.33 apresenta a pirâmide da automação com as especialidades distintas das áreas de TA e TI (TEIXEIRA e COSTA, 2014).

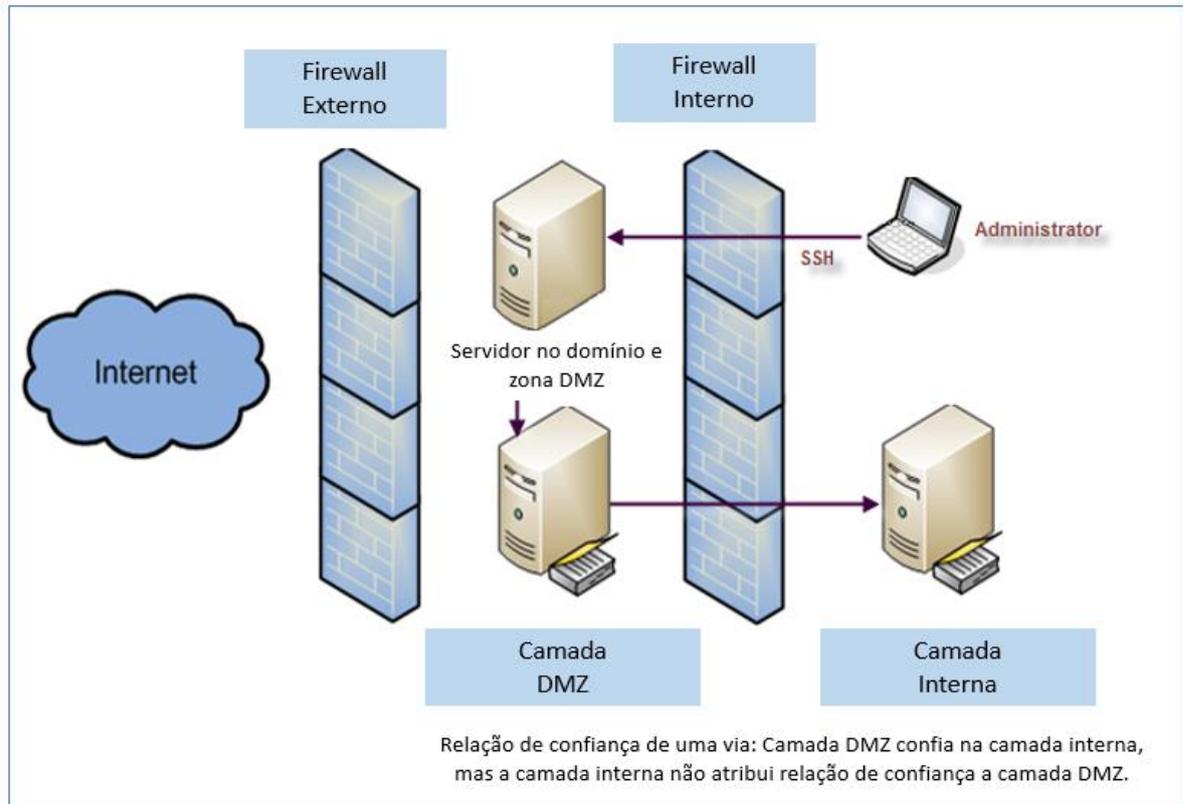
FIGURA 2.33 – Pirâmide da automação com as especialidades TA x TI



FONTE: RealPars (2018) – Adaptado

A DMZ é um conceito em arquiteturas de redes nas quais são instaladas camadas intermediárias entre a rede interna e externa, onde servidores que recebem tráfego externo estão hospedados de maneira segregada da rede interna, a qual deseja-se proteger. Esta arquitetura tem como função manter os serviços que possuem acesso externo separados da rede local de uma indústria, restringindo ao máximo um potencial dano causado por algum invasor. A configuração realizada em equipamentos como *firewall* concedem ou restringem o acesso de usuários de acordo com seu perfil, delimitando o acesso aos usuários externos apenas ao perímetro de rede, de certa forma imprimindo um grau de isolamento da rede interna. A figura 2.33 apresenta um exemplo de arquitetura de rede DMZ (MACEDO, 2012).

FIGURA 2.34 – Exemplo arquitetura de rede DMZ



FONTE: Centrify (2018) - Adaptado

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Barragem objeto de estudo

A estrutura da barragem, objeto de estudo deste trabalho, está localizada na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, na região das cidades de Mariana e Ouro Preto, em Minas Gerais. Ela foi projetada para armazenamento de água e formação de reservatório que permita a sedimentação por gravidade dos rejeitos e sedimentos oriundos das áreas a montante, garantindo clarificação dos fluxos descartados a jusante e possibilidade de utilização futura para captação de água.

As inspeções e avaliações técnicas devem ser realizadas a fim de avaliar as características hidráulicas, hidrológicas, geotécnicas e estruturais das diversas instalações da barragem. O processo de monitoramento para as estruturas deste empreendimento está alinhado com a Portaria do DNPM 70389 de 17 de maio de 2017. Foram definidas frequências de inspeção rotineiras para cada estágio de enchimento do reservatório até o período de operação que contempla os instrumentos e tipo de inspeção conforme evidenciado na tabela 3.1

TABELA 3.1 – Frequência de inspeções rotineiras

Tipo de Instrumento / Inspeção	Enchimento do Reservatório (Estágio 1)	Enchimento do Reservatório (Estágios 2 e 3)	Enchimento – Períodos de testes entre todos os Estágios	Período Inicial de Operação	Período de Operação
Inspeção Visual (Barragem)	2 por semana	2 por semana	2 por semana	Semanal	Quinzenal
Inspeção Visual (Interior da Galeria Operacional)	A cada 2 m de NA / Mensal	A cada 2 m de NA / Mensal	A cada 2 m de NA / Mensal	A cada 2 m de NA / Semestral	A cada 2 m de NA / Semestral
Piezômetros	3 por semana	3 por semana	Diária	2 por semana	Quinzenal
Inclinômetros	2 por semana	Semanal	Semanal	Semanal	Quinzenal
Indicadores de Nível de Água (INAs)	3 por semana	3 por semana	Diária	2 por semana	Quinzenal
Medidores de Vazão (Dreno de Pé)	--	3 por semana	3 por semana	2 por semana	Quinzenal
Marcos Superficiais	--	Semanal	Semanal	Quinzenal	Quinzenal
Inclinômetros Digitais – Sensores SAA (Galeria Operacional)	--	Diária	Diária	Diária	Semanal
Medidor de Nível de Água do Reservatório	--	Diária	Diária	Diária	Diária
Medidor de Vazão e/ou Régua Linimétrica (Galeria Operacional)	--	Diária / Horária	Diária / Horária	Diária / Horária	Diária / Horária
Levantamento Topobatimétrico	Semestral / Mensal	Semestral / Mensal	Semestral / Mensal	Semestral / Mensal	Semestral

Para o plano de monitoramento da estrutura da barragem, de acordo com o projeto, foram considerados os seguintes instrumentos apresentados na tabela 3.2.

TABELA 3.2 – Instrumentos considerados para monitoramento da barragem

INSTRUMENTO	QUANTIDADE
Piezômetros de tubo aberto tipo Casagrande	22
Piezômetros acústicos	17
Indicadores de nível de água (INAs)	7
Inclinômetros	5
Medidores de vazão (dreno de pé)	6
Radar	1

A equipe de projetos recomenda que cada instrumento instalado na barragem seja lido na mesma hora do dia e que após a instalação em campo a empresa responsável, forneça um relatório certificando a instalação do instrumento, além das informações de data, cotas, geometria do instrumento, materiais onde o instrumento foi empregado, log de sondagem, leitura “zero” do instrumento, dentre outras que forem necessárias.

A escolha dos instrumentos apresentados neste estudo de caso baseou-se em escopo técnico formulado por equipe multidisciplinar, levando em consideração a qualidade dos equipamentos, funcionalidades e conhecimento acerca dos principais fabricantes. A equipe técnica limita-se a sugerir os equipamentos e realiza solicitações quanto aos requisitos técnicos necessários. Há uma equipe de suprimentos, dedicada aos processos de aquisição, relacionando os critérios técnicos ao melhor custo dos equipamentos.

Inicialmente, a aquisição dos dados dos instrumentos existentes na barragem era realizada manualmente por técnicos da área de geotecnia e os dados eram inseridos nos sistemas com periodicidade conforme tabela 3.1 ou sob demanda da engenharia. Ao passo que os processos de operacionalização da barragem eram realizados surgiu a demanda para automatização da coleta dos dados e que estes fossem disponibilizados de forma *online* para as equipes de interessadas e para organização.

3.2 Automação dos Piezômetros de Corda Vibrante

Os piezômetros de corda vibrante utilizados foram os instrumentos do fabricante Geokon de modelo 4500 apresentado na figura 3.1. Para cada instrumento foi fornecido o certificado de calibração de acordo com a Rede Brasileira de Calibração (RBC), ou o equivalente internacional, que estivesse em conformidade com os procedimentos internacionais de

acreditação constantes *International Organization for Standardization (ISO) / International Electrotechnical Commission (IEC) Guide 25* e de rastreabilidade *Bureau International Des Poids et Mesures (BIPM)*. Além disso, também foram fornecidas as folhas de dados de cada instrumento com as informações de curva de conversão e compensações das leituras das pressões.

FIGURA 3.1 – Modelo do Piezômetro de Corda Vibrante utilizado



FONTE: Geokon (2019)

Tais piezômetros podem ser lidos manualmente com o uso de interface Geokon GK404 comumente chamada de *Read Out* que também tem a finalidade de realizar verificação/auditoria da leitura automatizada. A figura 3.2 apresenta um exemplo deste equipamento para coleta manual.

FIGURA 3.2 – Exemplo de equipamento utilizado para aquisição manual dos dados



FONTE: Geokon (2019)

O valor de saída entregue pelo piezômetro de corda vibrante da Geokon é dado em *Digits*. O *Digits* é expresso pela equação 3.1 abaixo:

$$Digits = \left(\frac{1}{\text{período}} \right)^2 \times 10^{-3} \text{ ou } Digits = \frac{Hz^2}{1000} \quad (3.1)$$

A unidade em *Digits* é diretamente proporcional a pressão aplicada, como pode ser visto na equação 3.2 abaixo:

$$Pressão = (Leitura Corrente - Leitura Zero Inicial) \times \text{Fator de Calibração Linear} \quad (3.2)$$

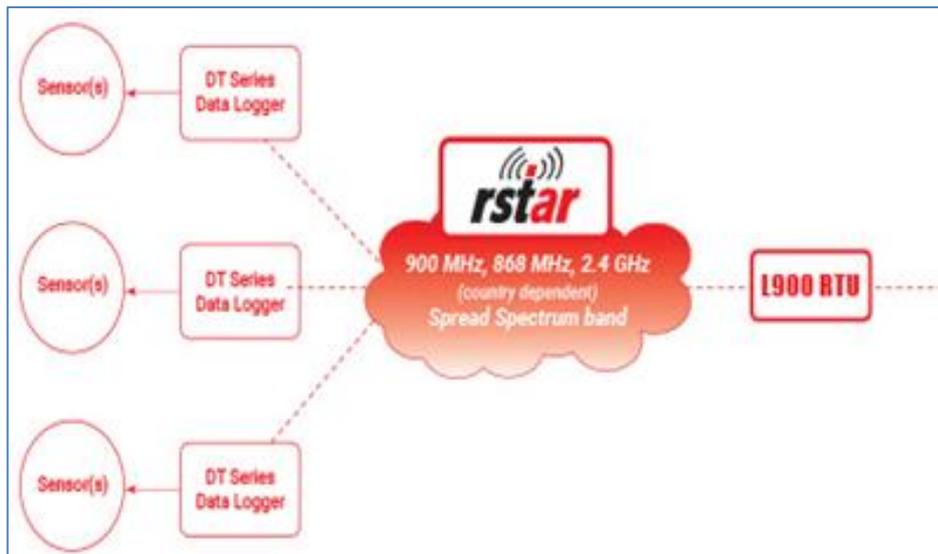
O piezômetro de corda vibrante é interligado aos terminais da unidade manual ou no sistema para automatização conforme tabela 3.3 abaixo:

TABELA 3.3 – *Pinout* piezômetro de corda vibrante Geokon

PINO	FUNÇÃO	COR DO CABO
A	Retorno positivo – Corda vibrante	Vermelho
B	Retorno negativo – Corda vibrante	Preto
C	Termistor – Compensação de temperatura	Branco
D	Termistor – Compensação de temperatura	Verde
E	Cabo <i>Shield</i>	<i>Shield</i>
F-K	Não usado	-

Para aquisição dos dados dos piezômetros e como parte do sistema de automação foram utilizados os módulos da fabricante RST *Instruments* que constituem a solução L900 apresentada pela RSTAR para aquisição *wireless* de instrumentos utilizados em empreendimentos geotécnicos. Parte da solução utilizada pode ser vista conforme arquitetura apresentada na figura 3.3.

FIGURA 3.3 – Arquitetura fornecedor RST automatização de instrumentos geotécnicos



FONTE: RST Instruments (2019) - Adaptado

Como apresentado na figura 3.3 os sensores são interligados aos *dataloggers* em campo e interligados via rede *wireless* a um módulo L900 *Remote Terminal Unit* (RTU) que posteriormente será o responsável por encaminhar os dados ao sistema de automação. Dois módulos RST *dataloggers* de conexão aos instrumentos foram utilizados, o de modelo DT2011B e o DT2055B, isso foi necessário pois, em alguns locais da barragem existem vários sensores piezômetros de corda vibrante em um mesmo furo e a diferença básica entre estes dois equipamentos consiste em que o DT2055B utilizado permite a ligação de até 5 sensores, enquanto o DT2011B é de apenas 1 canal. A figura 3.4 apresenta a instalação deste módulo em um painel na barragem e, na mesma imagem, pode ser visto o tubo de PVC com os terminais dos piezômetros pré-dispostos para interligação e automatização.

