

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**DESENVOLVIMENTO DO GÊMEO DIGITAL DE
BARRAGENS**

ALAN RIBEIRO SANTOS

ORIENTADOR: FÉLIX ALVES DA SILVA JÚNIOR

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM REPRESENTAÇÃO
GRÁFICA**

BRASÍLIA / DF: NOVEMBRO/2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**DESENVOLVIMENTO DO GÊMEO DIGITAL DE
BARRAGENS**

ALAN RIBEIRO SANTOS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Félix Alves da Silva Júnior, UnB

Orientador

Prof. Dr. Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa, UnB

Examinador Interno

DATA:05 DE NOVEMBRO DE 2021, BRASÍLIA/DF

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, ALAN RIBEIRO

Desenvolvimento do gêmeo digital de barragens [Distrito Federal] 2021.

xiii, 65 p., 297 mm (ENC/FT/UNB, Bacharel, Engenharia Civil, 2021).

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Gêmeo Digital

2. Barragens

3. Monitoramento de barragens

4. Instrumentação automatizada

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, A.R. (2021). Desenvolvimento do gêmeo digital de barragens. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 65 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Alan Ribeiro Santos

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Desenvolvimento do gêmeo digital de barragens

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2021

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Alan Ribeiro Santos

Quadra 605, Conjunto 24A, Casa 12, Recanto das Emas

72641-135 – Brasília/DF – Brasil

E-mail: alanrsmbs@gmail.com

Aos meus pais e irmã, fontes irrestritas de apoio e amor, base de todas as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo amor incondicional, suporte e sabedoria, e pelas renúncias, diversas, que me permitiram chegar até aqui.

A minha irmã, que desde que chegou faz minha existência mais feliz, sempre ao meu lado e sempre amável, mesmo quando tenta não ser.

Aos meus amigos, pelas risadas, lágrimas, ombro e consideração, seja qual for a nossa distância no tempo ou no espaço, os levo sempre com carinho em meus pensamentos e coração.

Aos meus professores, todos eles, pela dedicação incansável que ativamente formou quem eu sou.

Ao meu orientador, Félix Alves da Silva Júnior, pelo tempo e esforço despendido, pela paciência, pelos caminhos guiados e pela gentileza sempre presente.

A todas as pessoas que passaram pela minha vida, mesmo que rapidamente, por cada conexão construída que faz parte de mim. No fim, precisamos do próximo, é um dos significados da existência.

RESUMO

Barragens são estruturas complexas e repletas de especificidades, os seus benefícios para a humanidade são diversos, assim como os riscos associados a falhas em sua gestão. Nos últimos anos, ocorreram diversos desastres envolvendo barramentos, fazendo crescer a demanda por alternativas que incrementem a segurança desse tipo de empreendimento. Nesse cenário, destaca-se o gêmeo digital (GD), conjunto de tecnologias e processos capazes de vincular em tempo real um objeto do mundo físico com sua contraparte digital. Esse vínculo oferece vantagens em monitoramentos, análises, previsões, entre outros. Esta monografia pretende identificar os processos e etapas necessárias para a elaboração do GD de uma barragem, além de debater seus usos e benefícios. Na primeira parte deste trabalho, a partir de uma revisão abrangente de pesquisas referentes ao tema, as fases de aquisição e integração de dados foram analisadas, o que possibilitou a proposição de um fluxograma de processos para coleta e integração dos dados do GD de um barramento. Em seguida, por meio das plataformas de criação e gerenciamento de gêmeos digitais e/ou de soluções IoT, *Azure* e *iTwin*, foram desenvolvidos gêmeos digitais da barragem da usina hidrelétrica de Serra da Mesa, localizada no Noroeste do estado de Goiás. Os resultados obtidos apontam para aplicações variadas e ganhos factíveis proporcionados pelo uso do GD de uma barragem, com as características de instrumentação do empreendimento exercendo papel decisivo na sua elaboração. Ademais, destaca-se a importância de estudos específicos para cada tipo de barragem durante a implementação da tecnologia, que embora se encontre em um estado de desenvolvimento em que as ferramentas para a sua elaboração e gerenciamento possam não ser amigáveis a quaisquer usuários, se apresenta altamente promissora, estimulando a continuidade da realização de trabalhos na mesma linha de pesquisa.

Palavras-chave: Gêmeo Digital, Barragens, Monitoramento, Instrumentação.

ABSTRACT

Dams are complex structures and full of specificities, their benefits for humanity are diverse, as are the risks associated with failures in its management. Recently, several disasters involving dams have occurred, increasing demand for alternatives which increment dam safety. In this scenario, the digital twin (DT) stands out, set of technologies and processes capable to link in real time a physical object with its digital counterpart. This connection offers advantages in monitoring activities, analysis, predictions etc. This work intends to identify the necessary processes and stages to develop a dam digital twin, besides debating its uses and benefits. In the first part of this monography, from a comprehensive review of studies related to this subject, data acquisition and integration phases were analyzed, what made possible the proposition of a processes flowchart to collect and integrate data to a dam DT. After that, through platforms of creation and management of digital twins and/or IoT solutions, Azure and iTwin, digital twins of Serra da Mesa hydroelectric plant's dam, located in the state of Goiás, center-west of Brazil, were developed. The achieved results point to varied applications and feasible gains provided by the use of a DT, with features of dam instrumentation playing a key role in its elaboration. Moreover, it's highlighted the importance of specific studies to each type of dam during the implementation of this technology, which although lies in a developing stage where tools to build and manage it aren't always user friendly, proves itself highly promising, what encourages the realization of studies in the same research line.

Keywords: digital twin, dams, monitoring, instrumentation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 OBJETIVO GERAL	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2. BARRAGENS	4
2.1 TIPOS DE BARRAGENS	7
2.1.1 BARRAGENS DE TERRA	8
2.1.2 BARRAGENS DE ENROCAMENTO	9
2.1.3 BARRAGENS DE CONCRETO	10
2.1.4 BARRAGENS MISTAS	13
2.2 CICLO DE VIDA DE UMA BARRAGEM	13
2.3 MONITORAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO	14
2.4 INSTRUMENTAÇÃO AUTOMATIZADA	16
3. GÊMEO DIGITAL	18
3.1 IOT (INTERNET OF THINGS)	20
3.1.1 DISPOSITIVOS	21
3.1.2 CONECTIVIDADE	21
3.1.3 NUVEM	21
3.1.4 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO	22
3.1.5 DESAFIOS TECNOLÓGICOS	23
3.2 BIG DATA, COMPUTAÇÃO EM NUVEM E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	24
3.3 REALIDADE VIRTUAL E AUMENTADA	25
3.4 BIM (BUILDING INFORMATION MODELING)	27
3.5 PLATAFORMAS PARA GÊMEOS DIGITAIS	27
3.5.1 ITWIN	27

3.5.2	AZURE	29
3.6	DIGITAL TWINS DEFINITION LANGUAGE (DTDLD)	32
3.7	LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO	32
3.7.1	JSON E JSON-LD	33
3.7.2	JAVASCRIPT E TYPESCRIPT	33
3.7.3	C#	34
4.	A UHE DE SERRA DA MESA	35
5.	METODOLOGIA	38
5.1	FLUXOGRAMA PARA AQUISIÇÃO E INTEGRAÇÃO DOS DADOS DO GD DE UMA BARRAGEM	38
5.2	GÊMEOS DIGITAIS DA UHE DE SERRA DA MESA	38
5.2.1	ITWIN	38
5.2.2	AZURE	40
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
6.1	FLUXOGRAMA PARA AQUISIÇÃO E INTEGRAÇÃO DOS DADOS DO GD DE UMA BARRAGEM	42
6.2	GÊMEOS DIGITAIS DA UHE DE SERRA DA MESA	47
6.2.1	ITWIN	47
6.2.2	AZURE	50
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	56
	REFERÊNCIAS	58
	APÊNDICE A1	66
	APÊNDICE A2	71
	APÊNDICE A3	72

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 - Balanço de regularização (Fonte: ASSIS et al., 2003)</i>	4
<i>Figura 2.2 - Amortecimento da onda de cheia (Fonte: ASSIS et al., 2003)</i>	5
<i>Figura 2.3 - Arranjo típico em vale encaixado (UHE Yoshida) (Fonte: ASSIS et al., 2003)</i>	6
<i>Figura 2.4 - Arranjo típico em vale aberto (UHE Tucuruí) (Fonte: ASSIS et al., 2003)</i>	6
<i>Figura 2.5 - Arranjo típico em vale semi-encaixado (UHE Foz do Areia) (Fonte: ASSIS et al., 2003)</i>	7
<i>Figura 2.6 - Exemplo de seção transversal de barragem homogênea (Fonte: ANA, 2016a)</i>	8
<i>Figura 2.7 - Exemplo de seção transversal de barragem zonada (Fonte: ANA, 2016a)</i>	8
<i>Figura 2.8 - Barragem de seção mista: (a) núcleo de argila centralizado, (b) núcleo de argila inclinado (Fonte: MASSAD, 2010)</i>	9
<i>Figura 2.9 - Barragem de enrocamento com face de concreto (Fonte: MASSAD, 2010)</i>	10
<i>Figura 2.10 – Esquema de transmissão de esforços em barragens de concreto gravidade com traçado retilíneo (a) e em arco (b) (Fonte: VIEIRA, 2009)</i>	10
<i>Figura 2.11 - Barragens de concreto em contraforte (Fonte: MASSAD, 2010)</i>	11
<i>Figura 2.12 - Esquema de transmissão de esforços em barragens de concreto de dupla curvatura (Fonte: VIEIRA, 2009)</i>	12
<i>Figura 2.13 - Principais tipos de barragens de concreto (Fonte: COSTA, 2012)</i>	12
<i>Figura 3.1 - Aplicações de um GD (Fonte: adaptada de QINGLIN QI et al., 2019)</i>	18
<i>Figura 3.2 - Possíveis áreas de aplicação do GD (Fonte: adaptada de QINGLIN QI et al., 2019)</i>	19
<i>Figura 3.3 - Conexão entre os serviços da iTwin.js e o iModelHub (Adaptada de ITWIN.JS, 2021c)</i>	28
<i>Figura 4.1 - Localização da UHE de Serra da Mesa (Fonte: PEREIRA, 2005)</i>	35
<i>Figura 4.2 - Arranjo geral da UHE de Serra da Mesa (Fonte: PEREIRA, 2005)</i>	36
<i>Figura 4.3 - Seção típica da barragem de Serra da Mesa (Fonte: PEREIRA, 2005)</i>	36
<i>Figura 4.4 - Instrumentação do maciço da barragem de Serra da Mesa (Fonte: SANTOS, 2019)</i>	37
<i>Figura 5.1 - Criação do iModel</i>	39
<i>Figura 5.2 - Sincronização do modelo 3D da barragem para o iModel</i>	40
<i>Figura 6.1 - Fluxograma para aquisição e integração dos dados do gêmeo digital de uma barragem</i>	43

<i>Figura 6.2 - Visão geral da arquitetura de um sistema de monitoramento automatizado sem fio (Fonte: Adaptada de ABANCÓ et al., 2016)</i>	45
<i>Figura 6.3 - Visualização do iModel - iTwin (1)</i>	48
<i>Figura 6.4 - Visualização do iModel - iTwin (2)</i>	48
<i>Figura 6.5 - Visualização do iModel - iTwin (3)</i>	48
<i>Figura 6.6 - Visualização do iModel - iTwin (4)</i>	49
<i>Figura 6.7 - Visualização do iModel - iTwin (5)</i>	49
<i>Figura 6.8 - Gráfico do gêmeo digital na Azure Digital Twins Explorer</i>	50
<i>Figura 6.9 - Visualização da telemetria por meio do TSI Explorer (1)</i>	51
<i>Figura 6.10 - Visualização da telemetria por meio do TSI Explorer (2)</i>	51
<i>Figura 6.11 - Visualização da telemetria por meio do TSI Explorer (3)</i>	52
<i>Figura 6.12 - Visualização da telemetria por meio do TSI Explorer (4)</i>	52
<i>Figura 6.13 - Visualização da telemetria por meio do TSI Explorer (5)</i>	53
<i>Figura 6.14 - Visualização da telemetria real do reservatório de Serra da Mesa por meio do TSI Explorer</i>	53
<i>Figura 6.15 - Gráfico de área do nível do reservatório por tempo (datas fictícias) (Power BI)</i>	54
<i>Figura 6.16 - Gráfico de área do nível do reservatório por tempo com resumo do comportamento dos dados em destaque (datas fictícias) (Power BI)</i>	54
<i>Figura 6.17 - Gráfico de linhas do nível do reservatório da Serra da mesa por tempo com linhas de média, mínima, máxima, de tendência e previsão</i>	55

LISTA DE ABREVIACÕES

AMQP – *Advanced Message Queuing Protocol*
ANA – *Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico*
API – *Application Programming Interface*
BIM – *Building Information Modeling*
BIS – *Base Infrastructure Schemas*
CCR – *Concreto Compactado a Rolo*
CDN - *Content Delivery Network*
CoAP - *Constrained application protocol*
CPPS - *Cyber-Physical Production Systems*
DPA – *Dano Potencial Associado*
DT – *Digital Twin*
DTDL – *Digital Twins Definition Language*
EC – *Entity Classification*
FAO – *Food and Agriculture Organization*
GD – *Gêmeo Digital*
HaaS – *Hardware as a Service*
HTTPS - *Hypertext Transfer Protocol Secure*
IA – *Inteligência Artificial*
IaaS – *Infrastructure as a Service*
ICOLD – *International Commission on Large Dams*
IoT – *Internet of Things*
ITU - *International Telecommunication Union*
JSON – *JavaScript Object Notation*
JSON-LD – *JavaScript Object Notation Linked Data*
MIT - *Massachusetts Institute of Technology*
MQTT - *Message Queuing Telemetry Transport*
NFC – *Near Field Communication*
ONS – *Operador Nacional do Sistema Elétrico*
PaaS – *Platform as a Service*
RA – *Realidade Aumentada*
RFID - *Radio Frequency Identification*
RM – *Realidade Mista*

RV – Realidade Virtual

SaaS - Software as a Service

SAD – Sistemas de Arquivos Distribuídos

SAS - Shared Access Signature

SQL - Structured Query Language

TSI – Time Series Insights

UHE – Usina Hidrelétrica

1. INTRODUÇÃO

Com diferentes fins e diversas particularidades, a utilização de barragens para conter ou acumular substâncias líquidas, predominantemente, data de muito tempo atrás. O emprego contínuo dessas estruturas ao longo da história tem representado papel central no desenvolvimento de inúmeros setores da sociedade, possibilitando, por exemplo, a geração de energia elétrica, a regularização de vazões e a contenção de rejeitos de mineração (ANA, 2020).

A utilização das barragens, todavia, é seguida por impactos sociais e ambientais, além de um significativo Dano Potencial Associado (DPA)¹, tornando-as empreendimentos com alta demanda de rigor técnico em todas as fases do seu ciclo de vida, desde a sua concepção até o seu descomissionamento.

Nos últimos anos, no entanto, ocorreu no Brasil uma série de desastres, como os rompimentos das barragens em Brumadinho (MG) e Mariana (MG), que ressaltaram a necessidade de uma gestão mais precisa de estruturas de barramentos, sobretudo em barragens de rejeitos, além de uma revisão de técnicas e normativas. Os acidentes recentes indicam o alto grau de complexidade envolvido na construção e operação dos mesmos. Essas condições denotam a gravidade ante a indisponibilidade de informações vitais e/ou monitoramento inadequado em barragens, como acontece em diversos casos de acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2020), principalmente em obras de pequeno porte. O resultado dessas situações, muitas das vezes, pode ser catastrófico. Duarte (2008), Abancó et al. (2016) e Lyu et al. (2019) destacam o quanto essas faltas podem levar e têm levado a desastres ao redor do mundo, como aconteceu em casos recentes no Brasil, que além de gerar danos sociais e ambientais irreversíveis, culminou na perda de diversas vidas.

Consequentemente, a demanda por novas soluções relacionadas à segurança de barragens tem crescido em todo o mundo, novas técnicas, normas, tecnologias etc. que possam aumentar a eficiência do empreendimento, diminuindo os riscos envolvidos, têm sido altamente requisitadas (GUTIÉRREZ, 2003; BUKENYA et al., 2014). Nesse cenário, o gêmeo digital (*digital twin*) apresenta-se como uma ferramenta capaz de propiciar uma visão mais completa e aprofundada de um barramento, por meio da replicação em tempo real de suas características e comportamentos, otimizando tarefas de monitoramento, análise e previsão que incrementam a eficiência do empreendimento e das intervenções necessárias.

¹ Dano (humano, social e/ou econômico) que pode ocorrer devido ao mal funcionamento crítico de alguma das partes de uma barragem (ANA, 2016b).

É com base nessa conjuntura que nasce a motivação para realização deste trabalho, por meio do qual se busca discutir sobre as possíveis vantagens proporcionadas pela elaboração e utilização do GD de uma barragem, assim como apresentar processos e ferramentas para o seu desenvolvimento. O trabalho foi dividido em duas partes, inicialmente foi construído um fluxograma com os processos necessários para a aquisição e integração dos dados de monitoramento de um barramento na sua contraparte digital. Em seguida, foram desenvolvidos gêmeos digitais da barragem da UHE de Serra Mesa, utilizando-se as plataformas de *Azure* e *iTwin*, ferramentas capazes de criar e gerenciar gêmeos digitais e/ou soluções IoT.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Apresentar discussão acerca do desenvolvimento do gêmeo digital de barragens, por meio da proposição e discussão de processos de implementação dessa tecnologia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Propor um fluxograma de processos necessários para aquisição e integração de dados do GD de uma barragem com diferentes características de instrumentação;
- Desenvolver gêmeos digitais do barramento da UHE de Serra da Mesa por meio das plataformas *iTwin* e *Azure*, utilizando para isso dados simulados e reais disponibilizados publicamente pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 6 partes.

- Capítulo 1 – Introdução

Apresenta para o leitor o contexto de realização da pesquisa, discutindo os temas que serão abordados ao longo do trabalho e apresentando os seus objetivos gerais e específicos.

- Capítulo 2 – Barragens

Expõe informações gerais sobre as barragens e suas características. Além de discorrer sobre o processo de monitoramento e instrumentação, tal como as etapas necessárias para automatização de sua auscultação.

- Capítulo 3 – Gêmeo digital

Apresenta o conceito de gêmeo digital, explicitando seus aspectos e funções. Ademais, identifica e discute as principais tecnologias associadas a produção de um GD.

- Capítulo 4 – UHE de Serra da Mesa

Apresenta as principais características da usina hidrelétrica de Serra da Mesa, explicitando as suas propriedades e informações mais relevantes.

- Capítulo 5 – Metodologia

Descreve as etapas metodológicas utilizadas para o desenvolvimento dos gêmeos digitais do barramento da UHE de Serra da Mesa, além de apresentar os passos principais para o desenvolvimento do fluxograma de aquisição e integração de dados.

- Capítulo 6 – Resultados e discussão

Apresenta os resultados obtidos provenientes da etapa de elaboração do fluxograma de processos para a aquisição e integração dos dados do GD de uma barragem e do desenvolvimento dos gêmeos digitais a partir das plataformas *Azure* e *iTwin*.

- Capítulo 7 – Conclusões e recomendações

Apresenta as conclusões do trabalho, conjuntamente a uma rápida discussão sobre limitações do presente trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2. BARRAGENS

Barragens são estruturas multifacetadas, compostas por um conjunto de partes que atuam com o objetivo de conter ou acumular água, outros resíduos líquidos e/ou sólidos. A utilização desse tipo de estrutura pela humanidade é antiga, Thomas (1976) destaca o registro de uma barragem do Egito de 12 metros de altura, rompida por transbordamento, construída 6.800 anos atrás.

O longo histórico de utilização de barragens na sociedade é compatível com as suas diversas utilidades. Segundo Costa (2012), os seus objetivos podem ser separados em dois grandes grupos: regularização e retenção.

As barragens de regularização têm como objetivo tornar regular o ciclo hidrológico de um rio, de forma a armazenar água quando a sua afluência é maior do que a demanda e permitir a utilização dessa quando o contrário acontece. A Figura 2.1 ilustra o balanço de regularização possibilitado por esse tipo de barramento, que propicia a compatibilização das vazões naturais de um rio de acordo com as demandas existentes.

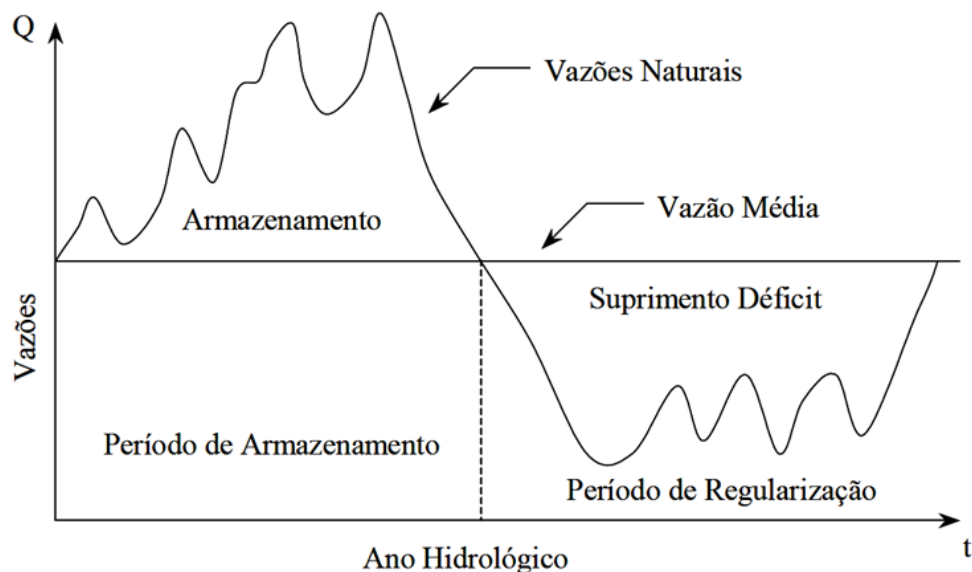


Figura 2.1 - Balanço de regularização (Fonte: ASSIS et al., 2003)

Essas barragens podem apresentar diversas finalidades, estando entre essas o aproveitamento hidrelétrico, o abastecimento doméstico, industrial e para irrigação, a habilitação do rio tanto a montante quanto a jusante do barramento para atividades de navegação, entre outras (ASSIS et al., 2003; COSTA, 2012).

As barragens de retenção, por sua vez, têm como finalidade conter água, amortecendo cheias e evitando inundações a jusante, permitindo o armazenamento temporário da onda de cheia e a descarga futura da mesma de forma a não ocasionar danos. Estas podem ter como

fim a acumulação de sedimentos, rejeitos de mineração ou resíduos industriais, impedindo que os mesmos danifiquem fisicamente ou quimicamente o leito do rio a jusante (ASSIS et al., 2003; COSTA, 2012). A Figura 2.2 esquematiza o funcionamento do amortecimento da onda de cheia.

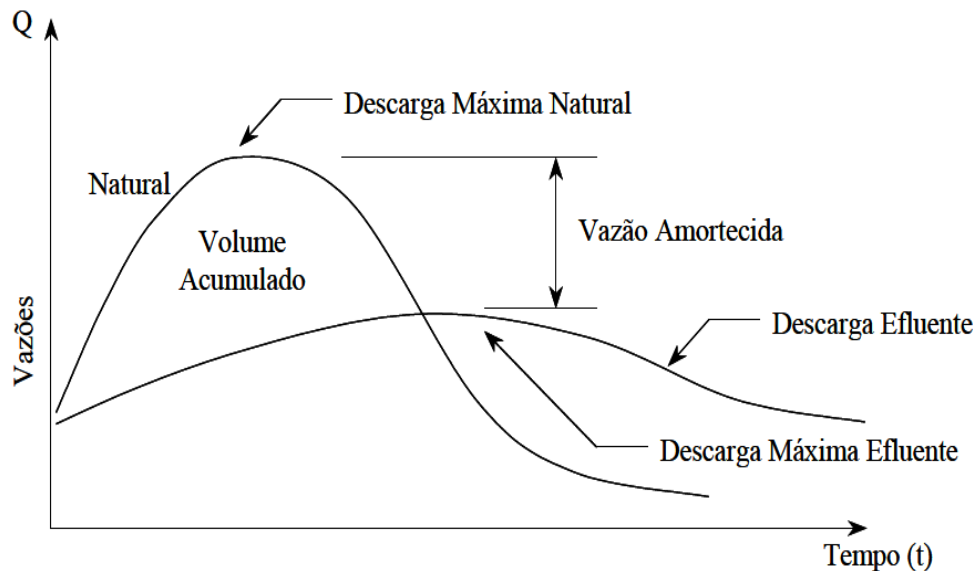


Figura 2.2 - Amortecimento da onda de cheia (Fonte: ASSIS et al., 2003)

Ao se tratar de uma barragem, todos os seus elementos constituintes devem ser considerados como um elemento único, Mello (1975) destaca que as partes que compõem essa unidade são:

- o corpo da barragem;
- a bacia da represa;
- a fundação;
- as estruturas anexas ou auxiliares (vertedouros, tomadas d'águas, casas de força, descargas de fundo etc.);
- os instrumentos de auscultação²; e
- as instalações de comunicação e manutenção.

As barragens podem estar localizadas em diferentes tipos de arranjos, sendo esses condicionados por várias características, tais como condições topográficas, logísticas, técnicas etc. Um dos aspectos principais determinantes do tipo de arranjo de um aproveitamento

² Consiste no monitoramento do comportamento da barragem, permitindo o controle de suas condições de segurança e análise das hipóteses de projeto, de forma a orientar manutenções, previsões, tomadas de decisão em geral etc. (ITAIPIU, 2021).

hidrelétrico é o tipo de vale, que pode ser encaixado, aberto ou semi-encaixado (ASSIS et al., 2003).

A Figura 2.3 ilustra uma barragem para aproveitamento hidrelétrico com um arranjo em vale encaixado (UHE Yoshida).

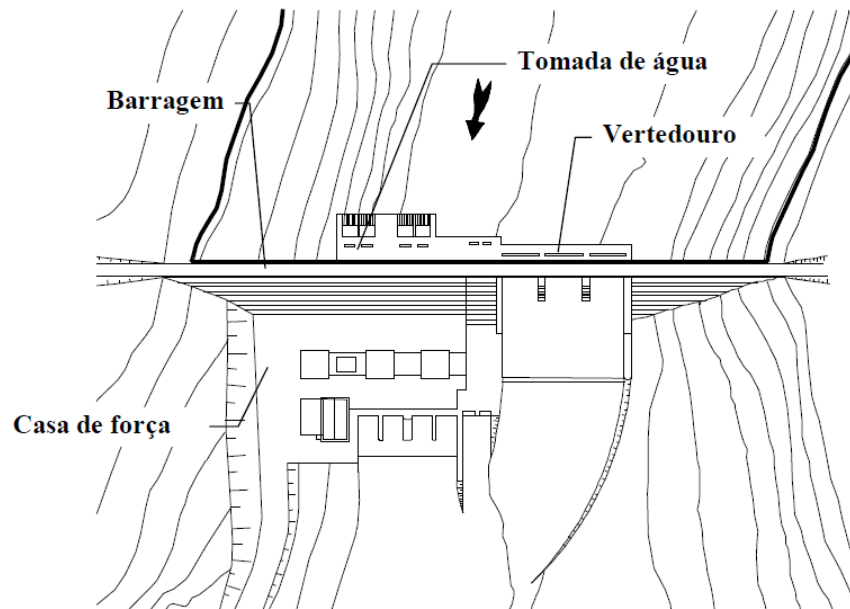


Figura 2.3 - Arranjo típico em vale encaixado (UHE Yoshida) (Fonte: ASSIS et al., 2003)

A Figura 2.4, por sua vez, apresenta o barramento da usina hidrelétrica de Tucuruí com arranjo em vale aberto.

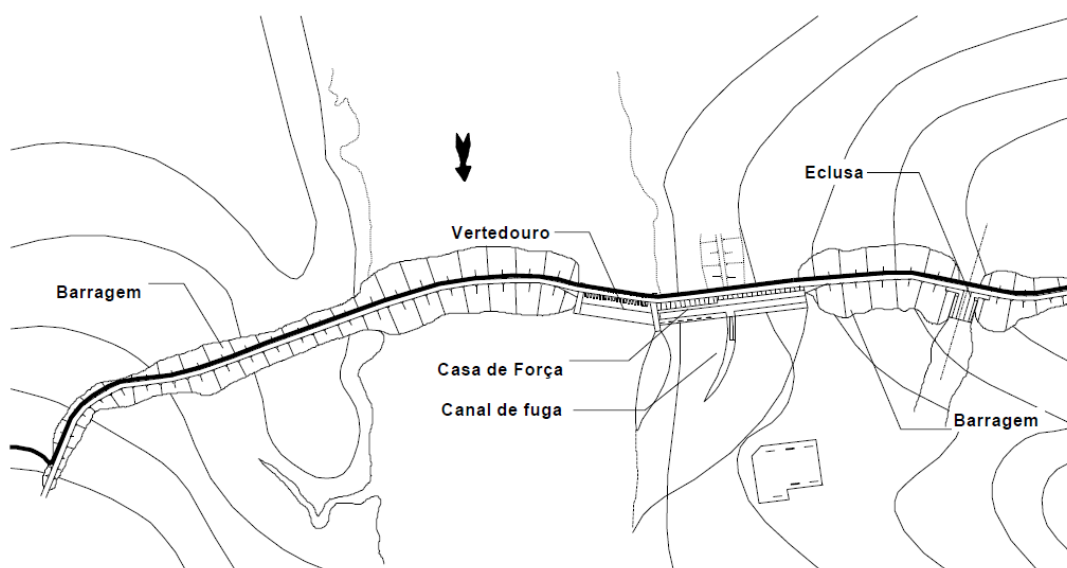


Figura 2.4 - Arranjo típico em vale aberto (UHE Tucuruí) (Fonte: ASSIS et al., 2003)

Por fim, a Figura 2.5 mostra a barragem da UHE Foz do Areia, um arranjo típico em vale semi-encaixado.

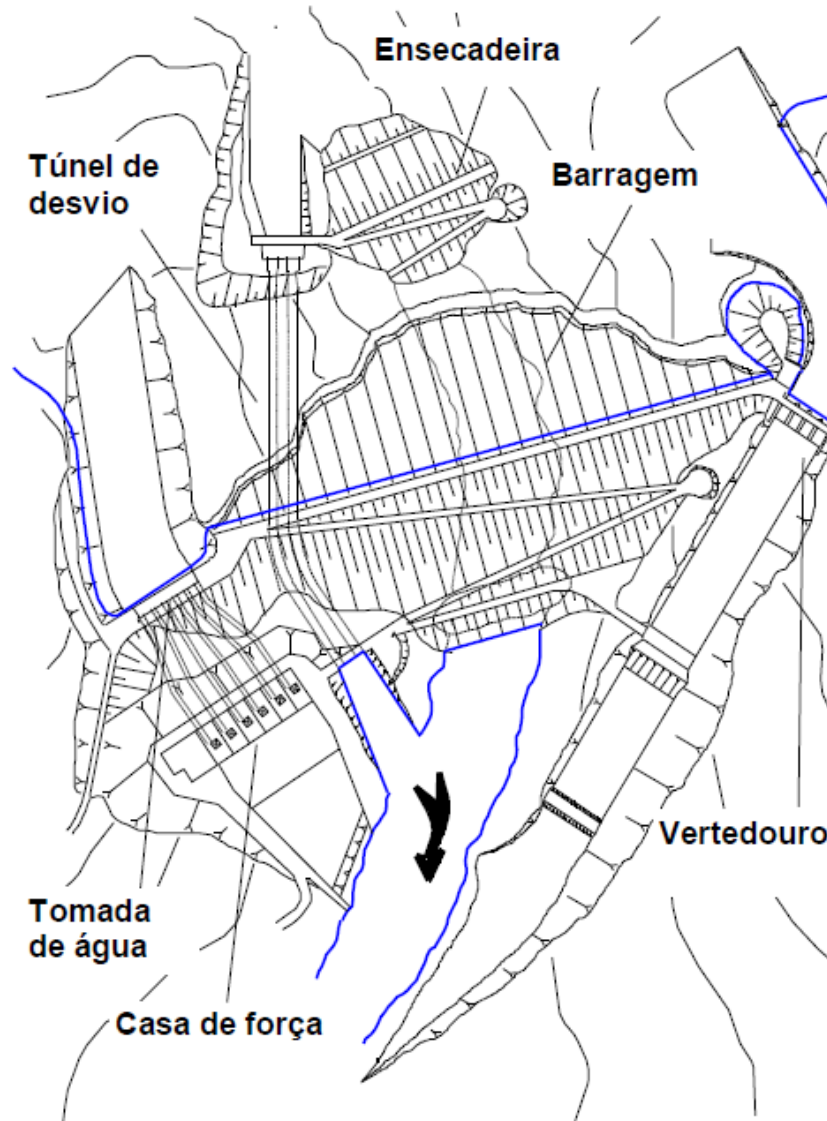


Figura 2.5 - Arranjo típico em vale semi-encaixado (UHE Foz do Areia) (Fonte: ASSIS et al., 2003)

2.1 TIPOS DE BARRAGENS

As barragens possuem diversos tipos, definidos em função de diversos aspectos, como, por exemplo, as características da fundação, do tipo de vale, da disponibilidade de material, das condições climáticas, da finalidade do barramento, entre outros. Costa (2012) as dividem em dois grandes grupos: não convencionais e convencionais. O primeiro tipo está relacionado a barramentos pouco utilizados, que consistem em alternativas para situações específicas, geralmente para cenários em que intervenções de pequeno porte são possíveis, são exemplos dessas as barragens de gabião, de madeira e a de alvenaria de pedra (COSTA, 2012). O segundo tipo, por sua vez, refere-se às barragens tradicionais, amplamente utilizadas e

estudadas pela humanidade, que podem ser de terra, de enrocamento, de concreto ou mistas, com características descritas a seguir.