FIGURA 3.4 – Módulo DT2055B para aquisição e transmissão dos dados dos piezômetros



FONTE: Autor

A interligação dos piezômetros a estes módulos em campo, segue o *pinout* dos instrumentos apresentados na tabela 3.3. Além disso, na carcaça dos *dataloggers* de campo há um esquema de ligação que facilita a atividade conforme apresentado na figura 3.5. Nesta figura, também pode ser visto os detalhes internos do equipamento que, tal como citado no capítulo 2, apresenta baixo consumo de energia, e por isso utiliza pilha para alimentação, além da placa *XBEE* que funciona como um rádio *wireless* de 900MHz para comunicação com a unidade central.

FIGURA 3.5 – Detalhe do DT2055B e esquema de ligação



FONTE: Autor

Estes módulos *datalogger* em campo são os responsáveis por coletar e transmitir os dados dos sensores piezômetros de corda vibrante a uma unidade central. Devido a isso, estes módulos são os *Slaves Nodes* e a unidade central apresentada na figura 3.6 é o *Master Node* que recebe as informações dos dispositivos ao longo da barragem, e interligado via rede Modbus RTU, permite a leitura remota e as diversas configurações necessárias.

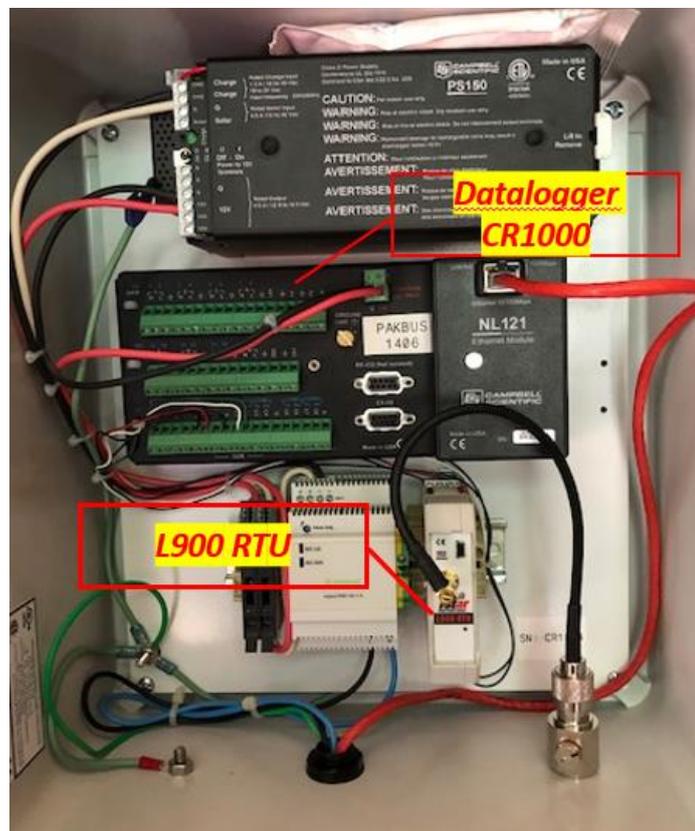
FIGURA 3.6 – L900 RTU - Master Node



FONTE: RST Instruments (2019)

O módulo RTU L900 apresentado na figura 3.6 armazena temporariamente os dados coletados dos *slave nodes* que são sobrescritos à medida que novos dados são coletados. Fazem parte destes dados o endereço do módulo, o endereço do *hub*, o número de série do módulo do sensor, diagnósticos e os valores coletados. Na solução de coleta automática, o *hub* RTU é interligado ao canal de leitura Modbus do *datalogger* CR1000 da fabricante *Campbell Scientific*, o qual possui compatibilidade com os instrumentos da RST. A figura 3.7 apresenta o painel de instalação da unidade central, de onde via rede *wireless* parte a comunicação para os módulos instalados em campo, os demais equipamentos do painel fazem parte do circuito para alimentação elétrica e miscelâneas para prover a comunicação.

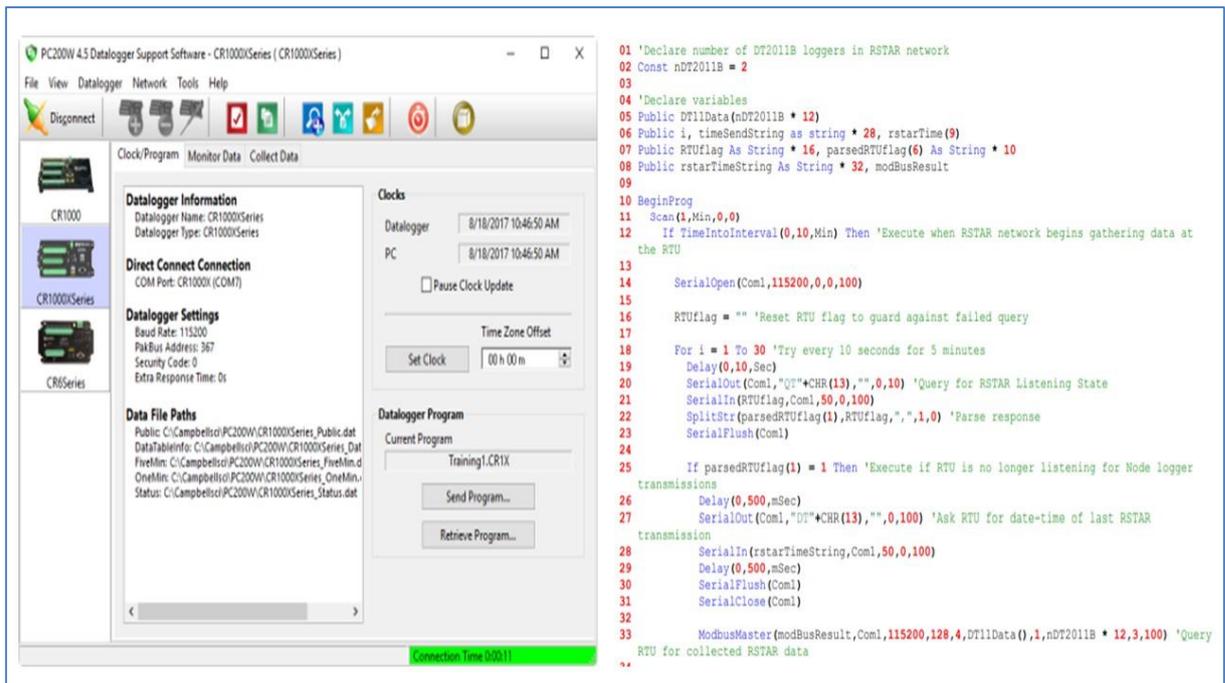
FIGURA 3.7 – Unidade central para comunicação com os módulos em campo



FONTE: Autor

Todos os dispositivos são configurados via software de acordo com o software proprietário de cada equipamento. Para o CR1000 via software *LoggerNet* são realizadas as configurações do *CRBasic Code* que irá atribuir os dados de diagnóstico e leitura dos módulos em campo, além de realizar as conversões necessárias e salvar os resultados em *DataTable* compatível para ser lida pelo sistema de automação. O exemplo da configuração do *datalogger* no *LoggerNet* e de parte do *CRBasic Code* no aplicativo segue apresentado na figura 3.8.

FIGURA 3.8 – Exemplo de configuração no *LoggerNet* e *CRBasic Code* no aplicativo



FONTE: CampbellSci (2019) - Adaptado

O CR1000 instalado é um dispositivo que faz parte da rede de automação sendo interligado via interface *Ethernet* com protocolo *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP). Portanto, neste caso, as informações dos piezômetros de corda vibrante da barragem podem ser facilmente coletadas pela rede de controle de automação.

O aplicativo citado *LoggerNet* da *Campbell Scientific* foi instalado em um servidor de dados já no ambiente controlado da automação. Os dados coletados por este servidor *LoggerNet* são oriundos dos instrumentos em campo e possuem formato padrão. As *Data Table* são geradas e contém as informações dos piezômetros em campo. Com um módulo *OPC Server* da *Campbell Scientific* instalado no mesmo servidor, os dados dos instrumentos são publicados no padrão OPC facilitando a leitura pela organização.

3.3 Automação dos Piezômetros *Standpipe* e Indicadores de Nível de Água (INA)

Para automação dos piezômetros *Standpipe* e os indicadores de nível de água da barragem foram utilizados os sensores da fabricante *General Electric* (GE) de modelo PTX1830 conforme apresentado na figura 3.9.

FIGURA 3.9 – Sensor da GE utilizado para automação dos Piezômetros *Standpipe* e INA



FONTE: GE (2013)

Este sensor é muito utilizado na medição de pressão e nível de água e foi fabricado para trabalhar totalmente submerso. Um transdutor de pressão interno detecta as alterações de pressão exercidas por uma coluna de água e converte eletronicamente para um sinal 4 a 20 *miliampères* (mA) que por sua vez pode ser ligado a um indicador ou *datalogger* (GE, 2013).

O instrumento é adquirido de acordo com a sua faixa de pressão dada em *Pount Force per Square Inch* (PSI) e a saída em 4 a 20mA se altera linearmente de acordo com a pressão máxima especificada. Para a conversão da pressão medida em indicação de nível de água a fórmula 3.3 deve ser considerada.

$$H = \frac{P \times C}{Sg} \quad (3.3)$$

onde,

H: Altura (m)

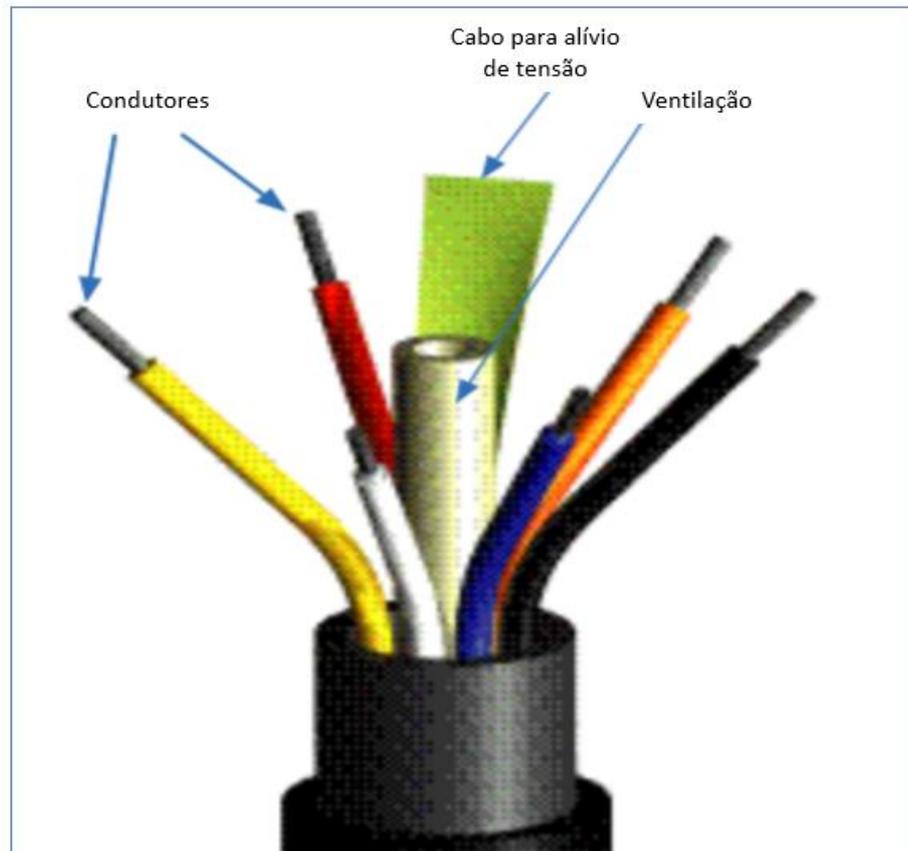
P: Pressão (bar)

C: Fator de conversão de pressão em bar para m

Sg: Gravidade específica do fluido

O sensor PTX1830 foi projetado para não ser afetado pelas mudanças de pressão barométrica, uma vez que junto aos seus cabos é incorporado um tubo de ventilação garantindo que a pressão atmosférica seja a referência para o diafragma do instrumento, conforme evidenciado na figura 3.10. Este tubo não pode ser dobrado e obstruído e, por isso, a instalação deve ser realizada seguindo os procedimentos (IN-SITU, 2019).

FIGURA 3.10 – Detalhe dos condutores e tubo de ventilação do PTX-1830



FONTE: GE (2013) - Adaptado

Para incorporar os sensores dos piezômetros *Standpipe* e INAs ao sistema de automação da planta, foram utilizados adaptadores de rede *WirelessHART* que possuem entradas 4 a 20mA e proveem alimentação elétrica aos medidores. Vale ressaltar que estes adaptadores, não possuem fios para a alimentação elétrica, apenas baterias de vida-útil considerável.

Existem diversos fabricantes que fornecem esses adaptadores *WirelessHART*, apesar de termos outros modelos, os mais utilizados na barragem objeto de estudo, são os da Endress+Hauser e Pepperl+Fuchs. A figura 3.11 apresenta a instalação deste instrumento em campo, como é

possível ver a estrutura foi alocada acima do Piezômetro *Standpipe* ou do INA para proteção da infraestrutura e facilidade de interligação ao sensor de pressão.