2.1.1 Barragens de terra

Como o nome sugere, as barragens de terra são constituídas majoritariamente por solos, e são divididas em dois tipos:

- Barragens homogêneas: constituídas predominantemente por um único tipo de material terroso, já que outros tipos de materiais são necessários para comporem a drenagem interna do maciço, a proteção externa do talude (*rip-rap*), dentre outros (ASSIS et al., 2003; FAO, 2011; COSTA, 2012). A Figura 2.6 demonstra um exemplo de seção transversal de uma barragem homogênea.

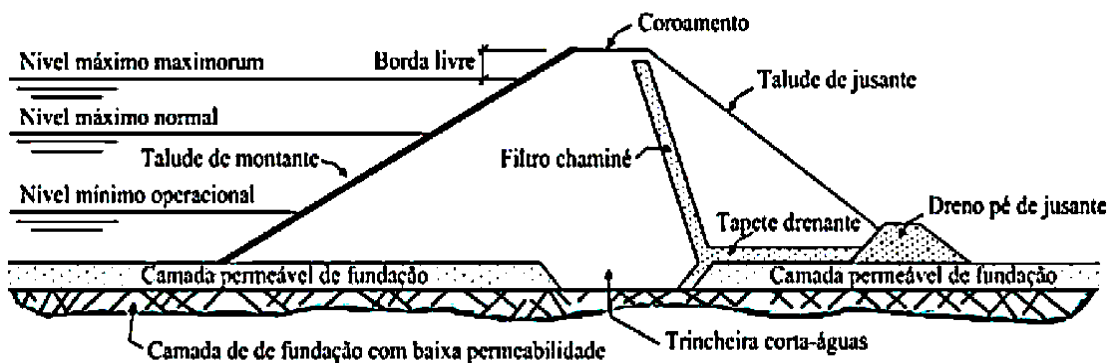


Figura 2.6 - Exemplo de seção transversal de barragem homogênea (Fonte: ANA, 2016a)

- Barragens zonadas: formadas por materiais terrosos com diferentes condições de permeabilidade e características geotécnicas, dispostos em diferentes zonas do maciço, geralmente um único solo de empréstimo compactado em condições de umidade distintas. (MASSAD, 2010; COSTA, 2012). A Figura 2.7 ilustra um exemplo de seção transversal de uma barragem zonada.

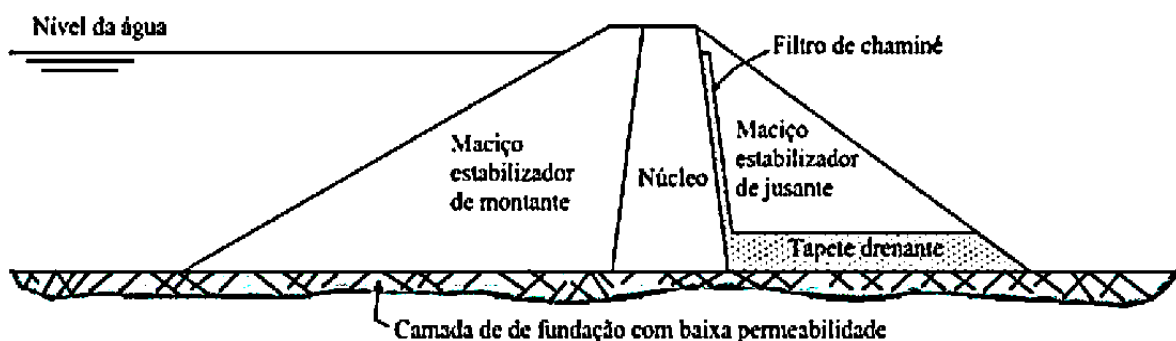


Figura 2.7 - Exemplo de seção transversal de barragem zonada (Fonte: ANA, 2016a)

2.1.2 Barragens de enrocamento

As barragens de enrocamento se caracterizam por possuírem predominância de material rochoso em sua seção, podendo ser de dois tipos:

- Barragens de enrocamento com núcleo impermeável: nesse tipo de barragem, os espaldares (partes do maciço próximas aos taludes) são preenchidos por enrocamento, enquanto o núcleo, parte responsável pela estanqueidade, é composto por um material impermeável, geralmente argila (seção mista), centralizada ou inclinada, separada dos espaldares por zonas de transição (MASSAD, 2010; COSTA, 2012). Além de material argiloso, a geomembrana e o núcleo asfáltico esbelto podem ser utilizados para impermeabilização. A Figura 2.8 ilustra seções transversais de barragens de enrocamento com núcleo impermeável de argila.

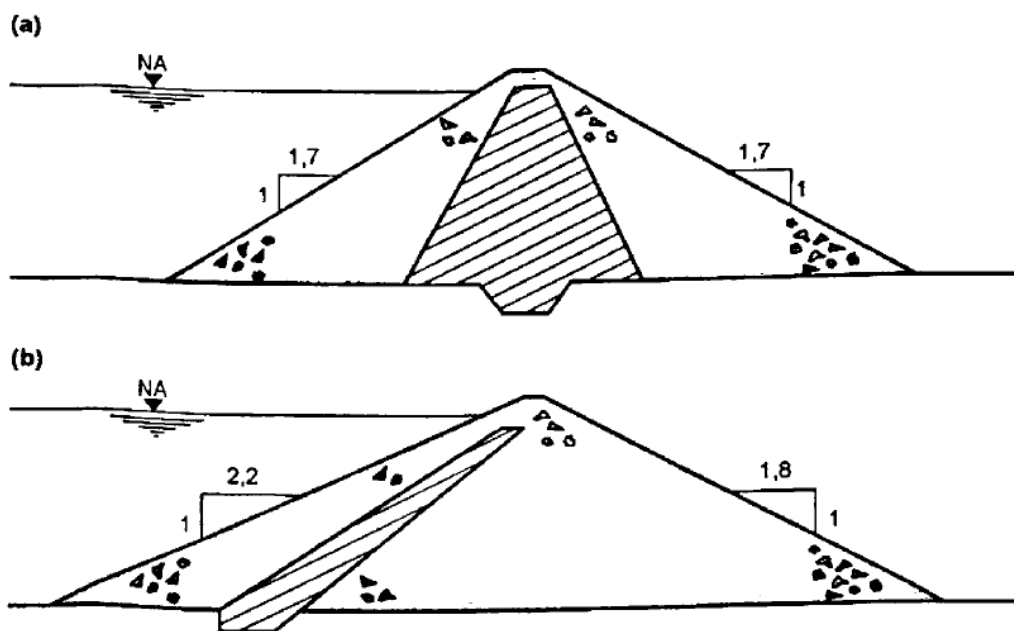


Figura 2.8 - Barragem de seção mista: (a) núcleo de argila centralizado, (b) núcleo de argila inclinado
(Fonte: MASSAD, 2010)

- Barragem de enrocamento com face impermeável: nesse caso, toda a barragem é composta por enrocamento, com exceção de sua face de montante, onde ocorre a impermeabilização. Normalmente, utiliza-se concreto como material de vedação, embora a geomembrana, o asfalto e o aço também possam ser utilizados. (ASSIS et al., 2003; MASSAD, 2010; COSTA, 2012). A Figura 2.9

explicita a seção transversal de uma barragem de enrocamento com face de concreto.

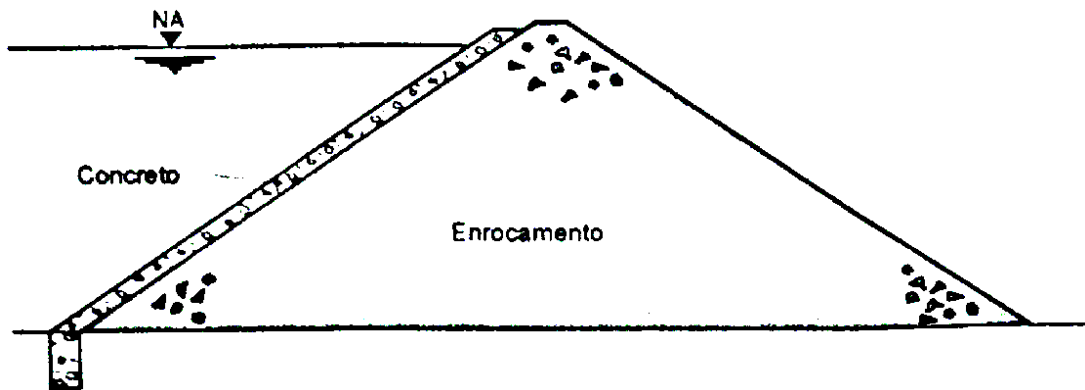


Figura 2.9 - Barragem de enrocamento com face de concreto (Fonte: MASSAD, 2010)

2.1.3 Barragens de concreto

Entre os tipos de barragem de concreto, estão:

- Barragens de concreto gravidade: conforme sugerido pelo nome, essas barragens obtêm sua estabilidade por meio de seu peso, possuem pouca armação e funcionam apenas à compressão, podendo ter traçado retilíneo ou em arco (VIEIRA, 2009; MASSAD, 2012; COSTA, 2012). A Figura 2.10 ilustra um esquema de transmissão de esforços em barragens de concreto gravidade com traçado retilíneo e em arco.

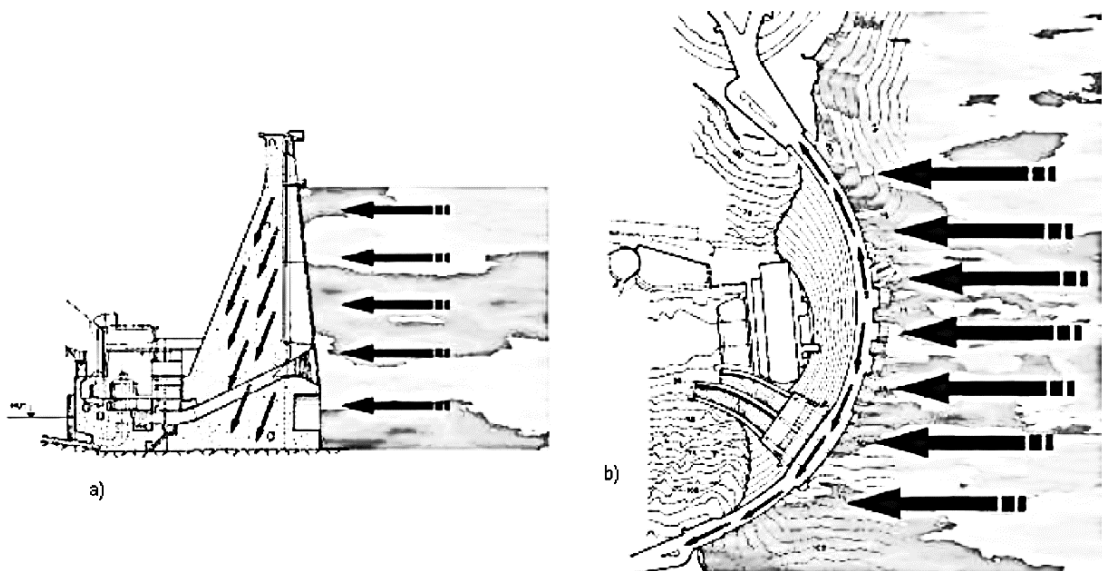


Figura 2.10 – Esquema de transmissão de esforços em barragens de concreto gravidade com traçado retilíneo (a) e em arco (b) (Fonte: VIEIRA, 2009)

- Barragens de concreto gravidade aliviada: semelhantes às barragens de concreto gravidade, só que com uma estrutura vazada, mais leve, o que confere menores cargas às fundações, demandando menores quantidades de concreto. Essas estruturas, por outro lado, necessitam de maiores quantidades de armação devido aos maiores esforços de tração existentes. Também podem ter traçado retilíneo ou em arco (COSTA, 2012).
- Barragens de concreto em contrafortes: semelhantes às barragens de concreto gravidade e ainda mais vazada que as barragens de concreto gravidade aliviada, portanto mais leve. As características da estrutura resultam em maiores tensões de contato e esforços de tração. (WAHLSTROM, 1974; MASSAD, 2010; COSTA, 2012). A Figura 2.11 demonstra uma barragem de concreto em contrafortes.

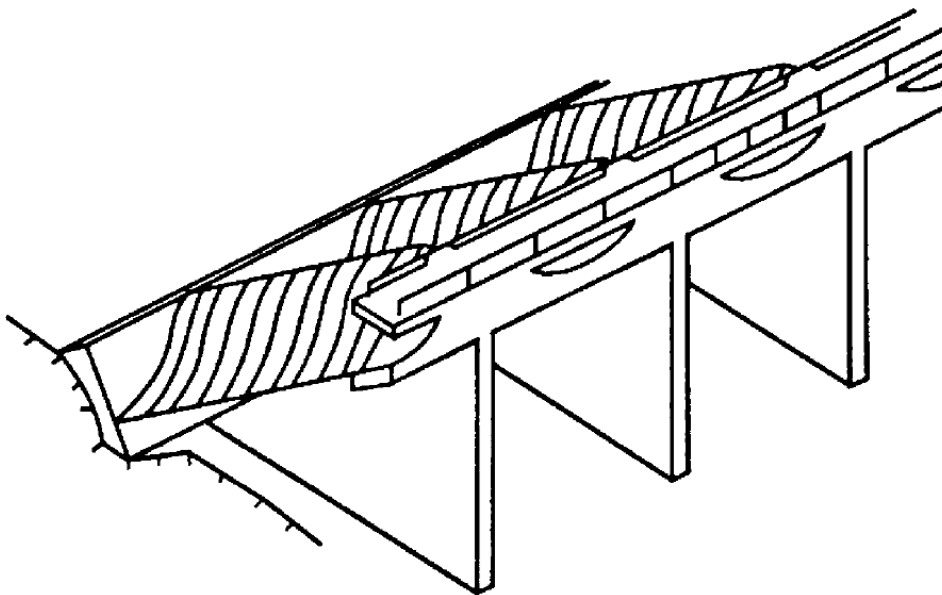


Figura 2.11 - Barragens de concreto em contraforte (Fonte: MASSAD, 2010)

- Barragens de Concreto Compactado a Rolo (CCR): consistem em barragens de concreto gravidade onde o concreto é espalhado e depois compactado. Como a porosidade do CCR é alta, garante-se a estanqueidade desse tipo de barragem por meio de uma camada de concreto convencional construída no talude de montante. (COSTA, 2012).
- Barragens de concreto abóbada (de dupla curvatura): são barragens de concreto em que a curvatura ocorre em dois sentidos, horizontal e vertical. Os seus arcos

podem ser simples ou múltiplos (COSTA, 2012). A Figura 2.12 esquematiza a transmissão de esforços em barragens de concreto abóbada, ao passo que a Figura 2.13 resume os principais tipos de barragens de concreto descritas.

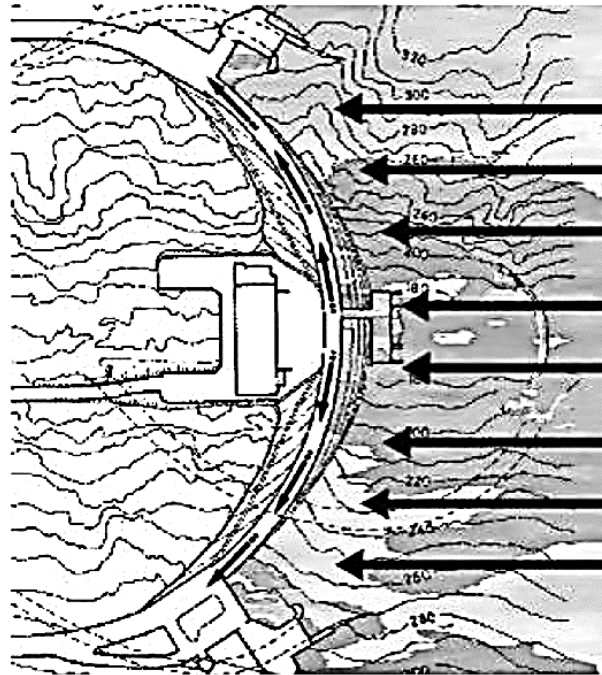


Figura 2.12 - Esquema de transmissão de esforços em barragens de concreto de dupla curvatura (Fonte: VIEIRA, 2009)

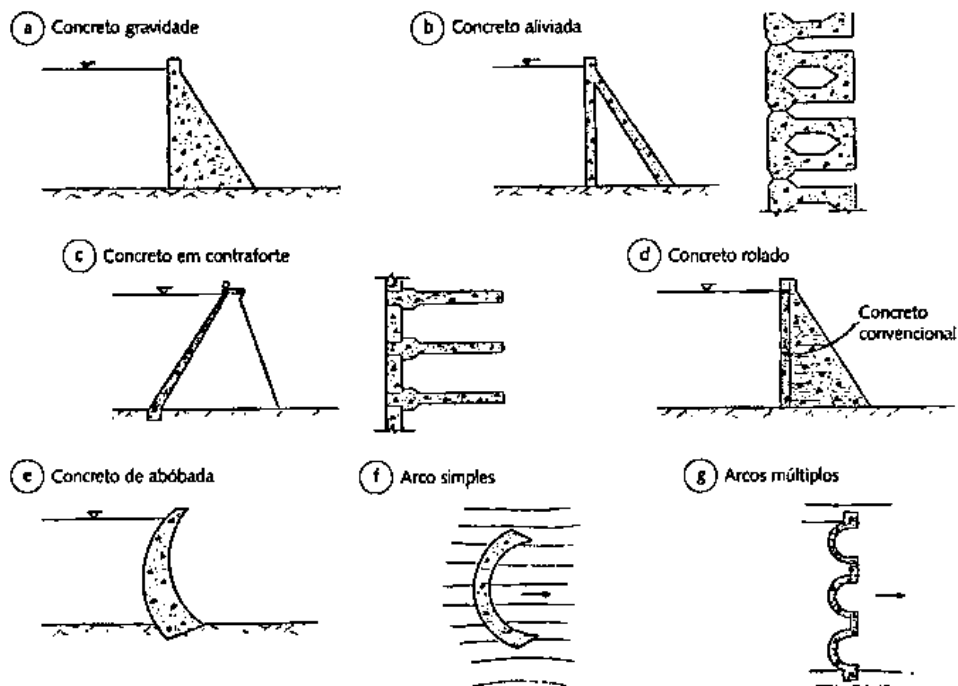


Figura 2.13 - Principais tipos de barragens de concreto (Fonte: COSTA, 2012)

2.1.4 Barragens mistas

De acordo com Costa (2012), uma barragem pode ser compreendida como mista em decorrência de sua seção ou do seu traçado. As barragens de seção mista são caracterizadas por possuírem materiais diferentes ao longo de sua seção transversal (terra e enrocamento; terra e concreto; e enrocamento e concreto), enquanto as de traçado misto por possuírem partes de diferentes tipos. A Figura 2.8, apresentada anteriormente, ilustra uma barragem de seção mista de terra e enrocamento.

2.2 CICLO DE VIDA DE UMA BARRAGEM

As barragens são estruturas com longos períodos de vida útil, sendo o seu ciclo de vida dividido em quatro etapas principais: projeto, construção, operação e descomissionamento. Além dessas, uma etapa também possível após o fim da operação da barragem é a descaracterização, que consiste, em barragens de rejeitos, na drenagem do seu barramento, manutenção dos rejeitos e incorporação da sua estrutura à paisagem da região por meio do plantio de vegetação (DINADRILL, 2021).

O projeto é a primeira etapa e consiste numa série de estudos, investigações e análises que orientam definições relacionadas ao dimensionamento, às metodologias de construção, dentre outros. Esta é a fase ideal para implementação de um gêmeo digital, sendo dividida em quatro subpartes:

- I. Inventário: fase inicial de um projeto, consiste no ordenamento dos melhores locais para implantação do barramento em relação ao aproveitamento energético, controle de cheias, navegação etc., levando-se em consideração as principais características da região. (ASSIS et al., 2003; COSTA, 2012).
- II. Viabilidade: visa, a partir dos pontos definidos no inventário, a definição do local exato de implantação do barramento, juntamente com uma série de outras definições, como o melhor tipo de barragem e o seu arranjo geral. Além disso, é nessa fase que a viabilidade técnica, econômica e ambiental do empreendimento é aferida. (ASSIS et al., 2003; COSTA, 2012; QUEIROZ, 2016).
- III. Projeto básico: etapa em que as definições finais são feitas e todos os dimensionamentos finalizados, de forma que os memoriais descritivos e de cálculo, juntamente com as especificações técnicas, são elaborados. Nessa fase, equipamentos, cronograma e orçamento devem ser delimitados, permitindo levar a obra a licitação. (ASSIS et al., 2003; COSTA, 2012).

- IV. Projeto executivo: fase final de projeto em que o projeto básico é pormenorizado, definindo detalhes de execução, equipamentos, fiscalização, testes, entre outros (ASSIS et al., 2003; QUEIROZ, 2016).

Posterior à fase de projeto, vem a fase de construção, que consiste não somente na construção da barragem em si, mas também de todas as estruturas auxiliares que possibilitam a obra, sendo finalizada com o enchimento do reservatório (COSTA, 2012). Em seguida, está a fase de operação, compreendendo a etapa em que o empreendimento está finalmente em funcionamento, parcial ou total.

Por fim, está a etapa de descomissionamento, que é prevista para quando o empreendimento cessa as suas atividades e é desativado e descaracterizado de forma segura. Esta foi concebida recentemente, e é ainda pouco discutida e colocada em prática, porém muito delicada, como dificuldades recentes nessa fase mostraram (GEOSCAN, 2021; ISTOÉ, 2021).

2.3 MONITORAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO

O controle da segurança de uma barragem, de responsabilidade do empreendedor, está intimamente relacionado com o monitoramento de seu comportamento, que é possível, principalmente, por meio da mensuração de uma série de grandezas. A coleta desses dados é proporcionada pela instrumentação das principais partes do empreendimento, como as fundações, o maciço da barragem e as estruturas extravasoras. Isso permite o controle das condições de segurança da barragem durante as fases de construção, primeiro enchimento, operação e descomissionamento (GUTIÉRREZ, 2003; ANA, 2016b).

De acordo com o U.S. Bureau of Reclamation (1987), as razões para utilização da instrumentação podem ser agrupadas em quatro categorias:

- Razões de diagnóstico: relacionadas ao monitoramento das condições de segurança da barragem durante a sua fase de construção, operação e descomissionamento, de forma a permitir a validação das hipóteses de projeto, verificação do desempenho da obra, diagnóstico de eventos adversos etc.;
- Razões de previsão: relativas à utilização da instrumentação para prever o comportamento da barragem a curto e a longo prazo, permitindo a garantia da segurança e eficiência do empreendimento.
- Razões legais: relacionadas ao fato de que dados provenientes de um adequado projeto de instrumentação podem servir como sustentação em possíveis processos de contestação técnica e/ou financeira.

- Razões de pesquisa: referentes ao fato de uma adequada instrumentação do empreendimento ser capaz de fornecer informações essenciais para o entendimento da complexidade de funcionamento de um barramento, permitindo a utilização das mesmas em projetos futuros ou paralelos.

É importante destacar que os dados que serão monitorados devem ser criteriosamente definidos, de forma a serem capazes de representar pontos críticos na eficiência e segurança do barramento. O mesmo nível de cuidado deve ser aplicado no momento de instalação (PECK, 1984. SILVEIRA, 2006). O planejamento para tal geralmente consiste numa etapa delicada, haja vista diversos fatores complicadores, tais como:

- instrumentos de monitoramento fixos na barragem, como os piezômetros;
- obra de grandes dimensões e com elevada vida útil estimada;
- instrumentos localizados em ambientes agressivos (locais com altas pressões, umidade elevada, grandes deformações etc.) (SILVEIRA, 2006);
- grande variedade de fins, tipos de estrutura e materiais de barragens, entre outros.

Para a ANA (2016b), o Plano de Monitoramento e Instrumentação de uma barragem deve incluir a definição das grandezas que serão monitoradas, o detalhamento da instalação dos instrumentos, a especificação da frequência das leituras, do tratamento dos dados coletados e da manutenção dos equipamentos. Além disso, a agência ressalta a importância de se elaborar o plano, contendo pormenores do processo de instalação, ainda na fase de projeto. Esse plano deve ainda contemplar, nas fases seguintes, as adaptações necessárias. Ademais, vale ressaltar que é de fundamental importância a definição de valores de referência para as leituras de todos os instrumentos, com especificação de medidas normais/esperadas, alarmantes e de emergência.

De um modo geral, as grandezas a monitorar em uma barragem podem representar: as suas propriedades, as ações as quais ela está submetida, os efeitos dessas ações e as consequências desses efeitos (ANA, 2016b). Medidas de pressão por meio de piezômetros hidráulicos instalados na fundação de barragens de concreto, medidas de movimentação relativa em juntas ou fissuras por meio de medidores triortogonais de junta no mesmo tipo de barragem, bem como mensurações de recalques a partir de métodos de geodesia de posição e de deslocamentos horizontais a partir de inclinômetros em barragens de aterro são exemplos de dados indispensáveis para uma adequada auscultação de barragens (MACHADO, 2007; ANA, 2016b).

2.4 INSTRUMENTAÇÃO AUTOMATIZADA

Existem duas maneiras principais de se obter dados por meio de instrumentos instalados, a aquisição manual e a automática. Quispe et al. (2018) destacam a alta segurança e confiabilidade associada à coleta automática de dados, contudo, alertam para a alta complexidade e os elevados custos de implantação desses sistemas quando comparados aos instrumentos de leitura manual, sobretudo em fases iniciais, com previsão de retorno a longo prazo. Silveira (2006), por sua vez, recomenda que a necessidade de instrumentação automatizada seja analisada, para se evitar sofisticações e automatizações desnecessárias.

Devido aos rápidos avanços tecnológicos que propiciaram instrumentos de aquisição automática mais confiáveis, eficientes e menos custosos, diversos empreendedores têm automatizado o monitoramento de suas barragens, fenômeno já percebido no final do século XX (ICOLD, 2000). Já nesse período, a mesma comissão destacava os muitos casos de sucesso relacionados à automatização, especialmente importantes em barramentos de grande porte, compreendendo diversas vantagens frente a coletas manuais, principalmente quando considerada a praticidade e precisão dessa modalidade.

Segundo a ICOLD (2000), um sistema de monitoramento automatizado é composto por três partes principais:

- O sistema de aquisição automática de dados: inclui os sensores remotamente controlados, os *data loggers*, conexões entre os sensores e os *data loggers* e os *softwares* responsáveis pelo controle do processo de aquisição;
- O sistema de transmissão de dados: permite a transmissão dos dados coletados e o controle remoto do *data logger*.
- O sistema de processamento e gerenciamento: como o nome sugere, permite que os dados sejam processados e gerenciados, apresentando-os e manipulando-os de acordo com as funções demandadas.

Conforme aponta Machado (2007), diante de uma aquisição automatizada deve existir em cada local do empreendimento uma casa de controle que abrigue o sistema de monitoramento e gerenciamento dos dados coletados, de forma a permitir a emissão de alarmes, geração de gráficos, entre outras coisas.

Por fim, é importante citar a Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2010), alterada pela Lei Nº 14.066 em 2020 (BRASIL, 2020), que define a obrigatoriedade do armazenamento dos dados de instrumentação de barragens e fornecimento dos mesmos ao órgão fiscalizador periodicamente e em tempo real, quando requerido. Esta, além de estimular

a aquisição automatizada de dados, evidencia a necessidade de tecnologias que permitam uma rápida coleta e transferência dos dados de instrumentação.

Além do mais, indo ao encontro da Lei Nº 12.334, a Resolução Nº 13 da Agência Nacional de Mineração (ANM), de 8 de agosto de 2019 (BRASIL, 2019), obriga o empreendedor a “manter sistema de monitoramento automatizado de instrumentação, adequado à complexidade da estrutura, com acompanhamento em tempo real e período integral, seguindo os critérios definidos pelo projetista”, para barragens de mineração classificadas com DPA alto e características de risco afins.

Nesse cenário, o desenvolvimento do gêmeo digital de barragens se torna ainda mais importante, capaz de representar avanços significativos para a segurança e eficiência de barramentos.

3. GÊMEO DIGITAL

Definido por Tao et al. (2017, p. 3564, tradução nossa) como “uma simulação probabilística integrada multi-física e multi-escala de um produto complexo”, o gêmeo digital é um conjunto de ferramentas e processos que possibilitam a simulação de um objeto do mundo físico. Características físicas, ações, esforços, processos, serviços etc. podem ser integralmente espelhados em um produto virtual, por meio de uma ampla gama de tecnologias que propiciam uma integração quase que instantânea entre ambos os objetos (GRIEVES, 2015; QINGLIN QI et al., 2019).

Desde a proposição do conceito, discussões acerca das definições e aplicações do GD vêm crescendo aceleradamente, diversos autores (NEGRI et al., 2017; SCHLEICH et al., 2017; KRITZINGER et al., 2018; ZHENG et al., 2018; TAO et al., 2019) apontam inúmeras possibilidades de aplicação desta ferramenta, destacando o seu uso na previsão e monitoramento de comportamentos do objeto, na otimização de sua operação, no planejamento de manutenções, na detecção de falhas, no controle de qualidade, entre outros (Figura 3.1).

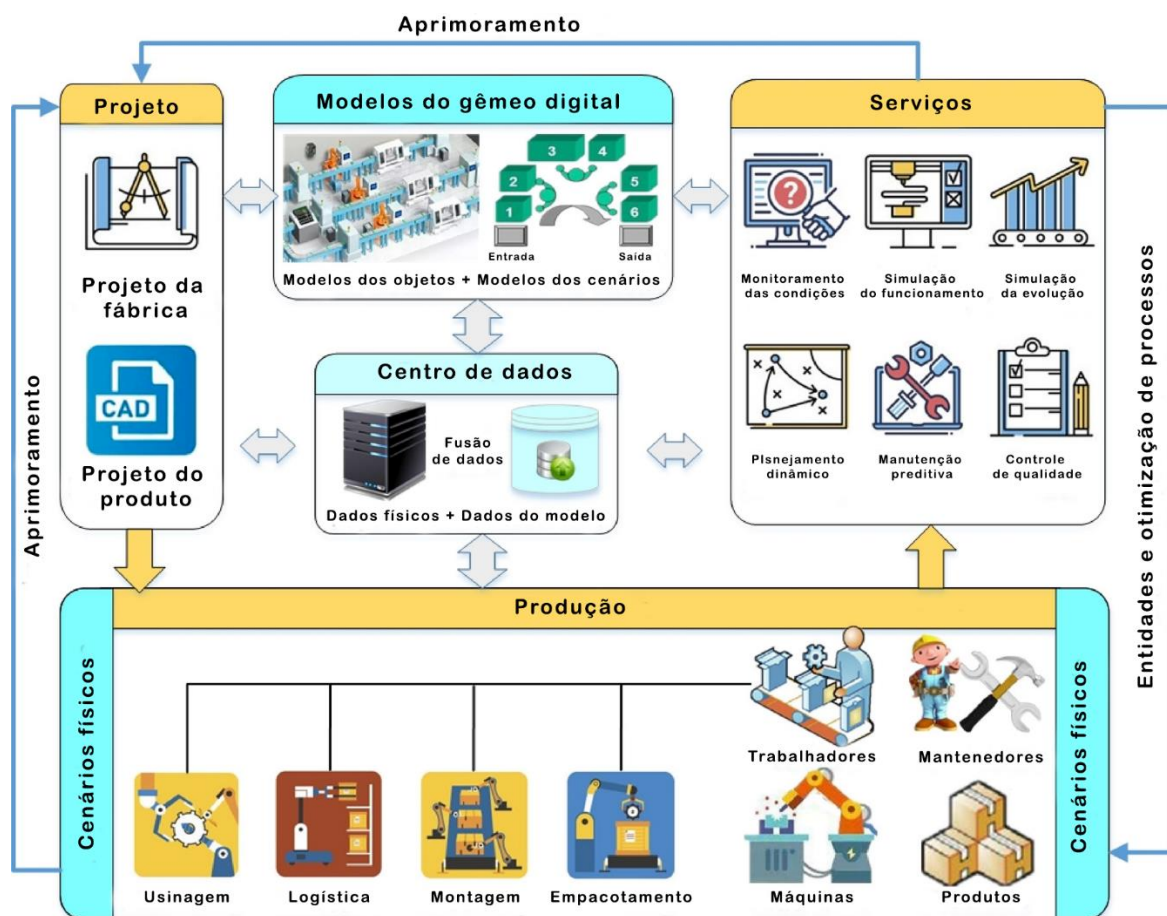


Figura 3.1 - Aplicações de um GD (Fonte: adaptada de QINGLIN QI et al., 2019)

Embora trabalhos com aplicações satisfatórias de gêmeos digitais já tenham sido desenvolvidos (DEBROY et al., 2016; CAI et al., 2017; QINGLIN QI e TAO, 2018; HAAG e ANDERL, 2018), nota-se que as contribuições proporcionadas pela utilização de um GD estão, na maioria das vezes, em estados iniciais de implementação, o que evidencia uma tecnologia ainda distante de realizar todo o seu potencial, como destaca Qinglin Qi et al. (2019). No Brasil, por exemplo, são poucos os exemplos práticos no setor da construção civil. A Figura 3.2 ilustra algumas áreas passíveis de aplicação do GD.