FIGURA 3.11 – Detalhe do adaptador *WirelessHART* e cabos do sensor GE PTX-1830



FONTE: Autor

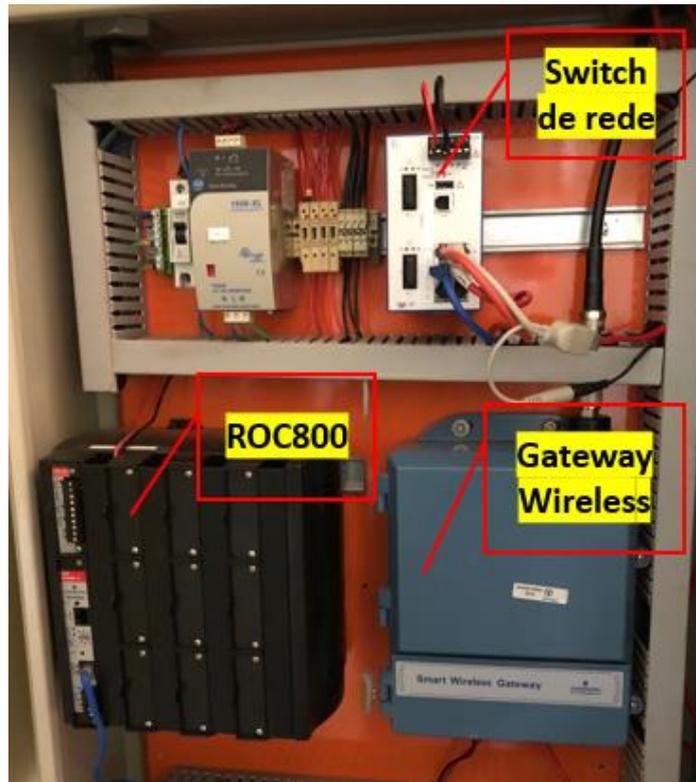
Este instrumento consiste em um módulo de interface inteligente com *WirelessHART* com fonte interna para alimentação de equipamentos em campo. Ele realiza a transmissão sem fio de sinais de 4 a 20mA/HART a um *gateway WirelessHART*, tal como apresentado no item 2.4.3 deste trabalho. A figura 3.12 apresenta a ligação entre o adaptador *wireless* e o sensor em campo, além do detalhe da bateria que provê alimentação aos dispositivos.

FIGURA 3.12 – Detalhes da bateria e interligação do sensor de pressão



FONTE: Autor

A comunicação *wireless* apresenta topologia *mesh* e é gerenciada, bem como as informações são concentradas, no *gateway WirelessHART* da fabricante Emerson de modelo 1420 conforme figura 3.13. O *gateway* por sua vez, possui comunicação por rede ethernet, sendo interligado diretamente ao sistema para gerenciamento remoto da automação através dos dispositivos de rede como o *switch* também detalhado na imagem. O componente ROC800 descrito na imagem está sendo utilizado como um *datalogger* das informações coletadas pelo *gateway* Emerson, mas esta não é objeto de estudos deste trabalho.

FIGURA 3.13 – Instalação da unidade central da *Gateway*

FONTE: Autor

Através da conexão remota ao *gateway* é possível realizar diversas configurações e monitoramento dos adaptadores *wireless*, entretanto, como os fabricantes são diferentes daquele do *gateway*, nem todas as funções para configuração dos instrumentos estão disponíveis, sendo necessário, principalmente no *startup*, o comissionamento dos equipamentos em campo. A figura 3.14 apresenta a tela inicial do software de interface para a configuração e monitoramento dos instrumentos interligados ao *gateway* e a figura 3.15 os detalhes de configuração de um instrumento, bem como os detalhes da sua vizinhança na rede *mesh*.

FIGURA 3.14 – Tela inicial configuração gateway Emerson

The screenshot shows the Emerson Wireless Gateway configuration interface. The top navigation bar includes 'Home', 'Devices', and 'System Settings'. The main content area is divided into several sections:

- Notifications:** A summary of device status: All Devices (31), Live (31), and Unreachable (0). It also shows 'Power Module Low' (0) and 'Gateway Load' (30%).
- Tasks:** A section for pending tasks, currently showing 'No Pending Tasks'.
- Unreachable:** A section for unreachable devices, currently showing 'No results found'.
- New:** A table listing recently added devices (last 5 devices):

Device ID	Date Added	Current PV
023-PCIT-108	06/03/19 20:11:06	4.484
023-LIT-105	06/03/19 20:11:30	11.464
023-PCIT-110	06/03/19 20:11:40	3.927
023-PCIT-103	06/03/19 20:11:57	4.321
023-LIT-106	06/03/19 20:12:32	9.487
- Changes:** A table for device changes, currently showing 'No data available'.
- Network Best Practices:** A section showing '5 devices within range of gateway' (100%) and '25% devices within the single hop of gateway' (100%).

FONTE: Autor

FIGURA 3.15 – Detalhe de informação de um instrumento no gateway

The screenshot shows the detailed information for a specific instrument in the Emerson Wireless Gateway configuration interface. The top navigation bar includes 'Home', 'Devices', and 'System Settings'. The main content area is divided into several sections:

- Devices:** A summary of device status: All Devices (30), Live (30), and Unreachable (0). It also shows 'Power Module Low' (0).
- Devices List:** A table listing all devices, currently showing 100 devices. The table has columns for Name, PV, SV, TV, QV, and Last Update.
- Detailed Device Information:** A section for the selected device, showing:
 - HART Details:**
 - HART Status:** OK
 - Tag Name:** 023-FIT-100
 - Device Id:** 00-1B-1E-26-6E-4C-59-B7
 - PV Units:** mm
 - Burst Rate:** 00:05:00
 - Lower Range Value:** 0.000
 - Upper Range Value:** 300.000
 - Range Units:** mm
 - Transfer Function:** Linear
 - Current:** NaN
 - Edit HART Details:** A button to edit the HART details.
- Network:**
 - Last Join:** 06/03/19 20:19:27
 - Total Joins:** 1
 - Service Denied:** no
 - Event Count:** 0
 - Path Stability:** 100%
 - RSSI:** -73 dB
 - Network Reliability:** 100%
 - Neighboring Devices:**
 - 023-FIT-102: 100%
 - 023-PCIT-110: 73.8%
 - Neighboring Devices Stability:**
 - 023-FIT-102: 100%
 - 023-PCIT-110: 73.8%

FONTE: Autor

O *gateway WirelessHART* fornece suporte a comunicação por protocolo OPC, desta maneira, uma vez conectado à rede de gerenciamento da planta, as variáveis coletadas por este dispositivo são facilmente publicadas ao sistema de monitoramento.

3.4 Automação dos Medidores de Vazão da Drenagem Interna

A medição de vazão da drenagem interna do barramento da barragem é realizada na maior parte dos casos com uso de calhas com vertedouro tipo “V”. Conforme apresentado no item 2.3.3, para estes casos, mede-se a altura da lâmina de água que passa através da estrutura e é então aplicada uma fórmula para conversão ao valor de vazão volumétrica.

Os vertedouros instalados no barramento não possuem o ângulo de abertura de 90° e devido a isso, a equação de Thompson não pôde ser diretamente utilizada, sendo necessárias algumas especificações da equipe de projetos para composição do cálculo de vazão. Sendo assim, a fórmula utilizada para o cálculo de vazão foi embasada na semelhança de triângulos e trigonometria e, a vazão teórica é apresentada na equação 3.4 (OLIVEIRA, 2014).

$$Q = Cd \times \frac{8}{15} \times \sqrt{2 \times g} \times \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \times H_2^5 \quad (3.4)$$

Onde,

Q: vazão volumétrica calculada (m³/s)

Cd: coeficiente de descarga (dado experimental)

g: gravidade (m/s²)

Θ: ângulo de abertura do vertedouro

H: altura da lâmina de água (m)

Dessa maneira, para gerar a informação de vazão destes locais, foram instalados medidores de nível com funcionamento por princípio de radar de onda guiada e que também possui protocolo de comunicação *WirelessHART* para integração direta ao *gateway*. O modelo definido foi o Rosemount 3308 da Emerson. A figura 3.16 apresenta a instalação deste instrumento com detalhe para o vertedouro em “V” na mesma imagem.

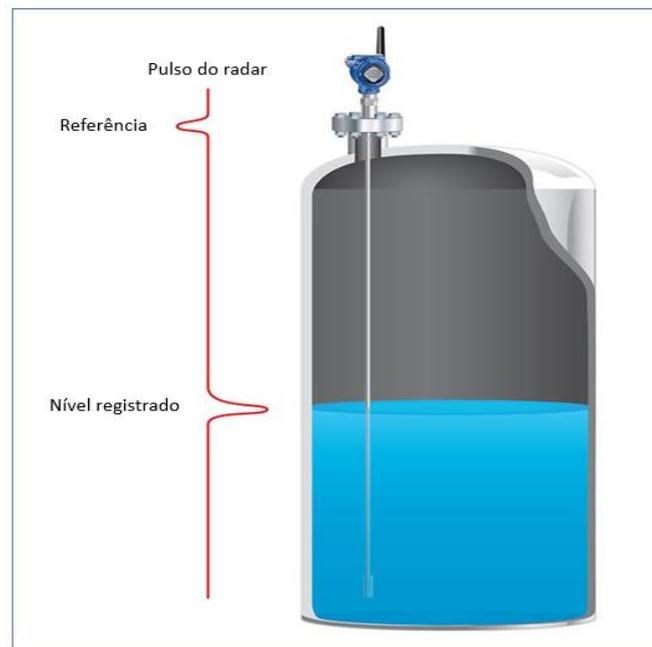
FIGURA 3.16 – Detalhe do medidor de nível e vertedouro tipo “V” para cálculo de vazão



FONTE: Autor

O radar de ondas guiadas é baseado na tecnologia de micro-ondas que são geradas pelos materiais que refletem energia, dessa maneira, variações do meio, como temperatura, poeira, pressão e viscosidade não interferem na precisão do instrumento. Este tipo de instrumento envia um pulso de micro-ondas de baixa energia por uma sonda acoplada a uma cabeça eletrônica, quando este pulso toca o meio, uma proporção desta energia é refletida de volta. O nível do meio é diretamente proporcional a medição da reflexão em domínio do tempo. A figura 3.17 apresenta o esquema de funcionamento destes instrumentos, neste caso, instalado em um tanque para medição de nível (EMERSON, 2019).

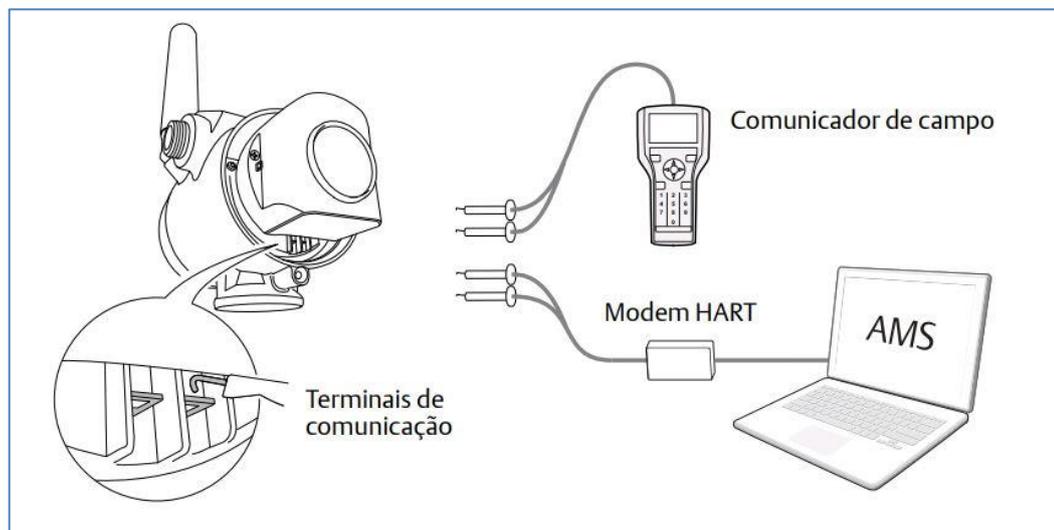
FIGURA 3.17 – Princípio de funcionamento do radar de onda guiada



FONTE: Emerson (2019) - Adaptado

Este instrumento é adquirido com um comprimento padrão da sonda, então na instalação e conforme manual do produto, é necessário adequar o comprimento para que a parte inferior da sonda fique com determinada folga do fundo da calha no nosso caso. Após estas adequações feitas e de posse dos dados de comprimento final e profundidade da calha, é então realizada a configuração do instrumento que pode ser por comunicador de campo ou sistema *Asset Management System* (AMS) da Emerson conforme esquema apresentado na figura 3.18.

FIGURA 3.18 – Métodos de interligação para configuração do instrumento



FONTE: Emerson (2014)

Na interface de configuração, como foram utilizados instrumentos da empresa Emerson, basta identificar a rede *WirelessHART* disponível, e efetuar o comando *Join Device to Network* aplicando a *Join Key* disponível no *gateway* utilizado. No caso, como estes medidores de nível fazem parte da rede de instrumentos da mesma barragem, eles foram conectados a mesma rede do *gateway* citado no item 3.3 deste trabalho, sendo que as suas informações OPC foram publicadas para a organização.

3.5 Comunicação OPC e Sistema PIMS

Conforme mencionado nos tópicos 3.2, 3.3 e 3.4 a comunicação dos instrumentos é centralizada em uma unidade central, que possui autonomia de energia elétrica e que por sua vez está conectada ao “ambiente” de gerenciamento da automação através de um sistema robusto de redes de telecomunicação.

Para as aplicações da área da barragem foi utilizado um servidor dedicado, no qual estão instalados os aplicativos para as configurações disponíveis dos instrumentos citados, dentre outros, além dos softwares necessários para publicação dos dados em OPC. A tabela 3.4 apresenta os softwares utilizados, as suas funções principais e a qual sistema relacionado a este trabalho eles são aplicados. Por sua vez, este servidor faz parte do grupo de OPC *Server* disponibilizando as informações para clientes que disponibilizarão os dados para tratamento no PIMS.

TABELA 3.4 – Softwares instalados, funções básicas e aplicação

Software	Função	Aplicação
<i>LoggerNet Admin</i>	Configuração e testes de comunicação dos <i>datalogger</i> , edição do <i>CRBasic Code</i> , leitura e edição das tabelas dos instrumentos, comandos de agendamento de coletas etc.	Piezômetros de corda vibrante
<i>Campbell Scientific OPC Server</i>	Comunicação protocolo OPC	Piezômetros de corda vibrante
<i>Emerson Process Management – Security Setup</i>	Configuração da comunicação e monitoramento do <i>status</i> das <i>Gateway</i> Emerson	Piezômetros <i>Standpipe</i> , INAs e Medidor de nível por onda guiada

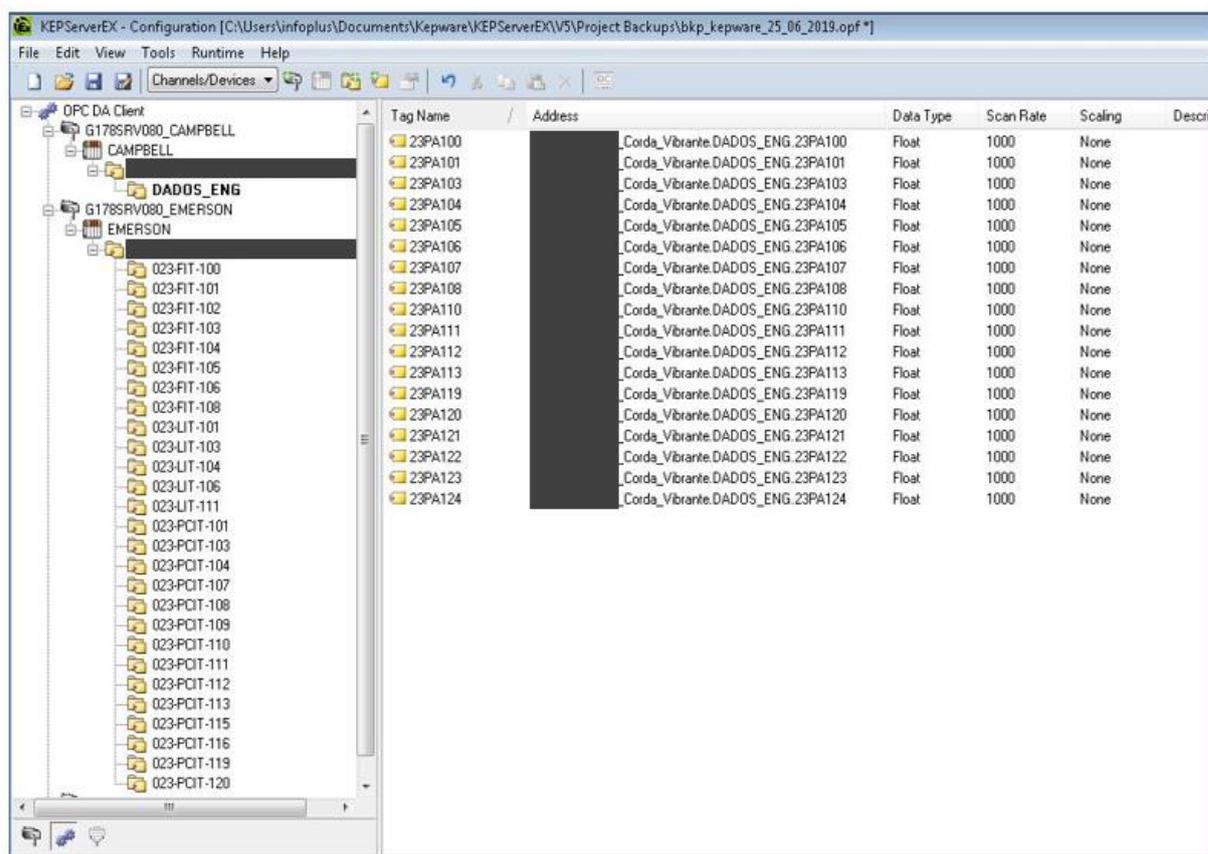
KEPServer EX5	Configuração da comunicação OPC <i>Client</i> , configuração das <i>tags</i> para leitura OPC, configuração do OPC UA e testes de comunicação OPC	Todos os sistemas envolvidos neste trabalho
---------------	--	--

Alguns softwares não estão instalados neste servidor, pois requerem comunicação local, tal como os instrumentos do fabricante RST e o acesso a algumas funcionalidades de adaptadores *WirelessHART* que não são da empresa Emerson. Além disso, o acesso ao *gateway* Emerson é realizado pelo endereçamento IP no navegador nativo do próprio servidor.

Para os piezômetros de corda vibrante o aplicativo *Campbell Scientific OPC Server* funciona como um OPC *Server DA*, e para os instrumentos atrelados a *gateway* Emerson, com o aplicativo devidamente instalado, a *gateway* funciona como um OPC *Server DA*. Sendo assim, para leitura das variáveis neste servidor, basta a aplicação de um OPC *Client DA* instalado para que a comunicação OPC com os dispositivos em campo sejam satisfeitas.

Esta é a função básica do software KEPServerEX da desenvolvedora Kepware que foi instalado neste servidor. Ele tem como característica ser um cliente para servidores de dados de diversos padrões, assim como OPC DA e, um servidor no padrão OPC UA dentro de uma mesma plataforma. Este aplicativo ainda tem as funcionalidades de integração de vários servidores OPC em um único, onde podem ser criadas conexões para cada servidor UA e os dados serem disponibilizados em um só sistema.

Para os instrumentos que utilizam o OPC *Server* da *Campbell Scientific* foi criado o canal OPC DA *Client Campbell* e para os instrumentos que utilizam o *gateway* Emerson o canal foi nomeado de Emerson. Além disso, todas as *tags* dos instrumentos envolvidos foram devidamente criadas com o relativo endereço OPC para coleta. A figura 3.19 apresenta a configuração realizada no servidor que realiza comunicação direta com estes ativos da barragem.

FIGURA 3.19 – KEPServer EX *Configuration* para os OPC DA Server

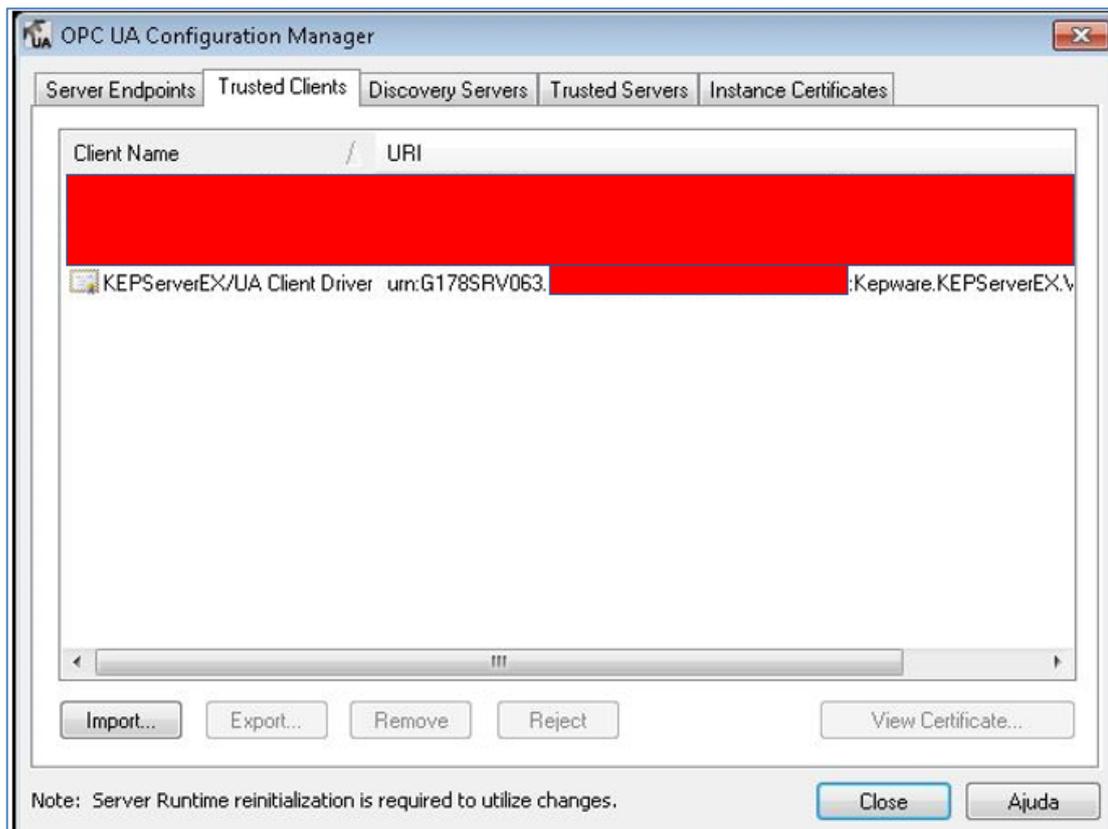
FONTE: Autor

Como dito anteriormente, a configuração apresentada na figura 3.19 foi feita no servidor que é de domínio da automação e que possui comunicação direta com os ativos da barragem. Isso quer dizer que tanto os ativos (*gateway* Emerson e CR1000) interligados via rede, quanto este servidor, fazem parte da rede interna de controle da automação. Na empresa o sistema PIMS é escopo da área de TI e devido a isso, os servidores que suportam o PIMS não fazem parte da rede interna da automação. Por estes motivos, para melhor segregação das redes, e maior segurança do ambiente de automação, foi implantada a camada de rede DMZ para interface com a TI, e conseqüentemente para as coletas das variáveis pelo PIMS.

Assim, apesar das *tags* apresentadas na figura 3.19 já estarem disponíveis para leitura remota no ambiente da automação, foi utilizada a funcionalidade OPC UA do software da Kepware para prover uma troca de dados com um outro servidor na camada de rede DMZ que por sua vez realizará a troca de dados via padrão OPC com o PIMS, dessa forma isolando a rede interna e garantindo maior segurança para o ambiente.

Na funcionalidade OPC UA *Configuration* do Kepware no servidor do ambiente de automação, foi exportado o certificado de segurança do OPC *Server* que garante a identidade da estação e importado o certificado de segurança do OPC *Client* do servidor na camada de rede DMZ que consumirá os dados. Além disso, é necessário efetuar o comando de *Trust* de ambos os servidores nas guias do software. A figura 3.20 apresenta o OPC UA *Configuration* e o servidor OPC *Client* já com o devido *Trust* de certificado assinalado.

FIGURA 3.20 – OPC UA *Configuration*



FONTE: Autor

Com estas configurações realizadas em ambos os servidores, com diferenciação para o OPC UA *Configuration* do servidor na camada DMZ (o *trust* do certificado de segurança é realizado na aba *Trusted Servers*), é necessária uma configuração similar do KEPServerEX *Configuration* no servidor da camada DMZ, sendo que os canais de conexão são do tipo OPC UA e não mais OPC DA como no servidor da rede interna. A figura 3.21 ilustra a configuração do Kepware no servidor da camada de rede DMZ.

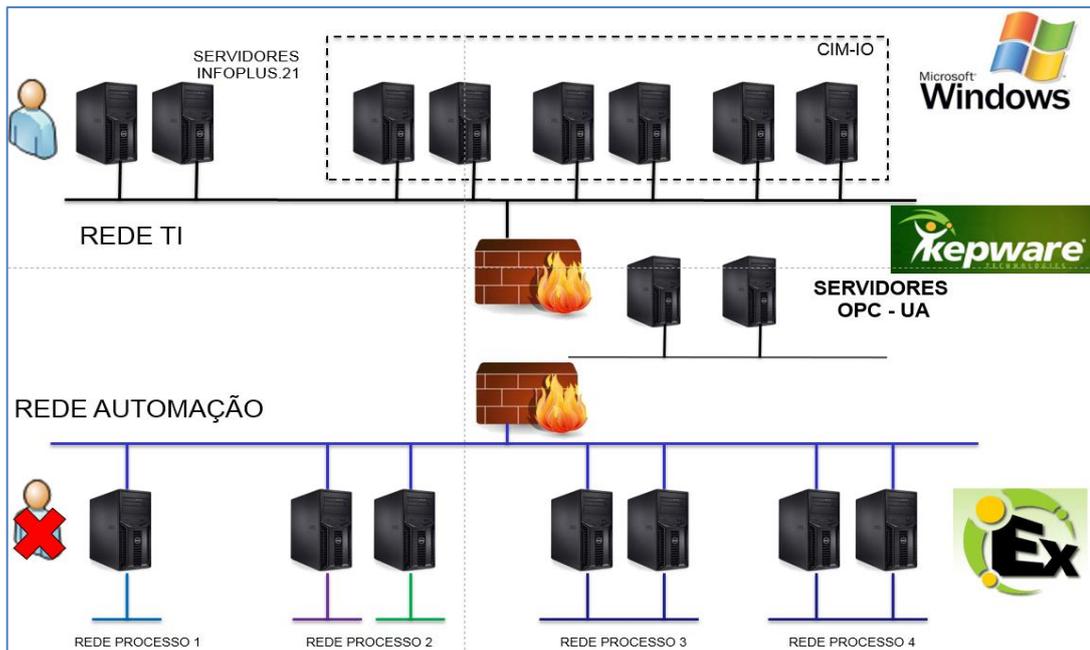
FIGURA 3.21 – KEPServer Configuration no servidor da camada DMZ

Tag Name	Address	Data T...	Sca...	Scaling	
23PA100	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL		Default	1000	None
23PA101	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA101	Default	1000	None
23PA103	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA103	Default	1000	None
23PA104	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA104	Default	1000	None
23PA105	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA105	Default	1000	None
23PA106	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA106	Default	1000	None
23PA107	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA107	Default	1000	None
23PA108	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA108	Default	1000	None
23PA110	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA110	Default	1000	None
23PA111	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA111	Default	1000	None
23PA112	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA112	Default	1000	None
23PA113	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA113	Default	1000	None
23PA119	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA119	Default	1000	None
23PA120	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA120	Default	1000	None
23PA121	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA121	Default	1000	None
23PA122	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA122	Default	1000	None
23PA123	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA123	Default	1000	None
23PA124	ns=2;s=G178SRV080_CAMPBELL.CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA124	Default	1000	None

FONTE: Autor

Este servidor da camada de rede DMZ por sua vez será a interface de comunicação com os servidores PIMS de responsabilidade da TI. A troca de dados também é realizado de acordo com o padrão OPC. As informações que são agora coletadas em campo, podem ser lidas pelo sistema PIMS e divulgadas a toda a organização de forma segura do ponto de vista do conceito de *Cyber Security*. A figura 3.22 apresenta o esboço da arquitetura entre servidores dos diferentes ambientes, até a interface com a TI com implantação de camada DMZ e uso de OPC UA para relação de confiança entre ativos previamente especificados.