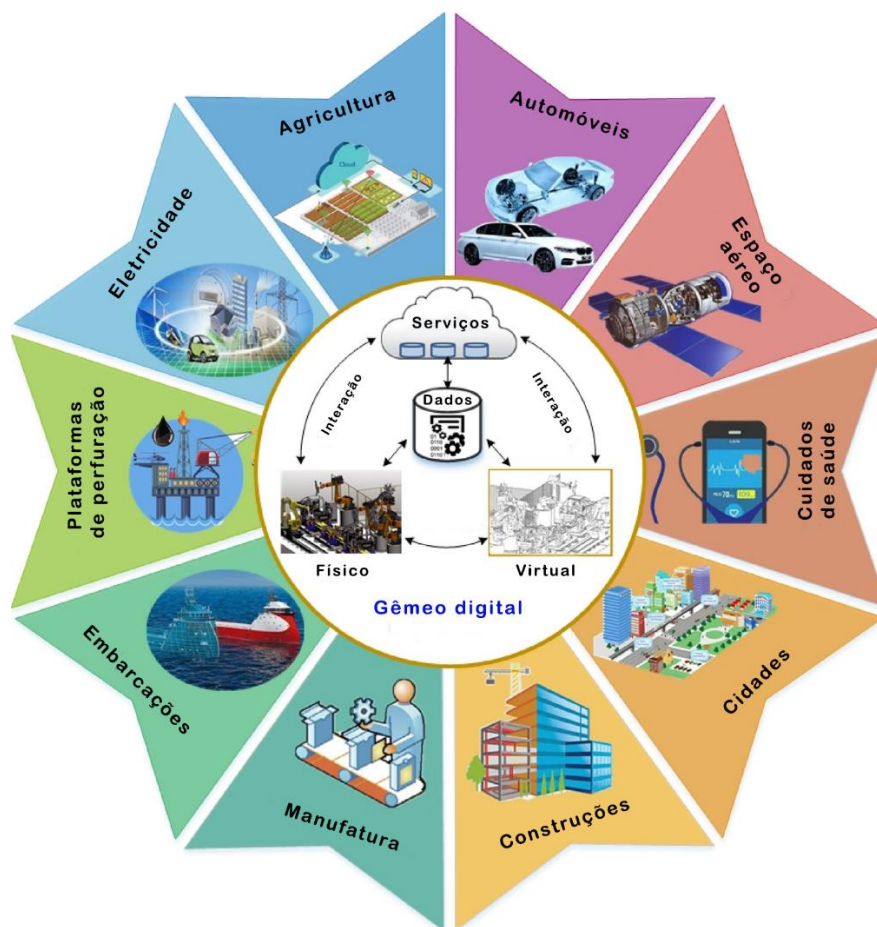


Figura 3.2 - Possíveis áreas de aplicação do GD (Fonte: adaptada de QINGLIN QI et al., 2019)

Schluse e Rossmann (2016), Tal et al. (2019) e Qinglin et al. (2019) ressaltam que a integração eficiente das três partes principais que compõem o GD (produto físico, produto virtual e suas conexões) somente se tornou possível com o advento da Indústria 4.0. Os avanços tecnológicos trazidos por essa, sobretudo na área de tecnologia de informação, propiciaram e vêm propiciando uma convergência entre os mundos físico e virtual. *Big Data*, IoT (*Internet Of Things*), Inteligência Artificial (IA), Computação em Nuvem, Realidade Aumentada e Virtual (RA e RV) e o BIM (*Building Information Modeling*) são exemplos de

tecnologias apresentadas ou aprimoradas na Quarta Revolução Industrial que se estabeleceram como peças centrais para o processo de reprodução e simulação de fenômenos do mundo físico, por meio das quais é possível a criação de gêmeos digitais.

3.1 IOT (INTERNET OF THINGS)

Segundo Mattern e Floerkemeier, a IoT (*Internet of Things*, em português, Internet das coisas) “representa uma visão em que a internet se estende ao mundo real abrangendo objetos do cotidiano” (2010, p. 242, tradução nossa), ao passo que a União Internacional de Telecomunicação define essa tecnologia como “uma infraestrutura global para a sociedade da informação, que permite serviços avançados por meio da interconexão (física e virtual) de ‘coisas’, baseada em tecnologias de informação e comunicação interoperáveis, existentes e em evolução” (ITU, 2012, tradução nossa). De forma mais tangível, pode-se dizer ainda que a IoT consiste em diferentes objetos do mundo físico, sensores e celulares, por exemplo, capazes de se comunicar e cooperar entre si para atingir um objetivo comum, de maneira pervasiva e ubíqua, por meio da troca de informações (ATZORI et al., 2010; GIUSTO et al., 2010; CHEN et al., 2014; BOTTA et al., 2014). Essa tecnologia é fundamental para permitir a comunicação em tempo real entre as partes de um gêmeo digital, consistindo numa peça chave para transmissão constante de informações das várias partes (“coisas”) que compõem o produto físico ao produto virtual e vice-versa.

Nos últimos anos, o interesse pela IoT tem crescido consideravelmente, de acordo com Wortmann e Flüchter (2015), por exemplo, pode-se destacar mundialmente uma recente tendência de companhias desenvolvendo e investindo em produtos e serviços baseados na Internet das coisas, além de movimentos de grupos e governos em direção ao reconhecimento desta nova tecnologia como uma ferramenta disruptiva. Ademais, destaca-se uma série de esforços dos mesmos agentes para criação de padrões e protocolos. Por sua vez, Li et al. (2014, p. 243, tradução nossa) apontam que a IoT é “parte da internet do futuro e compreenderá bilhões de “coisas” inteligentes se comunicando”, sendo esses dispositivos, segundo os mesmos autores, responsáveis por “estender ainda mais as fronteiras do mundo com entidades físicas e componentes virtuais”.

A origem do termo IoT data de antes dos anos 2000 e é atribuído ao laboratório Auto-ID no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*, em português, Instituto de Tecnologia de Massachusetts) durante o desenvolvimento de trabalhos com infraestruturas RFID (*Radio Frequency Identification*, em português, Identificação por Radiofrequência) em rede (ATZORI et al., 2010; MATTERN e FLOERKEMEIR, 2010; WORTMANN e FLÜCHTER,

2015). Desde então, a visão em relação ao termo IoT tem se estendido consideravelmente, não mais se restringindo ao RFID e passando a englobar uma série de novas tecnologias e ferramentas, especialmente efervescentes no escopo da Indústria 4.0 (ATZORI et al., 2010; WORTMANN e FLÜCHTER, 2015).

Em relação às aplicações da IoT, existe e se projeta uma ampla diversidade e variedade de situações em que esta tecnologia pode ser utilizada. Wortmann e Flüchter, por exemplo, salienta que as “soluções IoT estão cada vez mais se estendendo para praticamente todas as áreas do dia a dia” (2015, tradução nossa), ao passo que Atzori et al. (2010) destacam as diversas vantagens possíveis para usuários privados e empresas, podendo-se citar para os primeiros, ganhos nos campos doméstico e de trabalho, e para os segundos, benefícios em setores como automação e manufatura industrial, logística, gerenciamento de processos e negócios, transporte inteligente de pessoas e bens, entre outros.

Finalmente, para implementação da IoT em um determinado cenário, uma série de *softwares* e componentes de hardware são necessários, correspondentes a várias camadas de tecnologias para a Internet das coisas. Wortmann e Flüchter (2015) esclarecem que uma solução IoT normalmente é composta por três camadas principais: a camada do dispositivo ou “coisa”, a camada da conectividade e a camada da nuvem IoT (centro de armazenamento, processamento e gerenciamento dos dados recebidos e das “coisas” conectadas).

3.1.1 DISPOSITIVOS

A camada dos dispositivos ou “coisas” numa solução IoT consiste nos sensores e nos componentes de hardware associados capazes de coletar os dados especificados, normalmente embebidos por um conjunto de soluções de software para poderem operar (WORTMANN e FLÜCHTER, 2015).

3.1.2 CONECTIVIDADE

A camada de conectividade, por sua vez, consiste nos protocolos, configurações, equipamentos e tecnologias responsáveis por possibilitar a conexão entre a “coisa” e a nuvem IoT.

3.1.3 NUVEM

Por sua parte, na camada da nuvem IoT os dispositivos e dados podem ser armazenados e manipulados, com diferentes *softwares* e ferramentas devendo ser empregados para tal. Além disso, Porter e Heppelmann (2014) e Wortmann e Flüchter (2015) salientam nesta camada o desenvolvimento de etapas de coordenação da interação com pessoas,

sistemas e “coisas”, além da aplicação de condições de segurança e integração com fontes externas. De acordo com Wortmann e Flüchter (2015), um outro contexto comumente utilizado relacionado a essa camada é a plataforma IoT, conceito equivalente à nuvem IoT, que geralmente possui funções que podem variar significativamente e focar em diferentes aspectos de acordo com as necessidades da área de aplicação e das intenções do desenvolvedor.

Nesse contexto, conforme destacado por Zhou et al. (2013), também se utiliza com bastante frequência os termos IaaS, PaaS e SaaS (*Infrastructure as a Service, Platform as a Service e Software as a Service*, em português, Infraestrutura como um serviço, Plataforma como um serviço e Software como um serviço), que juntamente com Haas (*Hardware as a Service*, em português, Hardware como um serviço) definem as funcionalidade que podem ser oferecidas pelas plataformas IoT, e de uma forma geral pela computação em nuvem.

3.1.4 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

Parte da camada de conectividade, os protocolos de comunicação para a Internet das coisas representam um tema amplamente discutido ultimamente. As características de uma conexão massiva entre os dispositivos IoT fazem emergir diversas questões a respeito dos protocolos necessários para estabelecer as regras de comunicação entre essas “coisas”.

Entre as diferentes camadas que definem uma comunicação de máquinas, estão a física e a de aplicação, na primeira podem ser elencados diversos protocolos de comunicação, como por exemplo o Bluetooth, o NFC, o Wi-Fi, o RFID, o ZigBee e as redes móveis (AL-SARAWI et al., 2017). Os mesmos autores destacam que cada um desses protocolos possui diferentes especificações e benefícios, sendo difícil decidir pela melhor opção, que tende a variar a depender da aplicação em questão.

Em relação aos protocolos da camada de aplicação, Naik (2017) comenta que os quatro protocolos de comunicação para sistemas IoT amplamente aceitos e emergentes são o MQTT, CoAP, AMQP e HTTP. O autor salienta ainda que a depender dos requisitos do desenvolvedor, todos os protocolos podem ser viáveis, em relação à segurança, por exemplo, os protocolos são elencados, do que que apresenta o mais alto nível de suporte para segurança e serviços adicionais para o que apresenta menos, da seguinte maneira: AMQP, HTTP, CoAP e MQTT. Já em relação ao consumo de energia e de recursos o CoAP se destaca como a melhor opção, por outro lado, ao se tratar de largura de banda e qualidades de serviços, o HTTP e o MQTT são as melhores escolhas respectivamente. Em suma, mais uma vez os

requisitos definidos pelo desenvolvedor para a sua aplicação determinam o protocolo de comunicação a ser escolhido.

3.1.5 DESAFIOS TECNOLÓGICOS

Finalmente, vale destacar que diversos fatores podem dificultar a implementação de uma solução IoT abrangente, alguns desafios que Mattern e Floerkemeier (2010) destacam são:

- Escalabilidade: relaciona-se às dificuldades associadas a permitir que todas as funções possíveis da internet convencional dos computadores se estendam com a mesma eficiência para ambientes em grande escala;
- “Chegar e operar”: relaciona-se com a necessidade de se construir dispositivos capazes de automaticamente se configurar e se conectar a sua solução IoT específica;
- Interoperabilidade: relaciona-se com a necessidade das diferentes camadas da tecnologia IoT, produzidas por diferentes empresas, serem aptas a se comunicar e operar em conjunto, para isso, são necessários esforços em direção à padronização de protocolos, práticas comuns etc.;
- Descoberta: relaciona-se à dificuldade de permitir que os dispositivos sejam automaticamente identificados;
- Complexidade de software: relaciona-se com as dificuldades associadas a se construir soluções de software capazes de gerenciar objetos inteligentes e providenciar serviços que os suportam;
- Volume de dados: relaciona-se com a dificuldade, em algumas camadas de soluções IoT, de se armazenar e gerenciar grandes volumes de dados;
- Interpretação de dados: relaciona-se com a dificuldade de se gerar informações úteis a partir de uma massiva quantidade de dados crus;
- Segurança e privacidade: relaciona-se com os desafios já enfrentados pela internet convencional, como confidencialidade, integridade da mensagem etc., que tendem a ser maiores num contexto em larga escala, que terão que ser combatidos concomitantemente ao surgimento de outros problemas, como evitar que dispositivos automaticamente se conectem e se comuniquem de forma não permitida pelo usuário;

- Tolerância ao erro: relaciona-se com a dificuldade de se estabelecer condições que permitam falhas nas soluções IoT sem afetar a usabilidade principal das “coisas”;
- Alimentação: relaciona-se às dificuldades associadas a se fornecer energia de forma eficiente e pouco custosa aos elementos das soluções IoT;
- Interação e comunicação: relaciona-se às dificuldades na definição de tecnologias de comunicação de longo e curto alcance, capazes de evitar interferências e serem energeticamente eficientes.

3.2 BIG DATA, COMPUTAÇÃO EM NUVEM E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

De acordo com Sagiroglu e Sinanc (2013), *Big Data* é um termo que se refere a grandes conjuntos de dados que geralmente são maiores, mais variados e mais complexos do que conjuntos de dados tradicionais, sendo esses acompanhados por maiores dificuldades de armazenamento e processamento. Este aspecto da *Big data* resulta numa associação do termo a novas tecnologias e técnicas de análise capazes de lidar com esse novo cenário (CHEN et al., 2012).

Sagiroglu e Sinanc (2013) definem *Big Data* e a sua análise como os centros da ciência moderna e dos negócios, esses se estabelecem a partir de um aporte contínuo de um grande volume de dados de diferentes dispositivos e aplicações (OUSSOUS et al., 2017), sendo a IoT justamente uma das principais tecnologias capazes de garantir essa contínua e expressiva contribuição de dados.

Essa grande quantidade de dados gerada tende a sobrecarregar as capacidades de armazenamento e processamento de dispositivos comuns, o que abre espaço para tecnologias como a Computação em Nuvem, que fornece uma quantidade virtualmente ilimitada de recursos computacionais por meio da Internet com vários níveis de integração entre os seus nós (BOTTA et al., 2014; CHEN et al, 2014).