FIGURA 3.22 – Esquema geral com implantação da camada DMZ entre TA e TI



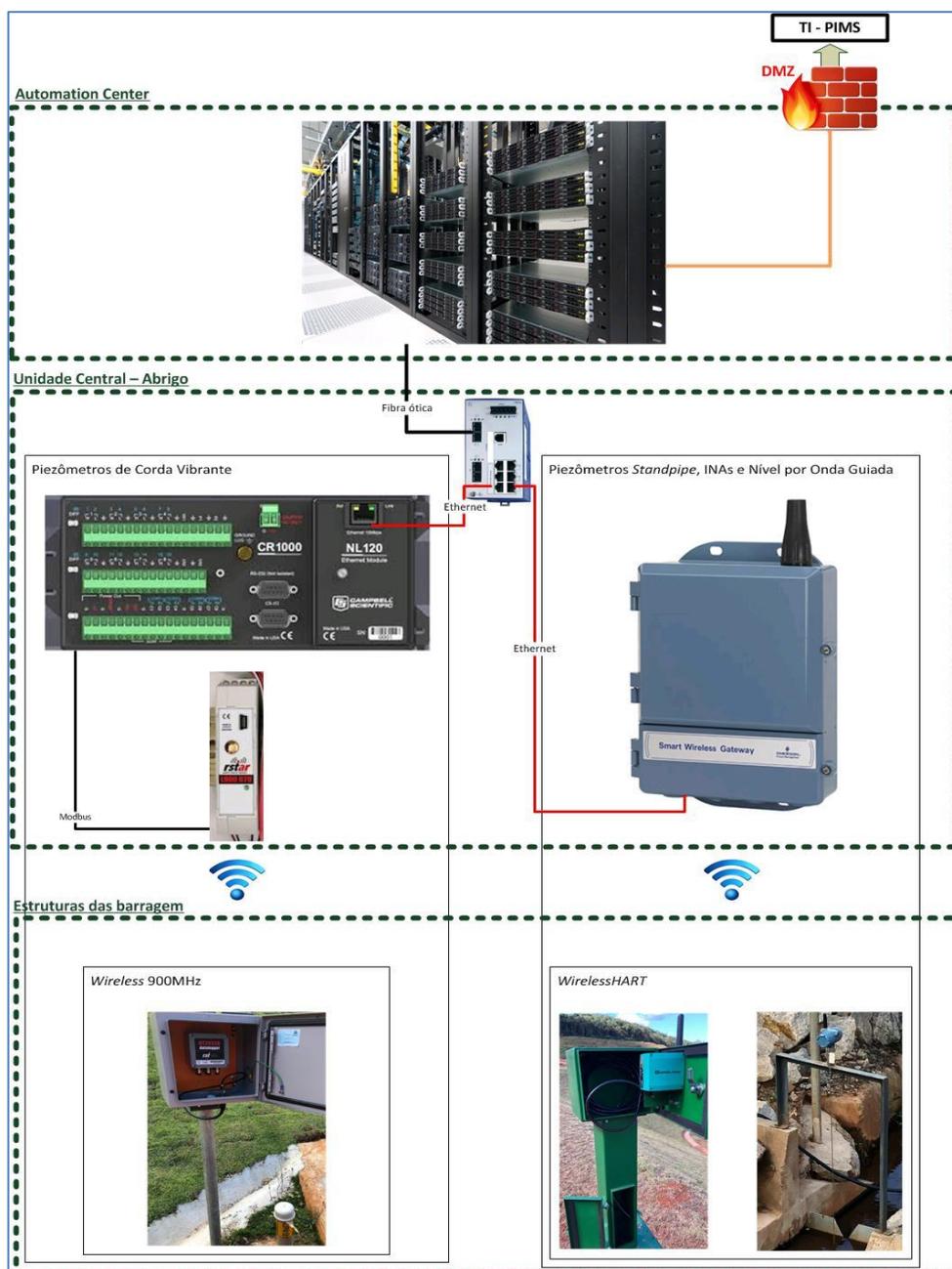
FONTE: Autor

Sendo assim, os dados coletados pelo sistema PIMS estão prontos a serem monitorados nos diferentes locais da empresa de forma *online* e com os históricos de acordo com o banco de dados. As variáveis que necessitam de conversão para determinada unidade de engenharia ou de algum cálculo, tal como para a medição de vazão a partir do sensor de nível, são reportadas por tabelas com indicação de conversão ou dos cálculos às equipes responsáveis da TI, bem como todas as outras variáveis com o devido endereçamento OPC para cadastro no banco de dados.

4 RESULTADOS

A implementação da solução proposta no capítulo 3 permite que os dados coletados em campo sejam disponibilizados para a organização de forma *online* e com históricos, além de serem integrados de maneira personalizada, de acordo com a necessidade de análise pelas equipes geotécnicas ou pelo monitoramento por parte da instrumentação e automação. O *overview* da solução, desde a coleta das variáveis em campo até a disponibilização para a organização é apresentado na figura 4.1.

FIGURA 4.1 – *Overview* geral da solução implementada



FONTE: Autor

Dos instrumentos existentes na barragem e objetos de estudo deste trabalho, 77% estão automatizados, sendo que a expectativa para os demais é que sejam migrados ainda este ano. A automatização ocorre por etapas, pois inicialmente, é necessário prover infraestrutura de comunicação do sistema de automação para a rede corporativa da empresa e, só então é realizada a migração do sistema de coleta manual para automático, com considerável esforço pela equipe de instrumentação em campo, além de considerar a prioridade dos geotécnicos.

Para os piezômetros de corda vibrante que foram automatizados, os dados lidos no LoggerNet e posteriormente publicados por OPC podem ser exibidos no próprio *software* conforme evidência apresentada na figura 4.2. Esta funcionalidade é utilizada para verificação e testes do *datalogger* e instrumentos. A *data table* “Dados_Eng” é a que contém os valores expressos em unidade de engenharia e que são publicados em OPC.

FIGURA 4.2 – Leitura piezômetros de corda vibrante

Field	Value
RecNum	2,699
TimeStamp	30/06/2019 08:40:00
23PA100	7,537 mH2O
23PA101	3,876 mH2O
23PA113	6,589 mH2O
23PA111	4,545 mH2O
23PA122	-1,321 mH2O
23PA103	-0,582 mH2O
23PA104	4,58 mH2O
23PA105	0,915 mH2O
23PA106	5,481 mH2O
23PA107	4,416 mH2O
23PA108	-0,746 mH2O
23PA110	-2,259 mH2O
23PA112	3,526 mH2O
23PA119	20,879 mH2O
23PA120	-1,459 mH2O
23PA121	-0,689 mH2O
23PA123	-0,671 mH2O
23PA124	-0,615 mH2O

FONTE: Autor

Já para os instrumentos que foram automatizados e estão interligados via *gateway WirelessHART* os dados coletados podem ser visualizados pela interface *web* conforme apresentado na figura 4.3, na coluna PV estão apresentadas as informações que são publicadas para comunicação OPC e que serão convertidas e inseridas em cálculos de acordo com o tipo da variável.

FIGURA 4.3 – Leitura dos instrumentos interligados a *Gateway Emerson*

Name	PV	SV	TV	QV	Last Update
023-FIT-100	9.073 mm	3.024 %	24.25 DegC	7.276 V	12/31/69 22:00:00
023-FIT-101	57.407 mm	19.136 %	24 DegC	7.288 V	12/31/69 22:00:00
023-FIT-102	107.229 mm	35.743 %	24 DegC	7.274 V	12/31/69 22:00:00
023-FIT-103	-87.008 mm	-29.003 %	23.25 DegC	7.293 V	12/31/69 22:00:00
023-FIT-104	14.825 mm	4.942 %	14.75 DegC	7.252 V	12/31/69 22:00:00
023-FIT-105	36.364 mm	12.121 %	25 DegC	7.283 V	12/31/69 22:00:00
023-FIT-106	0 mA	6.73 V	7.15 V	-64 User Defined (241)	12/31/69 22:00:00
023-FIT-108	0 mA	6.73 V	7.15 V	-77 User Defined (241)	12/31/69 22:00:00
023-LIT-100	8.782 mA	6.67 V	7.15 V	-69 User Defined (241)	12/31/69 22:00:00
023-LIT-101	18.207 mA	6.65 V	7.14 V	-82 User Defined (241)	12/31/69 22:00:00

FONTE: Autor

As informações publicadas em OPC pelos dispositivos, posteriormente lidas e publicadas pelos servidores *Keeware* também podem ser visualizadas para testes e manutenção pelas equipes de instrumentação e automação, pelo recurso OPC *Quick Client* contido no pacote de instalação do *KEPServerEX*, conforme apresentado na figura 4.4. Com este recurso é possível verificar o *status* das *tags*, o tipo da variável, o valor atualizado, além da indicação do *timestamp*. No servidor da camada de rede DMZ os resultados para testes das *tags* são os mesmos, tal como apresentado na figura 4.4, portanto a informação redundante para este item não será apresentada.

FIGURA 4.4 – Testes das variáveis com o OPC Quick Client

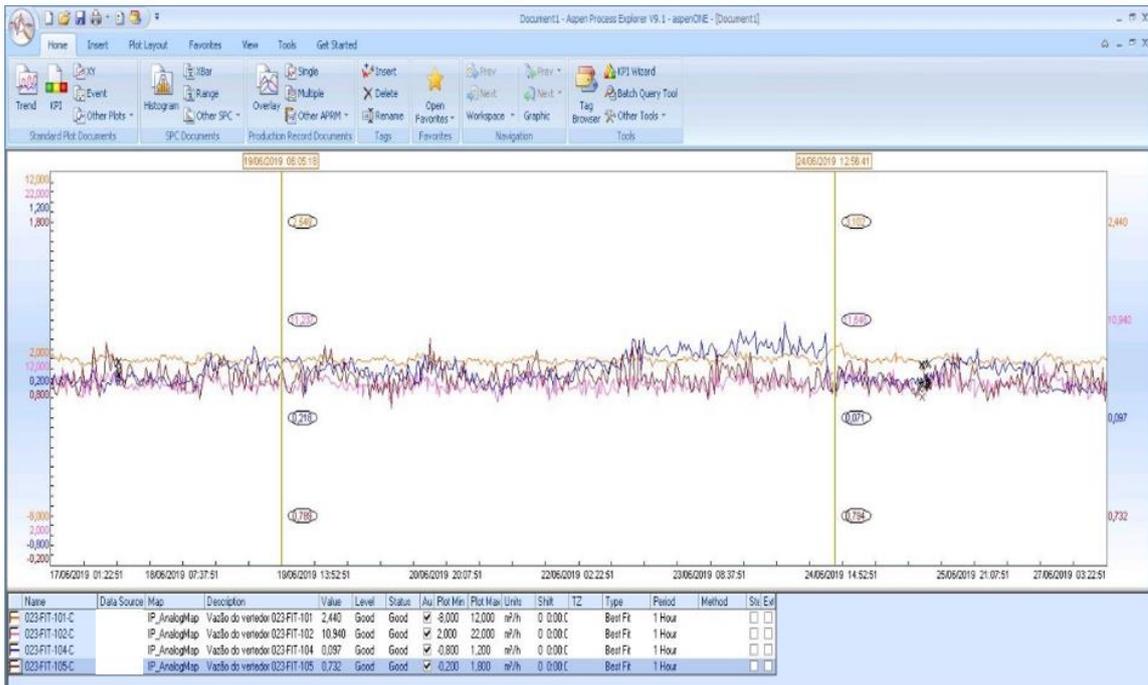
The screenshot shows the OPC Quick Client interface with a tree view on the left and a data table on the right. The tree view shows a group named 'Group0' containing 46 items. The data table has columns for Item ID, Data Type, Value, Timestamp, Quality, and Update Count. The items are organized into two main categories: 'CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA100' through '23PA124' and '023FIT-100.PV' through '023PDT-104.PV'. The values are floating-point numbers, and the quality is consistently 'Good'. The timestamp for all items is '09:30:00.000'. The update count is '1' for most items, and '2' for '023FIT-105.PV'. At the bottom, there is an event log showing three events: 'Connected to server Kapiware KEPServeEX.V5', 'Added group 'Group0' to Kapiware KEPServeEX.V5', and 'Added 46 items to group 'Group0''. The status bar at the bottom left says 'Ready' and the bottom right says 'Item Count: 46'.