Segundo Biswas e Giaffreda (2014) e Stergiou et al. (2018), o termo Computação em Nuvem, que veio maturando no decorrer dos anos, representa o fornecimento de recursos, serviços, armazenamento e aplicações via internet, com disponibilidade constante e ubíqua ao usuário, além de recursos agrupados e elasticidade. Biswas e Giaffreda (2014) destacam também que a Computação em Nuvem não representa somente o compartilhamento de recursos via internet, mas também a maximização dos mesmos.

Ademais, segundo Stergiou (2018), além das características de fornecimento já citadas, fazem parte da definição do conceito de Computação em Nuvem a necessidade de possuir eficiência energética e sua característica de ser computacionalmente eficiente.

Por sua vez, como ferramenta de processamento do conjunto de dados heterogêneos coletados, se destaca a Inteligência Artificial, juntamente com as suas derivações. O’Leary (2013) ressalta, por exemplo, a adequabilidade da IA para lidar com conjuntos de dados de grandes volumes, variedade e velocidade, devido a essa ser associada ao emprego de ferramentas computacionais dotadas da capacidade de aprendizagem, o que as permite executar tarefas de uma maneira rápida, eficiente e inteligente, como é o caso da previsão de comportamentos com base no reconhecimento de padrões.

Para McCarthy (2007, p. 2, tradução nossa), a Inteligência Artificial é “a ciência e engenharia de fazer máquinas inteligentes[...] Está relacionada à tarefa semelhante a usar computadores para entender a inteligência humana, mas a IA não precisa se restringir aos métodos que são biologicamente observáveis”. Segundo o mesmo autor, alguns dos ramos da IA são o reconhecimento de padrões, a pesquisa, a representação, o aprendizado por experiência (*Machine Learning*, em português, Aprendizado de máquina), o planejamento, a heurística, a inferência, a epistemologia, a ontologia, entre vários outros. Consequentemente resultando em aplicações diversas, como a gestão de ativos, manutenção preditiva e monitoramento na engenharia.

O *Big Data*, a Computação em Nuvem e a Inteligência Artificial são ferramentas centrais na concepção de um GD, a grande necessidade dessa ferramenta por tecnologias poderosas de armazenamento, processamento e análise de grandes e dinâmicos volumes de dados, vide a alimentação contínua e em tempo real que define o gêmeo digital, além das diversas funções que esse deve ter, torna essas tecnologias indispensáveis para a criação e gestão de GD’s.

3.3 REALIDADE VIRTUAL E AUMENTADA

Finalmente, no contexto de ferramentas de visualização e manipulação dos dados coletados de um gêmeo digital, a realidade virtual e a aumentada se sobressaem. Essas se referem a uma série de tecnologias e processos capazes de gerar e apresentar ao usuário conjuntos de elementos e informações virtuais, otimizando o entendimento do usuário em relação a fenômenos complexos.

Para Azuma (1997, p. 355 e 356, tradução nossa), as “tecnologias de Realidade Virtual imergem completamente o usuário em um ambiente sintético”, enquanto a “Realidade Aumentada suplementa a realidade, ao invés de substituí-la completamente”.

Em relação à realidade virtual, Zheng et al. (1998) comentam que as ideias-chaves que rondam essa tecnologia é a imersão e a interatividade, com a primeira significando bloquear distrações e focar somente na informação apresentada pela tecnologia, e a segunda representando a habilidade dos seres humanos de interagirem com o mundo virtual.

Havard et al. (2019), por sua parte, destacam que essa tecnologia é um excelente meio para ajudar o ser humano a interagir com os CPPS (*Cyber-Physical Production Systems*, em português, Sistemas de produção ciber-físicos), que segundo Monostori (2014, p. 10, tradução nossa) “consistem em elementos e subsistemas autônomos e cooperativos que estão se conectando entre si de maneiras dependentes da situação, em e por todos os níveis de produção, desde os processos, passando pelas máquinas, até as redes de produção e logística”. Ainda segundo Havard et al. (2019, p. 473, tradução nossa), a “realidade virtual oferece uma visualização 3D em escala imersiva, renderização realista, interações gestuais naturais, funcionalidades de colaboração e ferramentas de navegação rápida em áreas amplas.”, permitindo ao usuário concentrar-se em todos os elementos do sistema, por diferentes perspectivas.

A associação das tecnologias de realidade virtual e aumentada com o *Big Data* pode ser também bastante prolífica, Moran et al. (2015) salientam, por exemplo, que a visualização representa uma peça importante na exploração e entendimento de grandes volumes de dados. Keim (2002) também destaca as vantagens de uma exploração visual dos dados, salientando a importância da integração do componente humano ao processo de exploração. Vários autores (KEIM, 2002; MORAN et al., 2015; OLSHANNIKOVA et al., 2015; TERAS e RAGHUNATHAN, 2015) comentam as vantagens introduzidas pelo aperfeiçoamento da visualização de grandes conjuntos de dados, o uso de ferramentas de realidade virtual, aumentada ou mista, portanto, podem representar interações mais eficientes com o *Big Data*, permitindo ao usuário acessar grandes conjuntos de dados de uma forma mais amigável e clara.

Todos esses benefícios incrementam a aplicabilidade dessas ferramentas de visualização, de forma que Kuts et al. (2019) apontam que essas podem ser utilizadas em qualquer esfera das atividades humanas, citando a utilização dessas tecnologias em manufaturas, robótica, arquitetura, entretenimento, educação, simulações, engenharia, etc.

3.4 BIM (BUILDING INFORMATION MODELING)

De acordo com a ISO 16757-1, o termo BIM se refere à “Construção de um modelo que contém as informações sobre uma edificação em todas as fases do seu ciclo de vida” (2015, tradução nossa). De forma semelhante, a NBS define BIM como “um processo de criação e gerenciamento de informações sobre um projeto de construção ao longo de todo o seu ciclo de vida” (2021, tradução nossa), para isso, a mesma fonte destaca que “uma descrição digital coordenada de cada aspecto do ativo construído é desenvolvida”, a qual normalmente inclui modelos tridimensionais ricos em informações e outros dados relacionados.

Segundo alguns autores (DELBRUGGER et al., 2017; SAI et al., 2020), o BIM pode ser uma das bases para o desenvolvimento de um GD, sendo o mesmo processo indispensável para a criação de um projeto fidedigno que será integrado às outras tecnologias apontadas neste capítulo para a criação de um gêmeo digital. Dessa forma, os parâmetros que descrevem os elementos do modelo de uma construção detalhando as características do ativo e definindo como o modelo se comportará em diferentes situações, irá interagir com os diversos dados que alimentam em tempo real o gêmeo digital e com as variadas ferramentas que compõem o mesmo.

3.5 PLATAFORMAS PARA GÊMEOS DIGITAIS

3.5.1 ITWIN

A *iTwin* é uma plataforma em nuvem de código aberto e escalonável criada pela *Bentley*, que fornece serviços e uma API (*Application Programming Interface*, em português, Interface de programação de aplicação) para criação de aplicações de gêmeos digitais que permitem criar, visualizar e analisar GD’s de ativos de infraestrutura (BENTLEY, 2021a). Segundo a *Bentley* (2021a), a plataforma tem como objetivo cuidar do “*backend*” das aplicações: segurança, infraestrutura e integração de dados, permitindo ao usuário focar no desenvolvimento dos seus aspectos práticos. Essa plataforma tem como biblioteca a *iTwin.js*, que armazena e permite a leitura de aplicações escritas principalmente em TypeScript, mas que também podem ser desenvolvidas em JavaScript.

Um conceito importante na plataforma *iTwin* é o *iModel*, esse elemento, segundo a *iTwin.js* (2021a) pode ser entendido como um banco de dados relacional distribuído que contém informações sobre um único ativo de infraestrutura, podendo conter modelos físicos e funcionais, especificações, desenhos, modelos analíticos, entre outros. O *iModel* é baseado em

SQLite, o qual, por sua vez, pode ser entendido como um banco de dados relacional integrado de código aberto, projetado para prover uma maneira eficiente para aplicativos gerirem dados (OWEN, 2006).

O *iModel* possui um esquema definido pelo BIS (*Base Infrastructure Schemas*, em português, Esquemas de infraestrutura de base), que consiste em uma família de esquemas modulares para modelagem de gêmeos digitais federados para engenharia de infraestrutura, esses esquemas expressam taxonomia, estrutura de dados e relacionamentos para modelagem de entidades do mundo real, sendo escritos usando a linguagem de esquema da Bentley “EC” (abreviação para *Entity Classification*, em português, Classificação de entidade) para modelagem entidade-relacionamento (ITWIN.JS, 2021b).

Os *iModels* são gerenciados no *iModelHub*, centro de controle desses elementos responsável por coordenar acessos simultâneos, assim como mudanças feitas na forma de um conjunto de alterações (*changeSet*), o qual é criado sempre que o *iModel* é modificado e reflete a união de todas as adições, exclusões e modificações em um determinado período. A Figura 3.3 expressa a forma de relacionamento dos serviços da *iTwin.js* e o *iModelHub*.

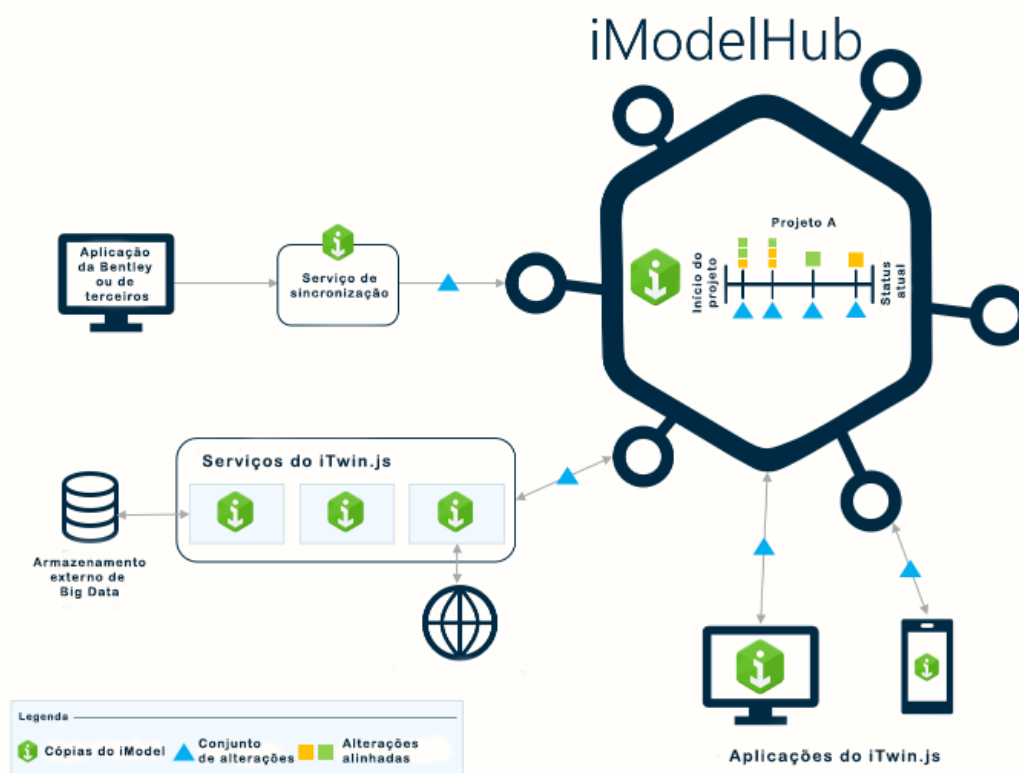


Figura 3.3 - Conexão entre os serviços da *iTwin.js* e o *iModelHub* (Adaptada de ITWIN.JS, 2021c)

Uma outra ferramenta importante no contexto da plataforma *iTwin* é o *iTwin Synchronizer*, que como o nome sugere possibilita a sincronização de alterações feitas em ferramentas de desenho do computador com um gêmeo digital no *iModelHub*, para isso, a ferramenta transforma os dados das ferramentas de *design* (*Autodesk Revit*, *AutoCAD*, *Civil 3D*, *Bentley Microstation* etc.) em um esquema comum (BENTLEY, 2021b).

3.5.2 AZURE

A *Azure* é uma das três plataformas de nuvem pública da *Microsoft* (acompanhada pelo *Office 365* e pelo *Dynamics 365*) e possui os principais componentes do *backend* das soluções IoT da *Microsoft*. Por meio da plataforma podem ser desenvolvidas e implantadas soluções IoT personalizadas da *Microsoft* e de seus parceiros. Entre essas soluções estão incluídos serviços do tipo PaaS, IaaS e SaaS, além de funcionalidades de serviço de banco de dados gerenciado (STACKOWIAK, 2019; MICROSOFT, 2021a).

Stackowiak (2019) explica que nas implementações de IaaS, a *Microsoft* fornece serviços de computação, armazenamento e da rede demandada, enquanto que nas implementações de PaaS oferece ferramentas de Inteligência Artificial, análises, serviços de dados, componentes IoT, integração de componentes, mídia, CDN (*Content Delivery Network*, em português, Rede de distribuição de conteúdo), ambientes de desenvolvedor e DevOps (“combinação de filosofias culturais, práticas e ferramentas que aumentam a capacidade de uma empresa de distribuir aplicativos e serviços em alta velocidade” – AMAZON WEB SERVICES, 2021), computação e serviços de contêiner (um contêiner é uma espécie de pacote que contém todos os componentes necessários para a execução de uma aplicação), além de ambientes de desenvolvimento e implantação de aplicações *Web* e *Mobile*. Destaca-se ainda que a *Azure* oferece uma ampla estrutura de apoio para suportar todas essas implementações. A seguir estão alguns dos principais componentes da plataforma *Azure*.

3.5.2.1 AZURE IOT HUB

Um elemento central na plataforma *Azure*, é o *Azure IoT Hub*, consistindo em uma PaaS que atua como um centro para comunicação bidirecional entre uma aplicação IoT e os dispositivos que essa gerencia (ARROW, 2021). Stackowiak (2019) comenta que o *IoT Hub* suporta diversos protocolos IoT populares para enfileiramento e transmissão de dados, como o HTTPS, AMQP e MQTT. O mesmo autor salienta que o *IoT Hub* também pode ser usado

para gerenciar dispositivos e gêmeos de dispositivos, identifica-los, autenticá-los, fazer upload de seus arquivos, receber e enviar mensagens, entre outros.

Vale salientar que no *IoT Hub* até um milhão de dispositivos mais módulos podem ser conectados a depender do tipo de inscrição escolhido, podendo esses ser autenticados por tokens SAS (*Shared Access Signature*, em português, Assinatura de acesso compartilhado), certificados X.509 (formato padrão para certificados de chaves públicas) individuais ou uma autoridade de certificação X.509.

3.5.2.2 AZURE DIGITAL TWINS

Outro componente importante da plataforma *Azure* é o *Azure Digital Twins*, a PaaS permite a criação de gêmeos digitais e a sua integração com o *IoT Hub*. A sua principal ferramenta oferecida aos desenvolvedores é o *Azure Digital Twins Explorer*, que permite a conexão a uma instância do *Azure Digital Twins* para visualização e interação com os dados recebidos pelo gêmeo digital, o que inclui seus gráficos espaciais e modelos (STACKOWIAK, 2019).

Stackowiak (2019) também salienta que as funcionalidades oferecidas pelo *Azure Digital Twins* são diversas, podendo-se relacionar com os dados enviados pelos dispositivos para validação, computação e despacho dos mesmos, por exemplo. Outra característica essencial da ferramenta é a representação e atualização dos dados recebidos pelo GD em tempo real, conforme conceitualmente estabelecido para um gêmeo digital.

3.5.2.3 AZURE TIME SERIES INSIGHTS

Conforme definido pela *Microsoft* (2021b), o *Azure Time Series Insights (TSI)* “é um serviço IoT de ponta a ponta aberto e escalonável”, podendo ser usado para coletar, processar, armazenar, consultar e visualizar dados, de forma contextualizada e otimizada para séries temporais. De acordo com Stackowiak (2019), o *Azure Time Series Insights* converte para linhas e colunas dados no formato de mensagens JSON e estruturas provenientes do *Azure IoT Hub*, dados esses que podem ser “quentes” (advindos em tempo real) ou históricos, o que pode variar a depender do tipo de inscrição selecionado. Para listar e visualizar os dados, a aplicação da *Web Time Series Insights (TSI) Explorer* pode ser utilizada.