Item ID	Data Type	Value	Timestamp	Quality	Update Count	
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA100	Float	7.536	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA101	Float	3.875	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA103	Float	-0.578	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA104	Float	4.579	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA105	Float	0.823	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA106	Float	5.486	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA107	Float	4.421	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA108	Float	-0.747	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA110	Float	-2.26	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA111	Float	4.58	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA112	Float	3.527	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA113	Float	6.588	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA119	Float	20.879	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA120	Float	-1.458	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA121	Float	-0.689	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA122	Float	-1.337	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA123	Float	-0.669	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_CAMPBELL_CAMPBELL	CORDA_VIBRANTE.DADOS_ENG.23PA124	Float	-0.611	09:30:00.000	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023FIT-100.PV	Float	7.70533	09:37:41.234	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023FIT-101.PV	Float	57.0924	09:38:23.194	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023FIT-102.PV	Float	107.193	09:38:57.300	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023FIT-103.PV	Float	-87.1907	09:37:41.244	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023FIT-104.PV	Float	15.221	09:38:54.410	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023FIT-105.PV	Float	36.7326	09:41:07.311	Good	2
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023FIT-106.PV	Float	0	14:49:38.102	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023FIT-108.PV	Float	0	14:51:34.473	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023LIT-101.PV	Float	18.2074	06:53:12.408	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023LIT-103.PV	Float	9.58759	09:23:36.794	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023LIT-104.PV	Float	7.33813	09:50:31.369	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023LIT-106.PV	Float	9.43225	08:47:16.235	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023LIT-111.COTA	Float	762.75	09:39:47.576	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023LIT-111.PV	Float	6.39068	09:39:47.576	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023PDT-101.PV	Float	4.03686	14:48:14.847	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023PDT-103.PV	Float	4.32105	01:47:13.297	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023PDT-104.PV	Float	4.07864	06:25:11.769	Good	1
G1785RV080_EMERSON_EMERSON	023PDT-107.PV	Float	4.0192	06:51:49.673	Good	1

FONTE: Autor

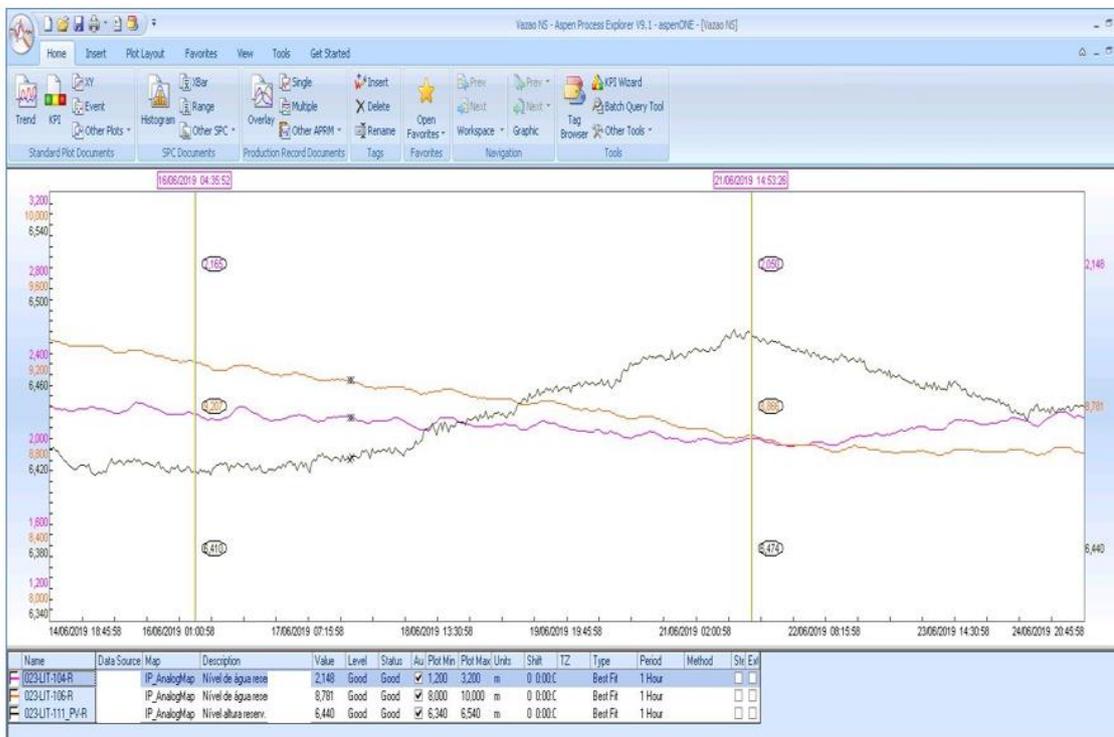
No sistema PIMS com as conversões e cálculos devidamente aplicados é possível monitorar as variáveis de forma gráfica, tal como apresentado nas figuras 4.5 para os medidores de vazão, na figura 4.6 para os medidores de nível e piezômetros *standpipe* e 4.7 para os piezômetros de corda vibrante. É possível também o monitoramento por telas sinóticas, criadas pela equipe da TI e disponibilizadas aos usuários conforme é apresentado na figura 4.8. Importante ressaltar que os gráficos são meramente ilustrativos, de forma que os eixos, escalas e demais parâmetros estão configurados para melhor visualização das imagens neste trabalho.

FIGURA 4.5 – Visualização das variáveis de vazão do vertedouro pelo PIMS



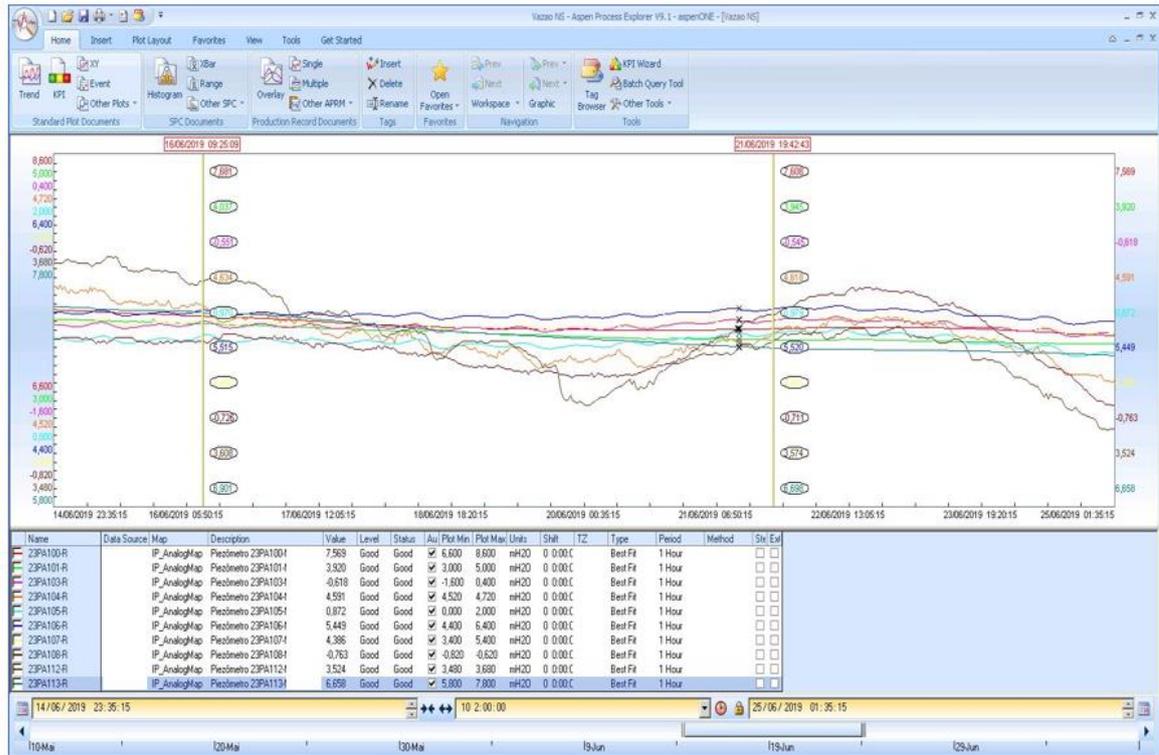
FONTE: Autor

FIGURA 4.6 – Visualização das variáveis de nível da barragem pelo PIMS



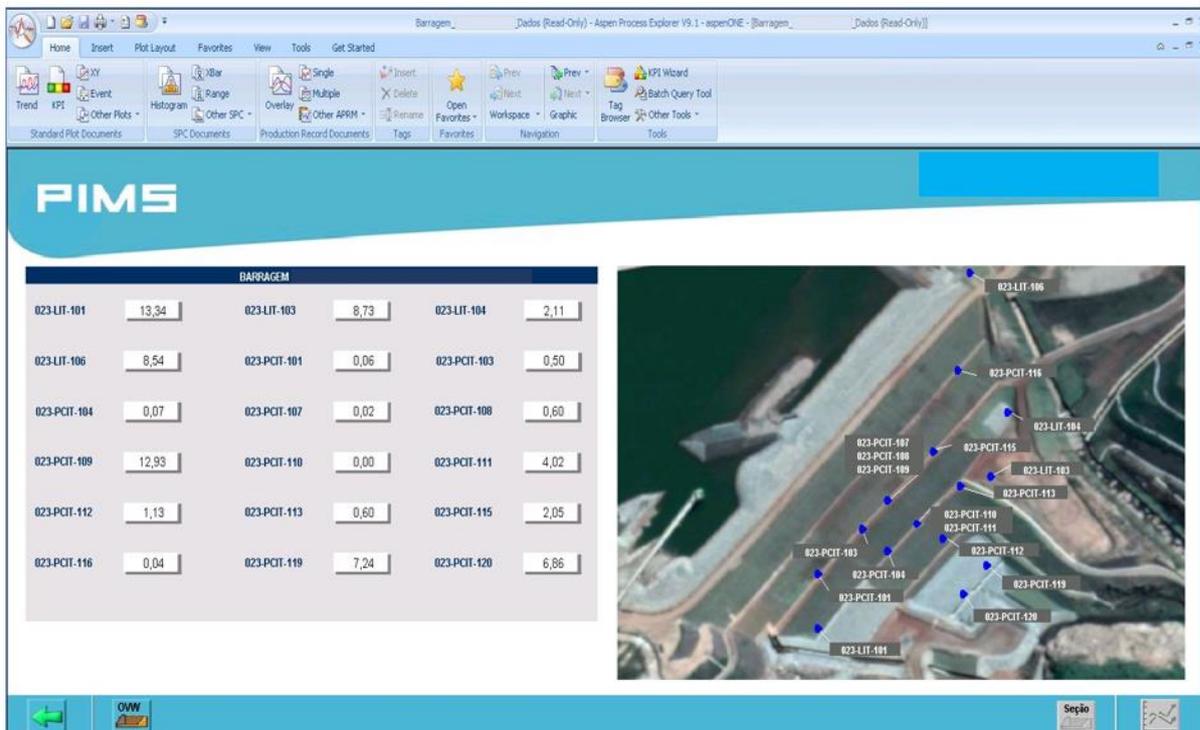
FONTE: Autor

FIGURA 4.7 – Visualização dos piezômetros de corda vibrante no PIMS



FONTE: Autor

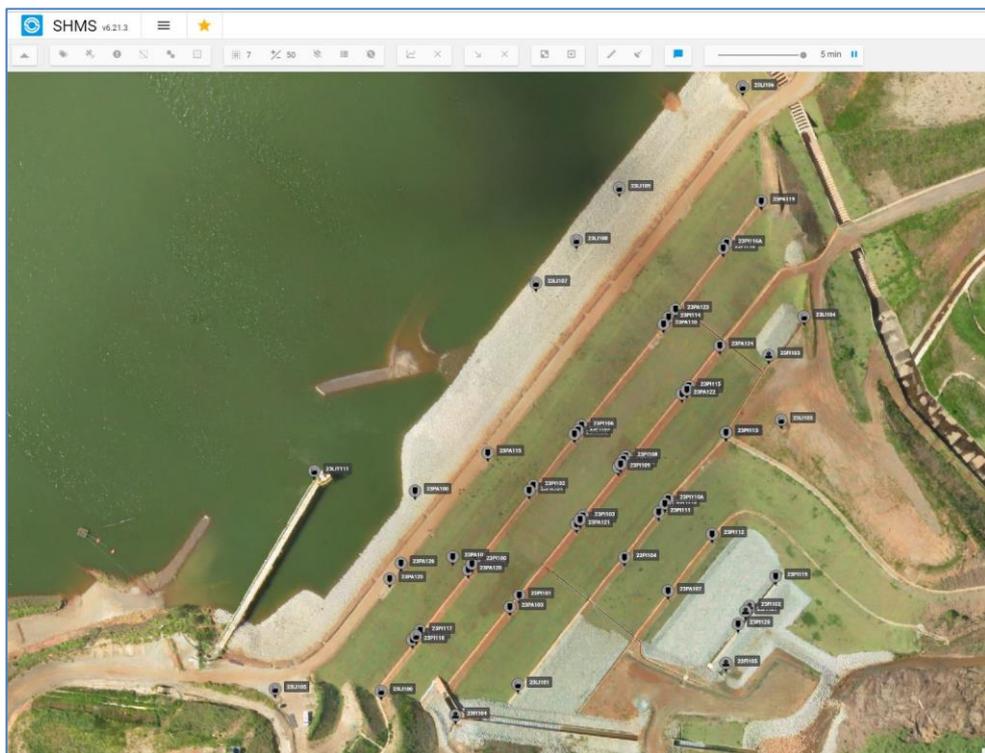
FIGURA 4.8 – Tela sinótica para monitoramento dos dados no PIMS



FONTE: Autor

Como a troca de dados para o ambiente corporativo ocorre por padrão OPC as informações coletadas são facilmente integradas em softwares personalizados que suportam melhor as questões de análise pelos responsáveis geotécnicos. Embasado nisso, a empresa adquiriu o software *Slope Health Monitoring System* (SHMS) que realiza a integração de instrumentos automáticos e manuais. Independentemente do tipo de origem dos dados, que são coletados e armazenados em uma estrutura *Big Data*, este software possibilita o monitoramento geotécnico, a análise e gestão dos riscos associados às estruturas do empreendimento, com utilização de ferramentas de processamento inteligente, alinhados a métodos estatísticos e de engenharia, visando minimizar as incertezas e apoio à tomada de decisão. A figura 4.9 apresenta o software SHMS com o monitoramento 2D da estrutura, onde são apresentados os instrumentos envolvidos neste trabalho (GOMES, 2017).

FIGURA 4.9 – Monitoramento da estrutura pelo SHMS

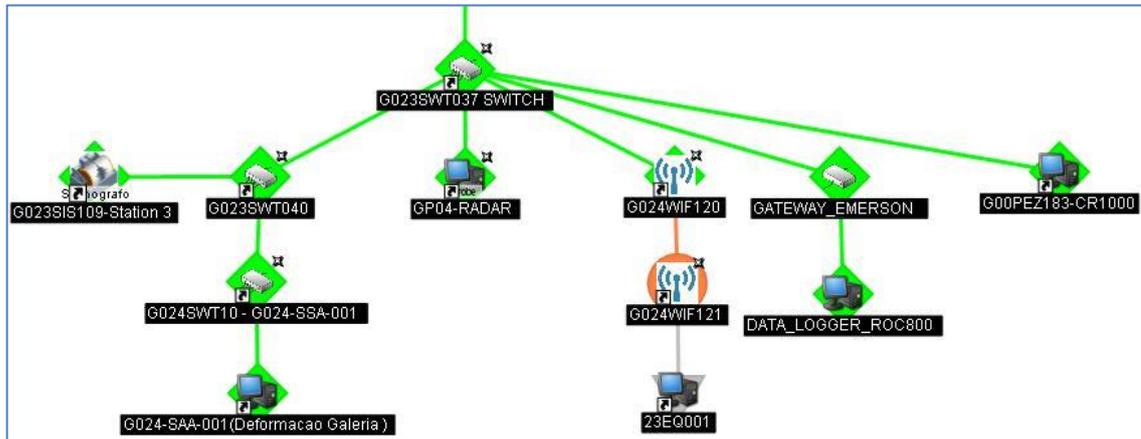


FONTE: Autor

Os ativos envolvidos no sistema e que possuem comunicação por rede ethernet foram incluídos no software *WhatsUP Gold*, que monitora o status dos dispositivos nele cadastrados e notifica via email os responsáveis para as devidas verificações. A figura 4.10 apresenta a árvore de configuração realizada no software para o monitoramento dos ativos da estrutura da barragem.

Trata-se de uma rede de tamanho considerável e devido a isso foram mantidas na imagem apenas os ativos envolvidos na estrutura deste trabalho.

FIGURA 4.10 – Árvore de monitoramento do *WhatsUp Gold*



FONTE: Autor

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

As barragens de mineração são estruturas que requerem monitoramento e inspeção contínua nas diferentes fases de sua existência, partindo de sua concepção até os processos de descomissionamento. Sejam por questões legais, morais, ou, mesmo éticas, mas sobretudo pelos riscos e potenciais danos associados por estes empreendimentos para o meio ambiente e as comunidades.

As tecnologias atuais sendo empregadas de forma concisa, propiciam a produtividade e o tempo de resposta para que eventuais anomalias nas estruturas das barragens possam ser visualizadas com antecedência e que medidas de controle possam ser tomadas antes que os desastres aconteçam. Tais tecnologias vêm suportar os trabalhos de análise realizados pelas equipes de especialistas de geotecnia que são incumbidos de monitorar e atestar a estabilidade destas estruturas.

Alinhado a isso, o uso de uma instrumentação robusta, integrada ao sistema de automação para o monitoramento de barragens de mineração, tal como o objetivo deste trabalho, permitiu que os dados coletados diretamente da barragem pudessem ser disponibilizados de forma *online* e com recursos para análise histórica.

Além disso, o uso de soluções para monitoramento dos dispositivos envolvidos e a aplicação de sistemas de energia ininterrupta propiciam alta disponibilidade dos dados e atuação ágil das equipes responsáveis na tratativa de eventuais falhas.

A comunicação *wireless* entre os instrumentos e as unidades centrais facilitou os processos de manutenção, instalação de novos instrumentos e também as questões de infraestrutura, uma vez que não há a necessidade de passagem de cabeamento pela estrutura da barragem o que tornaria o monitoramento integrado mais trabalhoso, com menor confiabilidade e possivelmente com número maior de falhas.

A aplicação da comunicação entre os principais dispositivos para o processo de automação do monitoramento e a rede corporativa, com troca de dados por padrão OPC, facilitou a integração das variáveis nos softwares dedicados para análises geotécnicas, assim como o

SHMS, além das informações coletadas estarem disponíveis aos usuários pelo sistema PIMS da empresa.

Por fim, este trabalho serve como referência para soluções de automação em processos de monitoramento de barragens, além de justificar o quão essencial é a integração dos dados para gerar informação.

Como sugestão a trabalhos futuros, fica a integração no sistema de automação para os demais instrumentos utilizados em barragens, como os radares, estações robóticas, pluviômetros e medidores de deslocamento por fibra ótica. Além disso, sugere-se uma apresentação mais detalhada acerca dos softwares dedicados a análises geotécnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abanco, C., Falgàs, E., Payàs, B. Péres-Arcas, J., Scott, P. (2016) Wireless Low Power Real-Time Solution For Tailing Dams – A Case Study. Australian Centre For Geomechanics. Disponível Em: <https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1604_47_abanco/> Acesso Em: 20 De Junho De 2019.

Agsolve (2019) Medidor de nível de água 101 – Solinst. Disponível em: <<https://www.agsolve.com.br/produto/979/medidor-de-nivel-da-agua-101>>. Acesso em: 29 de junho de 2019.

Amâncio, A. (2018) O protocolo LoRa. Disponível em: <<http://wireengenharia.com.br/br/o-protocolo-lora/>>. Acesso em: 22 de junho de 2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13028 (2017): Mineração – Elaboração e apresentação de projetos de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos.

Azevedo Netto, J. M. (1952) Medidores de regimen crítico: medidores parshall. Revista DAE: Edição 24. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_24_n_986.pdf. Acesso em: 05 de junho de 2019.

Bonifácio, T. G., Pantoni, R. P., Brandão, D. (2009) Análise Tecnológica de Redes Industriais Wireless. Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação. São Paulo. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228870917_analise_tecnologica_de_redes_industriais_wireless>. Acesso em: 22 de junho de 2019.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017. Segurança de Barragens. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/portaria-dnpm-n-70389-de-17-de-maio-de-2017-seguranca-de-barragens/view>>. Acesso em: 29 de junho de 2018.

CampbellSci (2019) LoggerNetAdm – Software administrador de registro de dados para grandes redes Versão 4. Disponível em: <<https://www.campbellsci.com.br/loggernet-admin>>. Acesso em: 20 de junho de 2019.

CampbellSci (2019) PC200W – Datalogger Starter Software. Disponível em: <<https://www.campbellsci.com/pc200w>>. Acesso em: 29 de junho de 2019.

Carvalho, F. B, Torres, B. S., Fonseca, M. O. e Filho, C. S. (2005) Sistemas PIMS Conceituação, Usos E Benefícios. Tecnologia Em Metalurgia E Materiais. São Paulo: v.1 n.4 pag. 1 à 5. 10.4322/tmm.00104001.

Cassiolato, C. (2019) WirelessHART – Características, tecnologia e tendências. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/wirelesshart-caracteristicas-tecnologia-e-tendencias>>. Acesso em: 24 de junho de 2019.

Castro, L. V. P. (2008) Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em engenharia ambiental. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Centrify (2018) Defining zones for computers in the DMZ. Disponível em: <https://docs.centrify.com/en/css/2018-html/index.html#page/Planning,_preparation,_and_deployment/Defining_zones_for_computers_in_the_DMZ.4.html>. Acesso em: 25 de junho de 2019.

Chammas Engenharia (2016) Monitoramento Geotécnico Automatizado. Disponível em: <<http://www.chammasengenharia.com.br/monitoramento-geotecnico-automatizado/>>. Acesso em: 18 de junho de 2019.

Dantas, M. (2010) Redes de Comunicação e Computadores: Abordagem Quantitativa. Florianópolis: Visual Books.

DGSI (2017) Pneumatic Piezometer. Datasheet disponível em:

<<https://durhamgeo.com/product/pneumatic-piezometers/>>. Acesso em 27 de maio de 2019.

DIG (2017) Instalação de régua é realizada pela ANA na barragem bico da pedra. Disponível

em: <[http://www.digi.org.br/noticia/Instalacao-de-regua-e-realizada-pela-ana-na-barragem-](http://www.digi.org.br/noticia/Instalacao-de-regua-e-realizada-pela-ana-na-barragem-bico-da-pedra-distrito-do-gorutuba/202/)

[bico-da-pedra-distrito-do-gorutuba/202/](http://www.digi.org.br/noticia/Instalacao-de-regua-e-realizada-pela-ana-na-barragem-bico-da-pedra-distrito-do-gorutuba/202/)>. Acesso em: 29 de maio de 2019.

Digi (2019) Digi XBee-PRO® 900HP - Long Range 900 MHz OEM RF Module. Disponível

em: <[https://www.digi.com/products/embedded-systems/rf-modules/sub-1-ghz-](https://www.digi.com/products/embedded-systems/rf-modules/sub-1-ghz-modules/xbee-pro-900hp)

[modules/xbee-pro-900hp](https://www.digi.com/products/embedded-systems/rf-modules/sub-1-ghz-modules/xbee-pro-900hp)>. Acesso em: 24 de junho de 2019.

Dunnicliff, J. (1988) Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. Ed.

John Wiley and Sons.

Emerson (2019) Emerson Wireless 1420 Gateway. Disponível em:

<<https://www.emerson.com/pt-br/catalog/emerson-sku-wireless-1420-gateway-pt-br>>. Acesso

em: 28 de junho de 2019.

Emerson (2019) About Guided Wave Radar. Disponível em: <[https://www.emerson.com/pt-](https://www.emerson.com/pt-br/automation/measurement-instrumentation/level/continuous-level-measurement/about-guided-wave-radar)

[br/automation/measurement-instrumentation/level/continuous-level-measurement/about-](https://www.emerson.com/pt-br/automation/measurement-instrumentation/level/continuous-level-measurement/about-guided-wave-radar)

[guided-wave-radar](https://www.emerson.com/pt-br/automation/measurement-instrumentation/level/continuous-level-measurement/about-guided-wave-radar)>. Acesso em: 29 de junho de 2019.

Emerson (2014) Radar por onda Guiada Sem Fio Rosemount série 3308, 3308A - Guia de

Início Rápido, Código de opção WU. Disponível em:

<[https://www.emerson.com/documents/automation/manuals-guides-radar-por-onda-guiada-](https://www.emerson.com/documents/automation/manuals-guides-radar-por-onda-guiada-sem-fio-rosemount-s%C3%A9rie-3308-3308a-guia-de-in%C3%ADcio-r%C3%A1pido-c%C3%B3digo-de-op%C3%A7%C3%A3o-wu-pt-80416.pdf)

[sem-fio-rosemount-s%C3%A9rie-3308-3308a-guia-de-in%C3%ADcio-r%C3%A1pido-](https://www.emerson.com/documents/automation/manuals-guides-radar-por-onda-guiada-sem-fio-rosemount-s%C3%A9rie-3308-3308a-guia-de-in%C3%ADcio-r%C3%A1pido-c%C3%B3digo-de-op%C3%A7%C3%A3o-wu-pt-80416.pdf)

[c%C3%B3digo-de-op%C3%A7%C3%A3o-wu-pt-80416.pdf](https://www.emerson.com/documents/automation/manuals-guides-radar-por-onda-guiada-sem-fio-rosemount-s%C3%A9rie-3308-3308a-guia-de-in%C3%ADcio-r%C3%A1pido-c%C3%B3digo-de-op%C3%A7%C3%A3o-wu-pt-80416.pdf)>. Acesso em: 29 de junho de

2019.

Endress and Hauser (2019) Adaptador WirelessHART. Disponível em:

<<https://www.br.endress.com/pt/produtos/Componentes/wireless-SWA70>>. Acesso em: 28 de

junho de 2019.

FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente (2017) Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração: Ano Base 2016. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente.

Fonseca, M. O. (2002) Comunicação OPC – Uma abordagem prática. VI Seminário de Automação de Processos, Associação Brasileira de Metalurgia e materiais. 9 a 10 de outubro, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

Fonseca, A. R. (2003) Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão. Dissertação apresentada como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de mestre em engenharia civil. Ouro Preto: UFOP.

Franciscatto, R., Cristo, F., Perlin, T. (2014) Redes de Computadores. Frederico Westphalen – RS: Colégio Arícola de Frederico Westphalen - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Gaioto, N. (2003) Introdução ao projeto de barragens de terra e enrocamento. São Carlos: Ed. USP São Carlos, Brasil.

GE (2013) 1830 Series – Druck High Performance level Pressure Sensors – Datasheet. Disponível em: < <http://www.instrumart.com/assets/1830-datasheet.pdf>>. Acesso em: 28 de junho de 2019.

GE (2013) Depht/Level Druck Submersible Pressure Sensors Product Guide. Disponível em: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0797/9339/files/PTX-1830-Depth-Summary_GE-Druck.pdf?10958918817518289242>. Acesso em: 28 de junho de 2019.

Geokon (2019) Piezometers – Standard Piezometers (VW). Disponível Em: < [Https://Www.Geokon.Com/4500-Series](https://www.geokon.com/4500-Series)>. Acesso Em: 27 de junho de 2019.

Geokon (2019) Handheld Readout (VW) – Model GK404. Disponível em: < <https://www.geokon.com/GK-404>>. Acesso em: 27 de junho de 2019.

Geonor (2019) Vibrating wire piezometers – Overview. Disponível em: <<http://geonor.com/live/products/geotechnical-instrumentation/piezometers/vibrating-wire-piezometers/>>. Acesso em: 29/05/2019.

Georio (2000) Manual Técnico de Encostas. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro. 2a Edição, Rio de Janeiro – RJ.

Gomes, R. D., Alencar, M. S., Fonseca, I. E. e Filho, A. C. L. (2014) Desafios De Redes De Sensores Sem Fio Industriais. Revista de tecnologia da informação e comunicação, Vol. 4, Número 1.

Gomes, D. L., (2017) Parte 4 – A importância da coleta de dados geotécnicos de barragens para atendimento a portaria N° 70.389/2017 do DNPM. Disponível em: <<https://geokrigagem.com.br/solucoes-tecnologicas-para-atendimento-portaria-no-70-3892017-do-dnpm-parte-4/>>. Acesso em: 30 de junho de 2019.