A *Microsoft* (2021b) destaca que a ferramenta é desenhada para exploração e análise operacional de dados, permitindo a descoberta de tendências ocultas, detecção de anomalias e análise das causas dos eventos obtidos.

3.5.2.4 AZURE STREAM ANALYTICS

De acordo com a *Microsoft* (2021c), o *Azure Stream Analytics* é um mecanismo de processamento de eventos e análise em tempo real projetado para analisar e processar grandes volumes de dados provenientes simultaneamente e em alta velocidade de várias fontes. Dentre as diversas possibilidades oferecidas pelo *Azure Stream Analytics* estão o reconhecimento de padrões e relacionamentos nos dados provenientes dos dispositivos conectados, possibilitando a criação de alertas, relatórios, entre diversas outras ações.

Stackowiak (2019) explica que o mecanismo pode ser alimentado por dados provenientes do *Azure IoT Hub*, para em seguida processá-los usando consultas de transformação SQL para filtrar, classificar, agregar e/ou juntar os dados transmitidos. Seguindo o fluxo de trabalho do *Azure Stream Analytics*, os dados são utilizados interna ou externamente, podendo inclusive serem enviados para ferramentas como o *Power BI*

3.5.2.5 AZURE DATABRICKS

Azure Databricks é uma plataforma de análise de dados otimizada para os serviços *Azure*. Essa ferramenta oferece três ambientes para o desenvolvimento de aplicações de uso intensivo de dados: *Databricks SQL*, plataforma destinada para interação com os dados por meio de consultas SQL, *Databricks Data Science & Engineering*, ambiente de trabalho interativo que possibilita a colaboração entre diferentes cientistas e engenheiros, e *Databricks Machine Learning*, ambiente de Aprendizado de Máquina integrado de ponta a ponta que incorpora uma série de serviços relacionados a *Machine Learning* (MICROSOFT, 2021d).

A plataforma é baseada em *Apache Spark* (“uma estrutura de processamento paralelo de software livre que dá suporte ao processamento na memória para aumentar o desempenho de aplicativos que analisam *Big Data* – MICROSOFT, 2021e) e pode ser alimentada por dados do *IoT Hub*, para em seguida serem explorados em qualquer um dos três ambientes citados, ou em outros serviços da plataforma.

3.5.2.6 AZURE FUNCTIONS

Por fim, as *Azure Functions* consistem num outro elemento importante no ambiente *Azure*. Essas podem ser definidas como soluções sem servidor que permitem a criação de códigos para serem executados na ocorrência de uma determinada categoria de eventos que podem ocorrer nos serviços *Azure*, em serviços de terceiros ou sistemas locais (EXIMIACO, 2021; MICROSOFT, 2021g; AZURE, 2021b).

3.6 DIGITAL TWINS DEFINITION LANGUAGE (DTDL)

A DTDL (*Digital Twins Definition Language*, em português, Linguagem de definição de gêmeos digitais) é uma linguagem desenvolvida pela *Microsoft* e parceiros para descrever modelos de gêmeos digitais da *Azure*, mas não somente, podendo também ser utilizada para representar dados de dispositivos em outras soluções IoT ou gêmeo digital. Em geral, a modelagem permite que diversos gêmeos digitais de todos os tipos e de várias fontes sejam provisionados, usados e configurados em uma única solução (AZURE, 2021a; MICROSOFT, 2021f).

A DTDL é uma linguagem de programação independente baseada em uma variante do JSON chamada JSON-LD (ver capítulo 3.6). Essa é formada por diversos elementos (classes de metamodelo), em que o principal é a *Interface* que consiste num elemento de nível superior que encapsula todo o modelo, sendo o restante do mesmo definido dentro dela (MICROSOFT, 2021f).

Os outros elementos/campos que podem estar presentes ou não em uma Interface são:

- *Property*: representa o estado de uma entidade;
- *Telemetry*: representa as medições ou eventos, normalmente usado para descrever as leituras de um dispositivo. Vale destacar que os termos “telemetria”, “dados de telemetria” e afins são muito comuns nos estudos da IoT e do gêmeo digital de uma forma geral;
- *Relationship*: representa o relacionamento de um gêmeo digital com outro;
- *Component*: representa a composição de uma interface por outra, diferentemente do “*Relationship*” o “*Component*” descreve um conteúdo que é diretamente parte da “*Interface*”, não somente uma conexão entre elas;
- *Command*: representa uma função ou operação que pode ser executada em qualquer gêmeo digital.

3.7 LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO

As plataformas e serviços citados nos capítulos 3.4 e 3.5 podem utilizar diversas linguagens de programação, entre essas podem ser destacadas o JSON, que deriva para variante JSON-LD na qual se baseia a DTDL, o JavaScript que deriva para o TypeScript que é usado no desenvolvimento de aplicações do *iTwin.js* e o C#, que juntamente com o Python, F#, Java, JavaScript, PowerShell e TypeScript está entre as linguagens suportadas pelas *Azure Functions* (MICROSOFT, 2021h).

3.7.1 JSON E JSON-LD

O JSON (*JavaScript Object Notation*) é um formato de dados leve baseado nos tipos de dados da linguagem de programação JavaScript (PEZOA, 2016; BOURHIS, 2017). Ela serve para transferência de dados entre sistemas, e segundo Pezoa (2016, p. 263, tradução nossa) “é o formato de dados mais popular para enviar pedidos e respostas de APIs”. O mesmo autor destaca que o formato exerce um papel decisivo para as aplicações Web hoje em dia.

O JSON-LD (*JavaScript Object Notation for Linked Data*), por sua vez, é uma linguagem baseada em JSON para serializar dados vinculados (*Linked Data* – dados interconectados a outros, presentes em diferentes plataformas, sites etc.) e adicionar semântica a documentos JSON já existentes (LANTHALER, 2012). A linguagem é projetada para interagir com sistemas que utilizam JSON e possui os objetivos principais de permitir o uso de dados vinculados em ambientes de programação da Web, de construir serviços da Web interoperáveis e armazenar dados vinculados em mecanismos de armazenamento baseado em JSON (W3C, 2014).

3.7.2 JAVASCRIPT E TYPESCRIPT

O *JavaScript* é conhecido como a linguagem de programação do navegador Web, o que a faz ser uma das linguagens mais populares do mundo (CRACKFORD, 2008). Essa consiste numa linguagem de programação leve, interpretada, orientada a objeto com funções de primeira classe, que pode ser utilizada em diferentes contextos, da Web ou não, no “*backend*” e/ou “*frontend*” (MOZILLA, 2021). De acordo com a mesma fonte, o JavaScript geralmente é executado no lado do cliente da Web, o que permite que esse seja usado para definir o comportamento das páginas Web diante da ocorrência de algum evento.

O TypeScript, por sua parte, trata-se de uma linguagem de programação desenvolvida pela *Microsoft*, que segundo a mesma é projetada para aplicações JavaScript na escala de aplicação (2021i). Segundo a mesma fonte, o TypeScript adiciona “tipos” (*types* – anotações atribuídas a entidades da aplicação como funções, variáveis e propriedades que permitem que compiladores e ferramentas de desenvolvedor ofereçam melhores verificações e assistência durante o desenvolvimento da aplicação – JANSEN, 2015) opcionais ao JavaScript que suportam ferramentas para aplicações JavaScript de larga escala para qualquer navegador, host e sistema operacional.

3.7.3 C#

O C# (pronuncia-se “*See Sharp*”) é uma linguagem de programação desenvolvida pela *Microsoft* que é executada no *framework* .NET (*framework* multiplataforma de código aberto desenvolvido pela *Microsoft* para o desenvolvimento e execução de sistemas e aplicações). HEJLSBERG et al. (2008) explicam que a o C# é uma linguagem orientada a objeto e tem suas raízes nas linguagens de programação da família C: C e C++. Por meio do C#, diversos tipos de aplicações podem ser desenvolvidos: para *Web*, para *desktop*, para *mobile*, jogos etc.

4. A UHE DE SERRA DA MESA

A usina hidrelétrica de Serra da Mesa é localizada na Bacia do Alto Tocantins, no Goiás, por volta de 240 km ao norte de Brasília (Figura 4.1), essa consiste numa barragem de regularização, projetada para criação de um reservatório de grande extensão, com uma área inundada de aproximadamente 1784 km², para um nível normal de operação de 460 m, e um volume total de 54,4 bilhões de metros cúbicos.

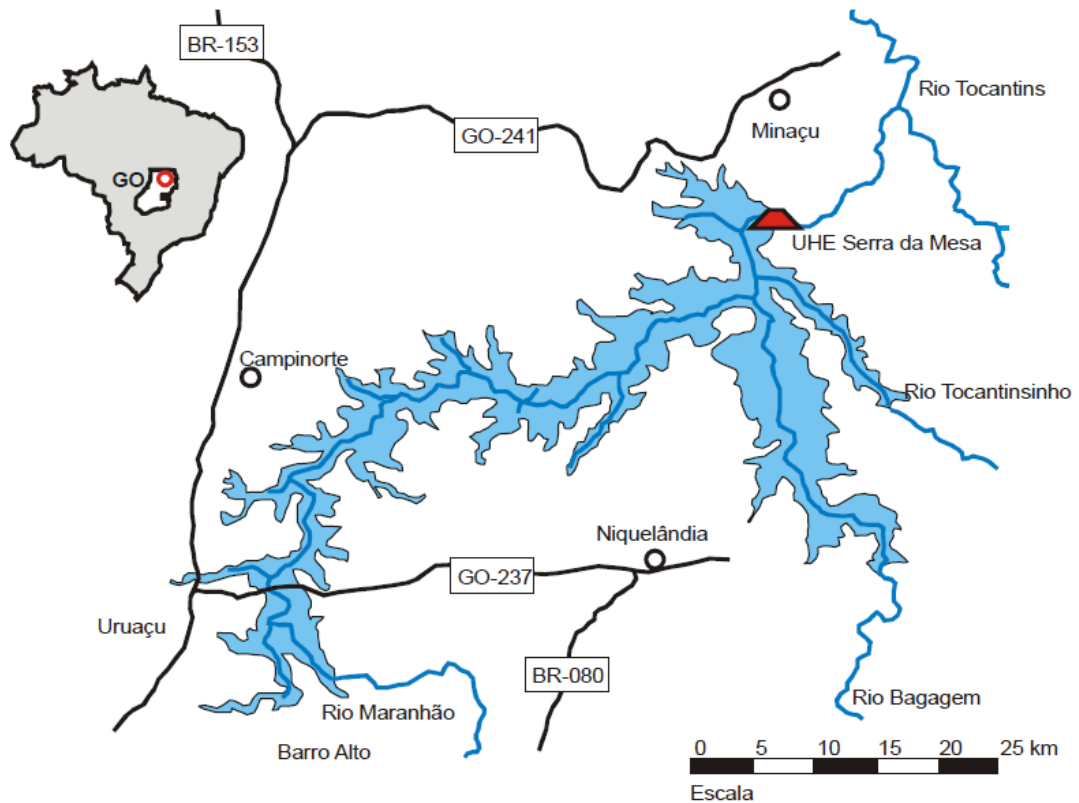


Figura 4.1 - Localização da UHE de Serra da Mesa (Fonte: PEREIRA, 2005)

A barragem de Serra da Mesa possui uma seção mista de enrocamento com núcleo de argila, com altura máxima de 154 m e volume total de pouco mais de 12 milhões de metros cúbicos (12.057.558 m³). O barramento se caracteriza por possuir um arranjo em vale encaixado, com tomada d'água e casa de força subterrâneas, além de vertedouros em superfície, com cinco comportas do tipo segmento e capacidade de descarga total de 15 mil m³/s. As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram o arranjo geral da UHE e a sua seção típica, respectivamente.

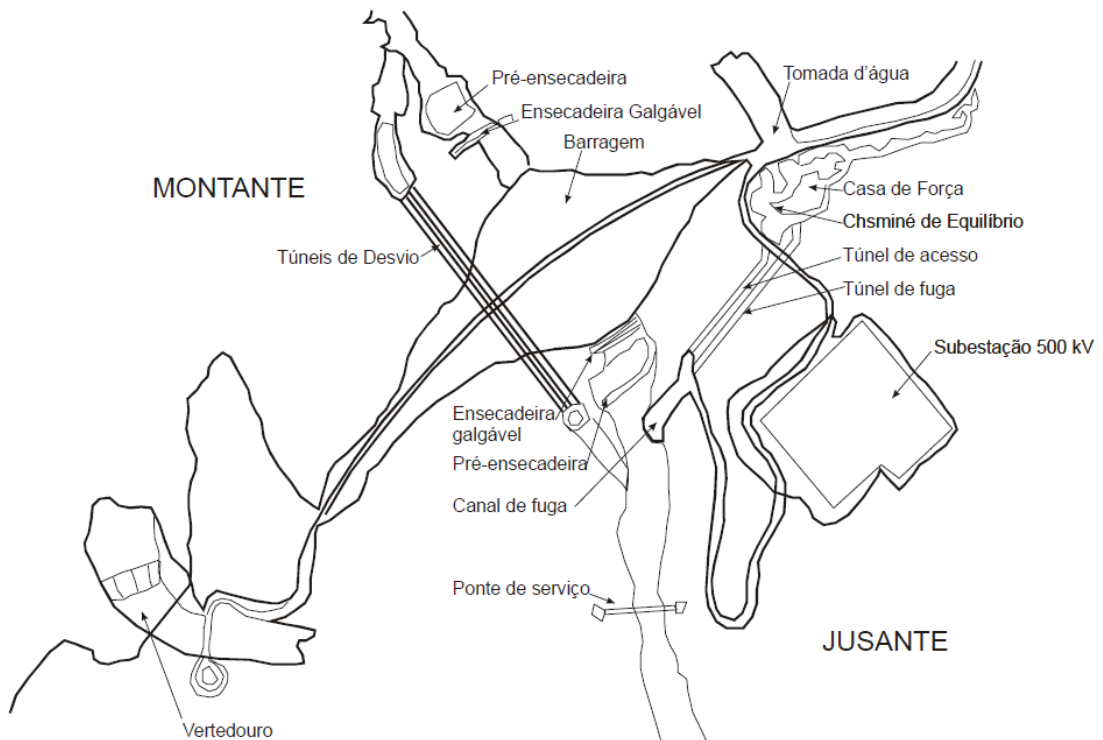


Figura 4.2 - Arranjo geral da UHE de Serra da Mesa (Fonte: PEREIRA, 2005)

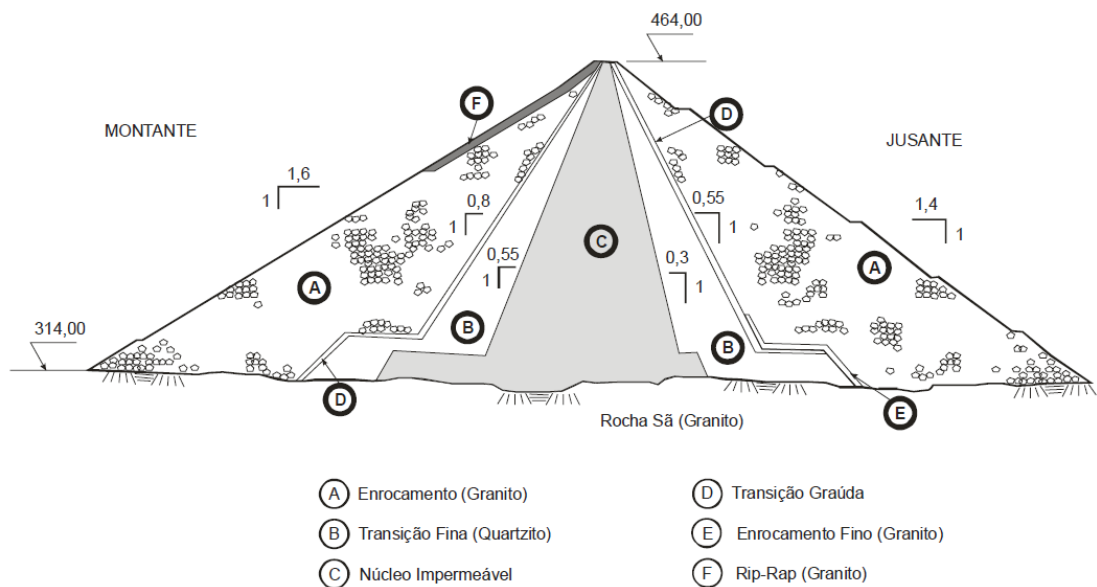


Figura 4.3 - Seção típica da barragem de Serra da Mesa (Fonte: PEREIRA, 2005)

A instrumentação do corpo da barragem é composta por piezômetros pneumáticos, placas magnéticas, inclinômetros, caixas suecas e células de pressão total (Figura 4.4), fornecendo dados que são conjuntamente analisados com informações do reservatório, fundações e estruturas auxiliares, compondo um agregado de elementos que garantem a segurança do empreendimento.