Gonçalves, R. N. (2012) Desenvolvimento de servidor OPC DA, OPC UA, e Wrappers para aplicação em automação. Dissertação submetida como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências em Engenharia Elétrica. Itajubá: UNIFEI.

Guarese, G. B. M. (2014) Implementação e avaliação de rede sem fio com topologia baseada em árvore. Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciência da computação. Rio grande do Sul: PUC-RS

Cerqueira, H., et al. (2016) Estudo de acurácia da automatização de piezômetros tipo Casagrande em barragens. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica. (COBRAMSEG): 19 a 22 de outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

In-Situ (2019) PTX-1830 Transducer Manual. Disponível em: < <https://in-situ.com/support/documents/ptx-1830-transducer-manual/>>. Acesso em 28 de junho de 2019.

Iotone (2019) Overview Loadsensing. Disponível em:
<<https://www.iotone.com/software/loadensing/s48>>. Acesso em: 18 de junho de 2019.

Irrigation (2019) 90° Triangular Notch Weirs. Disponível em:
<<http://irrigation.wsu.edu/Content/Calculators/Water-Measurements/90-Degree-Triangular-Notch-Weirs.php>>. Acesso em: 05 de junho 2019.

Jesus, T., Ramos, B. C., Guedes, G. P. (2012) Desenvolvimento De Um Sistema De Aquisição, Armazenamento E Publicação De Dados Baseado Em Sistemas Pims. XIX Congresso Brasileiro de Automática. Campina Grande, Pernambuco, Brasil. Setembro de 2012.

Junior, T. F. S., Moreira, E.B., e Heineck, K. S., (2018) Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração no Brasil. HOLOS, Ano 34, Volume 05.

Kane, W. F., Beck, T. J. (2000) Instrumentation Practice for Slope Monitoring. Engineering Geology Practice in Northern California. Association of Engineering Geologists Sacramento and San Francisco Sections.

Macedo, D. (2012) Conceito de DMZ. Disponível em:
<<https://www.diegomacedo.com.br/conceito-de-dmz/>>. Acesso em: 25 de junho de 2019.

Maturano, H. M. A. R., (2012) Análise do potencial de liquefação de uma barragem de rejeito. Dissertação apresentada como requisito parcial dos requisitos da Pontifícia Universidade Católica (PUC) do Rio de Janeiro para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Rio de Janeiro: PUC.

Machado, W. G. F., (2007) Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração. Dissertação apresentada em cumprimento parcial dos requisitos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP para obtenção do título de Mestre em Engenharia. São Paulo: USP.

Maxwell, M. S., (2005) Real-Time Model-Based Dam Automation: A Case Study Of The Piute Dam. Proceeding U.S. Committee on Irrigation and Drainage Conference on SCADA Technologies, Vancouver, WA, EUA.

Melo, P. (2017) Introdução ao OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture). Disponível em : <<https://www.embarcados.com.br/introducao-ao-opc-ua/>>. Acesso em: 25 de junho de 2019.

Muñoz, H. A. A. (2009) Avaliação da interferência de redes sem fio WI-FI e Bluetooth sobre uma rede BACnet/IEEE 802.15.4. Dissertação de mestrado em engenharia Elétrica para o Departamento de Engenharia Elétrica. Brasília: Universidade de Brasília

Niz, M. A. K. (2010) Análise de viabilidade da medição de níveis piezométricos por meio da técnica de borbulhamento. Dissertação submetida como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Metrologia. Florianópolis: UFSC

Nunes, M. (2016) Funcionamento da Calha Parshall. Disponível em: <http://portaldoprojetista.com.br/funcionamento-da-calha-parshall/>. Acesso em:05 de junho de 2019.

Oliveira, D. S., (2014) Avaliação Experimental em Modelo Reduzido da Turbina Hidráulica Indalma. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273879223_Avaliacao_Experimental_em_Modelo_Reduzido_da_Turbina_Hidraulica_Indalma. Acesso em: 29 de junho de 2019.

OPC Foundation (2019) The Industrial Interoperability Standard - About. Disponível em: <<https://opcfoundation.org/>>. Acesso em: 25 de junho de 2019.

OPC Foundation (2002) OPC Data Access Custom Interface Specification. Versão 2.05A.

Teixeira, E. B. e Costa, P. H. M. (2014) DMZ na integração TI x TA, para o PI System.

Disponível em:

<http://cdn.osisoft.com/corp/en/media/presentations/2014/RegionalSeminars/RS2014_SaoPaulo/PDF/RS2014_SaoPaulo_ValeFertilizantes_TeixeiraAndCosta_DMZnaIntegracaoTixTApaoPISystem.pdf>. Acesso em: 25 de junho de 2019.

Quispe, C. C., Fontes, M. M. M., Cardoso, J. C. M., (2018) Instrumentação em barragens: a automatização é realmente uma necessidade? XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG): 28 de agosto a 1 de setembro. Salvador, Bahia, Brasil.

RealPars (2018) Automation Pyramid. Disponível em: <<https://realpars.com/automation-pyramid/>>. Acesso em: 28 de junho de 2019.

Revista Mineração (2018) Seminário Internacional em MG debate gestão de barragens. Disponível em: <<http://revistamineracao.com.br/2018/01/23/seminario-internacional-em-mg-debate-gestao-de-barragens/>>. Acesso em: 15 de maio de 2019.

Rizzo, S., M., (2007) Monitoramento das escavações de uma área de rejeito de bauxita. Dissertação submetida como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Rio de Janeiro: UFRJ

RST Instruments (2019) RSTAR L900 Wireless Data Acquisition for Geotechnical Instruments. Disponível em: <<https://www.rstinstruments.com/product/data-collection/rstar-l900-wireless-data-acquisition-for-geotechnical-instruments>>. Acesso em: 28 de junho de 2019.

RST Instruments (2019) RST DT Logger Host Host Instruction Manual. Disponível em: <<https://www.rstinstruments.com/assets/manuals/dtlogger-pc.pdf>>. Acesso em: 28 de junho de 2019.

Samarco (2016) O que é uma barragem. Disponível em: <<https://www.samarco.com/wp-content/uploads/2016/08/o-que-e-uma-barragem.pdf>>. Acesso em: 15/05/2019

Santos, C. B., Silva, C. N., Villa, P. C. C. M., Rocha, B. S. S. (2012) A utilização de dataloggers no projeto RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas no aquífero Urucuia no oeste da Bahia. XVII Congresso Brasileiro de Água Subterrânea e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, Bonito, Mato Grosso, Brasil.

Sestrem, L. P. (2012) Concepção e implantação de um plano de instrumentação para avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea. Dissertação apresentada como requisito parcial da Universidade Federal do Paraná para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil. Curitiba: UFPR

Silveira, J. F. A. (2006) Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento. São Paulo: Oficina de Textos.

Soares, L. (2010) Barragem de Rejeitos. Colaboração técnica para o livro Tratamento de Minérios. Edição 5 - Capítulo 19 – pág. 831-896. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM).

Solitech (2019) Campbell Scientific CR1000. Disponível em: <https://www.solitech.bg/en/products/products-dataloggers/campbell-scientific-cr1000>. Acesso em: 20 de junho de 2019

Souza, A. J. (2005) Sistema de Gerência de Informação de Processos Industriais via Web. Dissertação submetida como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências. Natal: UFRN

Stuhler, J. A., Alexandrini, F., Alexandrini, C. F. D., Faveri, J. E. e Araújo, T. S. (2012) Utilização da Tecnologia ZigBee para Sensoriamento de Nível de Rio para Monitoramento de Cheias. IX Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia.

The Wall Street Journal – WSJ (2016) Barragens de rejeitos colossais elevam risco de acidentes como o de Mariana. Disponível em: <<https://www.wsj.com/articles/barragens-de-rejeitos-colossais-elevam-risco-de-acidentes-como-o-de-mariana-1459802807>>. Acesso em: 29 de junho de 2018.

Urbano, L. R. H. (2009). Gerenciamento de ativos de automação: Uma solução baseada em pims. 4º Seminário Nacional de Sistemas Industriais e Automação.

Veloso, L. A. C. M., et al. (2007) Projeto de pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) para Automação da Instrumentação das Obras Civas da UHE Tucuruí. In XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belém-PA, 03 a 07 de junho de 2007. Belém: Comitê Brasileiro de Barragens.

Venturelli, M. (2016) Redes Ethernet Industrial: Conceito e aplicação na Automação e Controle Industrial. Disponível em: <https://www.automacaoindustrial.info/redes-ethernet-industrial-conceito-e-aplicacao-na-automacao-e-controle-industrial/>. Acesso em: 22 de junho de 2019.

Vieira, M. F., et al. (2017) Influência do lago da UHE Tucuruí sobre a barragem de concreto: um estudo sobre os MTJ's. Revista CIATEC-UPF.2017, Vol.9 Issue 1, p1-14. 14p.

ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS QUANTO AO POTENCIAL DE RISCO E AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO

Quadro 1 - Classificação para barragens de mineração

NOME DA BARRAGEM:		
DATA DA CLASSIFICAÇÃO E ENQUADRAMENTO:		
1	CATEGORIA DE RISCO (CRI)	PONTOS
1.1	Características Técnicas (CT)	
1.2	Estado de Conservação (EC)	
1.3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		
CLASSIFICAÇÃO DE RISCO		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTO	≥ 65 ou $EC^* = 10$ (*)
	MÉDIO	$37 < CRI < 65$
	BAIXO	≤ 37
(*) Pontuação (10) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade providências imediatas pelo responsável da barragem.		
NOME EMPREENDEDOR:		
CLASSIFICAÇÃO PARA BARRAGENS DE MINERAÇÃO		
2	DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)	PONTOS
2.1	Volume total do reservatório	
2.2	Existência de População a Jusante	
2.3	Impacto Ambiental	
2.4	Impacto Sócio-Econômico	
PONTUAÇÃO TOTAL (DPA)		
CLASSIFICAÇÃO DE DANO		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	≥ 13
	MÉDIO	$7 < DPA < 13$
	BAIXO	≤ 7
MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO		

QUADRO 2 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS)				
1.1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS (CT)				
Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de Projeto (c)	Método Construtivo (d)	Auscultação (e)
Altura \leq 15m (0)	Comprimento \leq 50m (0)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (0)	Etapa única (0)	Existe instrumentação de acordo com o projeto técnico (0)
15m < Altura < 30m (1)	50m < Comprimento < 200m (1)	Milénar (2)	Alteamento a jusante (2)	Existe instrumentação em desacordo com o projeto, porém em processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto (2)
30m \leq Altura \leq 60m (4)	200 \leq Comprimento \leq 600m (2)	TR = 500 anos (5)	Alteamento por linha de centro (5)	Existe instrumentação em desacordo com o projeto sem processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto (6)
Altura > 60m (7)	Comprimento > 600m (3)	TR Inferior a 500 anos ou Desconhecida/ Estudo não confiável (10)	Alteamento a montante ou desconhecido ou que já tenha sido alteada a montante ao longo do ciclo de vida da estrutura (10)	Barragem não instrumentada em desacordo com o projeto (8)
CT = \sum (a até e)				

QUADRO 3 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS) 1.2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC			
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (f)	Percolação (g)	Deformações e Recalques (h)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (i)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferrugem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias . (6)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)
EC = \sum (f até i)			

QUADRO 4 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS) 1.3 - PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM - OS				
Documentação de Projeto (j)	Estrutura Organizacional e Qualificação dos Profissionais na Equipe de Segurança da Barragem (k)	Manuais de Procedimentos para Inspeções de Segurança e Monitoramento (l)	Plano de Ação Emergencial PAE (quando exigido pelo órgão fiscalizador) (m)	Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de Análise de Segurança (n)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (0)	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação (0)	Possui PAE (0)	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de Análise de Segurança (0)
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui profissional técnico qualificado (próprio ou contratado) responsável pela segurança da barragem (1)	Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento (2)	Não possui PAE (não é exigido pelo órgão fiscalizador) (2)	Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança (2)
Projeto "como está" (3)	Possui unidade administrativa sem profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (3)	Possui apenas manual de procedimentos de inspeção (4)	PAE em elaboração (4)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento (4)
Projeto básico (5)	Não possui unidade administrativa e responsável técnico qualificado pela segurança da barragem (6)	Não possui manuais ou procedimentos formais para monitoramento e inspeções (8)	Não possui PAE (quando for exigido pelo órgão fiscalizador) (8)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual (6)
Projeto conceitual (8)	-	-	-	Não emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento e de Análise de Segurança (8)
Não há documentação de projeto (10)	-	-	-	-
PS = $\sum (j \text{ até } n)$				

QUADRO 5 - CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO - DPA (RESÍDUOS E REJEITOS)			
Volume Total do Reservatório (a)	Existência de população a jusante (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto sócio-econômico (d)
Muito Pequeno <= 500 mil m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	INSIGNIFICANTE (área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais e a estrutura armazena apenas resíduos Classe II B – Inertes , segundo a NBR 10.004 da ABNT) (0)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem) (0)
Pequeno 500 mil a 5 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	POUCO SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B – Inertes , segundo a NBR 10.004 da ABNT) (2)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)
Médio 5 milhões a 25 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5)	SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B – Inertes , segundo a NBR 10.004 da ABNT) (6)	MÉDIO (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (3)
Grande 25 milhões a 50 milhões m ³ (4)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10)	MUITO SIGNIFICATIVO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes, segundo a NBR 10004 da ABNT) (8)	ALTO (existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (5)
Muito Grande >= 50 milhões m ³ (5)	-	MUITO SIGNIFICATIVO AGRAVADO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I- Perigosos segundo a NBR 10004 da ABNT) (10)	-
DPA= ∑ (a até d)			

Certifico que o aluno MÁRCIO FLÁVIO SOUSA SILVA, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "SISTEMA DE MONITORAMENTO ONLINE DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



Prof. M.Sc. Adrielle de Carvalho Santana – Orientadora

Ouro Preto – MG
10 de Julho de 2019