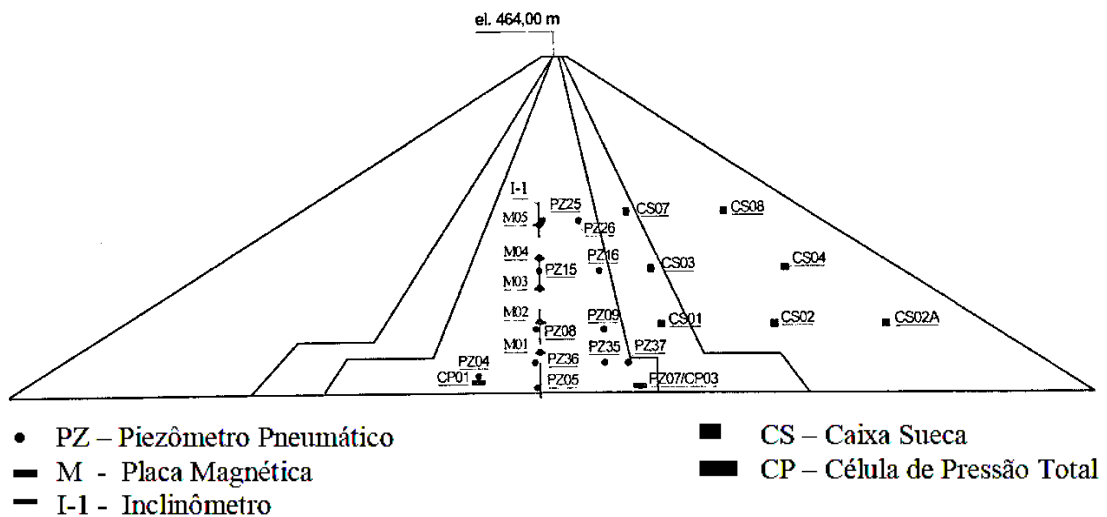


Figura 4.4 - Instrumentação do maciço da barragem de Serra da Mesa (Fonte: SANTOS, 2019)

A potência instalada (capacidade de geração máxima) da UHE de Serra da Mesa é de 1275 MW (quando acionadas as suas três unidades geradoras), alta capacidade de geração essa que a confere papel decisivo no atendimento do mercado de energia elétrica do país. A grande importância desse empreendimento no cenário nacional foi uma das principais motivadoras para o seu uso neste estudo. Além disso, essa característica contribui para que a sua barragem seja amplamente estudada, tornando disponível uma grande quantidade de informações que podem ser utilizadas no desenvolvimento do estudo.

5. METODOLOGIA

5.1 FLUXOGRAMA PARA AQUISIÇÃO E INTEGRAÇÃO DOS DADOS DO GD DE UMA BARRAGEM

A definição do fluxograma de processos para aquisição e integração dos dados do GD de uma barragem foi feita a partir do estudo do processo de instrumentação de barragens e das camadas necessárias para conexão de dados brutos ao gêmeo digital. Além do material sobre gêmeos digitais, instrumentação de barramentos e afins, os documentos da ANA referenciados neste trabalho foram fundamentais para o desenvolvimento do produto (2016a, 2016b e 2020).

Nesta etapa, o caráter recente da tecnologia, principalmente na aplicação a barragens, foi evidenciado pela ausência de trabalhos que descrevessem em detalhe os procedimentos necessários para coleta e integração de dados do gêmeo digital de um barramento, assim como pesquisas que relacionassem barragens e gêmeos digitais no geral. Essas características destacam a relevância do fluxograma proposto e da discussão realizada ao longo desta monografia, além de salientar a necessidade da realização de trabalhos futuros correlatos.

5.2 GÊMEOS DIGITAIS DA UHE DE SERRA DA MESA

5.2.1 ITWIN

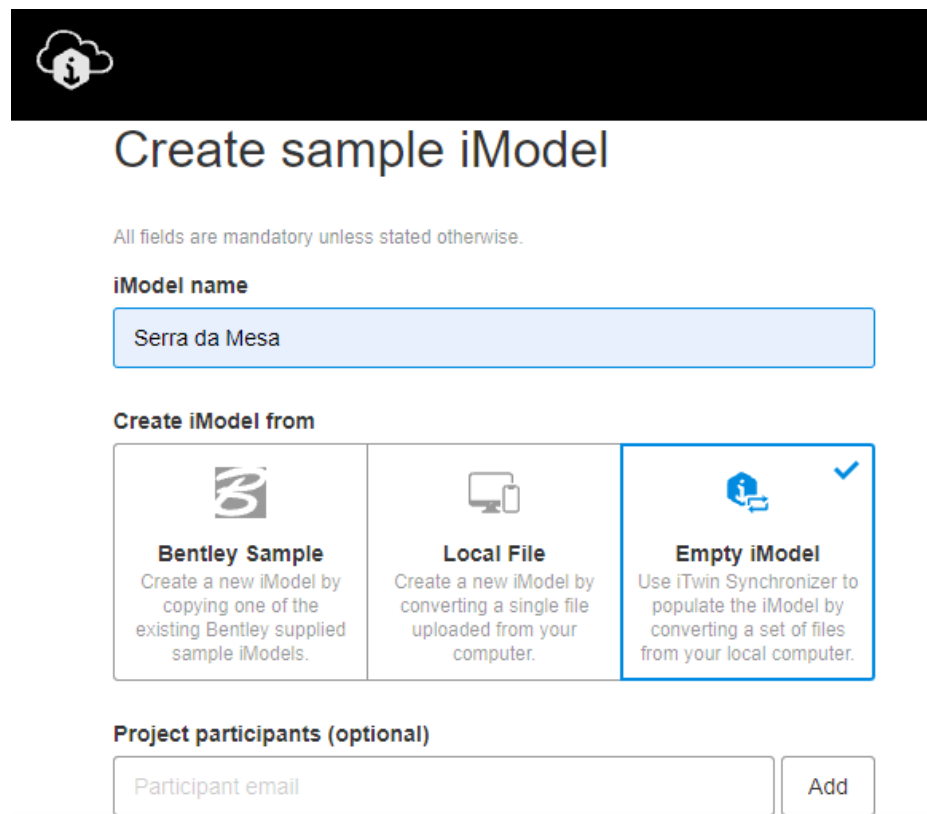
Para o desenvolvimento do gêmeo digital na plataforma *iTwin*, o primeiro passo foi a modelagem 3D do barramento da UHE de Serra da Mesa, diversas ferramentas de modelagem foram usadas, procurando-se simular as diversas possibilidades para criação do modelo 3D de um gêmeo digital e a capacidade da plataforma de suportar arquivos de diferentes fontes.

Num primeiro momento, o *Google Earth Pro* foi utilizado para captar os pontos de elevação da região da barragem, o que foi possível convertendo o caminho criado no *Google Earth Pro*, por meio do site *GPS Visualizer* (2021), para um formato de texto simples. Em seguida, o software QGIS foi empregado para criação das curvas de nível do terreno, para isso os pontos definidos pelo texto puro criado no *GPS Visualizer* foram importados para o QGIS, um sistema de referência de coordenadas foi definido e sucessivamente foi criada uma representação da superfície 3D do terreno e extraídos os contornos da mesma para definição das curvas de nível.

As curvas de nível criadas foram então exportadas para o *Civil 3D*, para em seguida uma superfície a partir dessas ser definida e a modelagem da barragem poder prosseguir então

de uma forma simplificada por meio da ferramenta “*Grading*”. Por fim, o modelo criado foi exportado para o *MicroStation*, onde a representação da barragem foi georreferenciada.

O passo seguinte no processo de criação do gêmeo digital na plataforma *iTwin* foi a criação do *iModel* na plataforma, por meio do site da *Bentley* (2021c) uma amostra foi criada, selecionando-se a opção de um modelo vazio, para que a ferramenta *iTwin Synchronizer* pudesse ser utilizada para continuamente modificar o *iModel* (Figura 5.1).






Create sample iModel

All fields are mandatory unless stated otherwise.

iModel name

Serra da Mesa

Create iModel from

 Bentley Sample Create a new iModel by copying one of the existing Bentley supplied sample iModels.	 Local File Create a new iModel by converting a single file uploaded from your computer.	 Empty iModel ✓ Use iTwin Synchronizer to populate the iModel by converting a set of files from your local computer.
--	---	---

Project participants (optional)

Participant email

Figura 5.1 - Criação do iModel

O próximo passo foi a sincronização do modelo tridimensional da barragem para o *iModel*, contido no *iModelHub*, para tal uma conexão foi criada no *iTwin Synchronizer* e o arquivo mapeado ao *iModel* anteriormente criado (Figura 5.2).

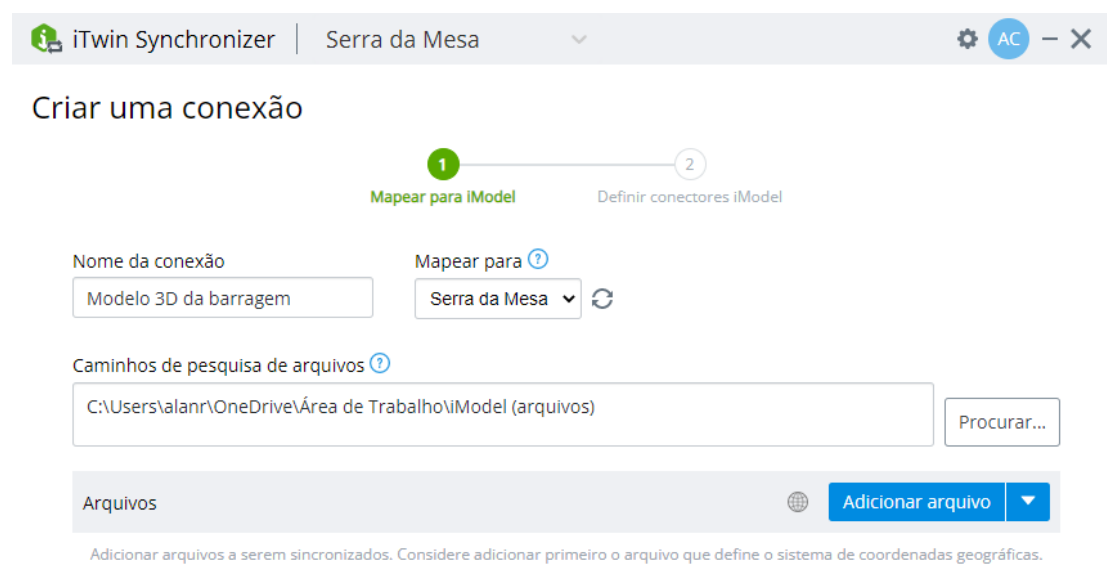


Figura 5.2 - Sincronização do modelo 3D da barragem para o *iModel*

Após a sincronização do modelo, o *iModel* pôde ser visualizado no *iModelHub* no visualizador padrão da plataforma.

Vale destacar ainda que nesta fase o modelo tridimensional criado não representou perfeitamente as feições do barramento, como seria ideal para um gêmeo digital. Dessa forma, várias ferramentas foram utilizadas para uma representação aproximada do ativo, tendo em vista a indisponibilidade de informações mais detalhadas do empreendimento, dificuldades na construção do modelo de uma estrutura altamente complexa e o fato dessa característica não ter sido o foco desta etapa.

5.2.2 AZURE

Para a criação do gêmeo digital na plataforma *Azure*, adotou-se como primeiro passo a escrita de um arquivo em DTDL para definição do gêmeo digital. Ambos os arquivos utilizados estão dispostos nos apêndices A1 e A2 e representam, respectivamente, os modelos definidos e seus relacionamentos possíveis.

Cinco interfaces, definidoras de gêmeos digitais, foram criadas - uma representando toda a UHE, chamada de Serra da Mesa, e as outras quatro representando os seus elementos: corpo da barragem, vertedouro, reservatório e casa de força. Para cada modelo, foram definidos diferentes elementos simulando os possíveis dispositivos/instrumentos a serem monitorados, sendo no caso do corpo da barragem representados os instrumentos apresentados na Figura 4.4.

Em seguida, os recursos na plataforma *Azure* foram criados, sendo num primeiro momento criada uma instância do *Azure Digital Twins* e configurado o seu acesso, logo

depois por meio do *Azure Digital Twins Explorer* foi estabelecida uma conexão com a instância do *Azure Digital Twins* recém criada, sendo possível a definição dos gêmeos digitais a partir do *upload* dos arquivos DTDL escritos. Vale destacar que a maior parte dos procedimentos de escrita de códigos e compilação dos mesmos foi feita por meio do *Visual Studio* e *Visual Studio Code*, ambientes de desenvolvimento integrados desenvolvidos pela *Microsoft*.

Posteriormente, foram criados um *IoT Hub* e os seus dispositivos, os quais representam os gêmeos digitais definidos na instância do *Azure Digital Twins*. O procedimento foi então seguido pela definição do ambiente do *Azure Time Series Insights* e a sua conexão com o *IoT Hub* recém criado.

Por fim, conforme apresentado no apêndice A3, foi desenvolvido um código, adaptado da amostra da *Azure* (2021c), em *JavaScript* simulando o envio de dados de telemetria de todos os gêmeos digitais ao *IoT Hub*, dados esses que por meio do *TSI Explorer* no *Azure Time Series Insights* foram visualizados e analisados.

Salienta-se ainda que mais um programa em *JavaScript* foi escrito para o envio de dados históricos reais dos níveis de reservatório de Serra da Mesa dos últimos meses (de setembro a outubro de 2021), provenientes do ONS, acessados por meio da ANA (2021), sendo esses também explorados no *TSI Explorer* e em seguida, a partir da própria ferramenta, graças a função de integração oferecida pela mesma, conectados ao *Power BI* a fim de ser possível uma melhor visualização e análise desses dados.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 FLUXOGRAMA PARA AQUISIÇÃO E INTEGRAÇÃO DOS DADOS DO GD DE UMA BARRAGEM

A elaboração do fluxograma partiu da observação que durante a fase de planejamento de instrumentação, diversas grandezas podem ser definidas para serem aferidas, essas, embora essenciais para que a segurança do empreendimento seja atestada, podem estar disponíveis em diferentes níveis e com distintas formas de acesso a depender de um conjunto de características da estrutura da barragem e do empreendimento como um todo.

Verificou-se, portanto, que o acesso e a qualidade das informações coletadas disponíveis tornam imprescindível um estudo da viabilidade de implementação de um GD, junto a produção do plano de sua elaboração, sendo possível, caso a barragem se encontre em etapa de projeto, que o Plano de Monitoramento e Instrumentação seja pensado de forma a proporcionar uma ampla quantidade de dados relevantes para simulação da maior quantidade possível de aspectos da barragem, com aquisição automática de registros de medidas sempre que viável técnica e economicamente.

O estudo de viabilidade e o planejamento da implementação de um gêmeo digital são impactados significativamente pela forma que os dados monitorados na barragem serão coletados. Diversos autores (GLAESSGEN e STARGEL, 2012; GRIEVES, 2015; TAO et al., 2017) ressaltam que uma das principais características de um GD é a sua capacidade de integração e reflexão em tempo real do estado do objeto físico, nesse contexto, a automatização da auscultação de uma barragem é essencial para a produção do seu gêmeo digital. No entanto, frente a custos de implantação restritivos, adaptações que considerem os valores envolvidos devem ser feitas, modificando processos de implementação e manutenção a fim de permitir o beneficiamento do maior número possível de empreendimentos com as vantagens oferecidas pela tecnologia.

Em suma, diversas características da barragem devem ser consideradas na elaboração do plano de implementação de um GD: custos, DPA, tipo e dimensões da estrutura etc., podendo esse projeto passar por coletas manuais, automatizadas ou mistas de dados a depender das características citadas. Além disso, as etapas de transmissão dos dados devem ser pensadas, bem como os procedimentos subsequentes a essas.

Baseado no disposto, portanto, foi elaborado o fluxograma para aquisição e integração dos dados do GD de uma barragem, o qual é apresentado na Figura 6.1.

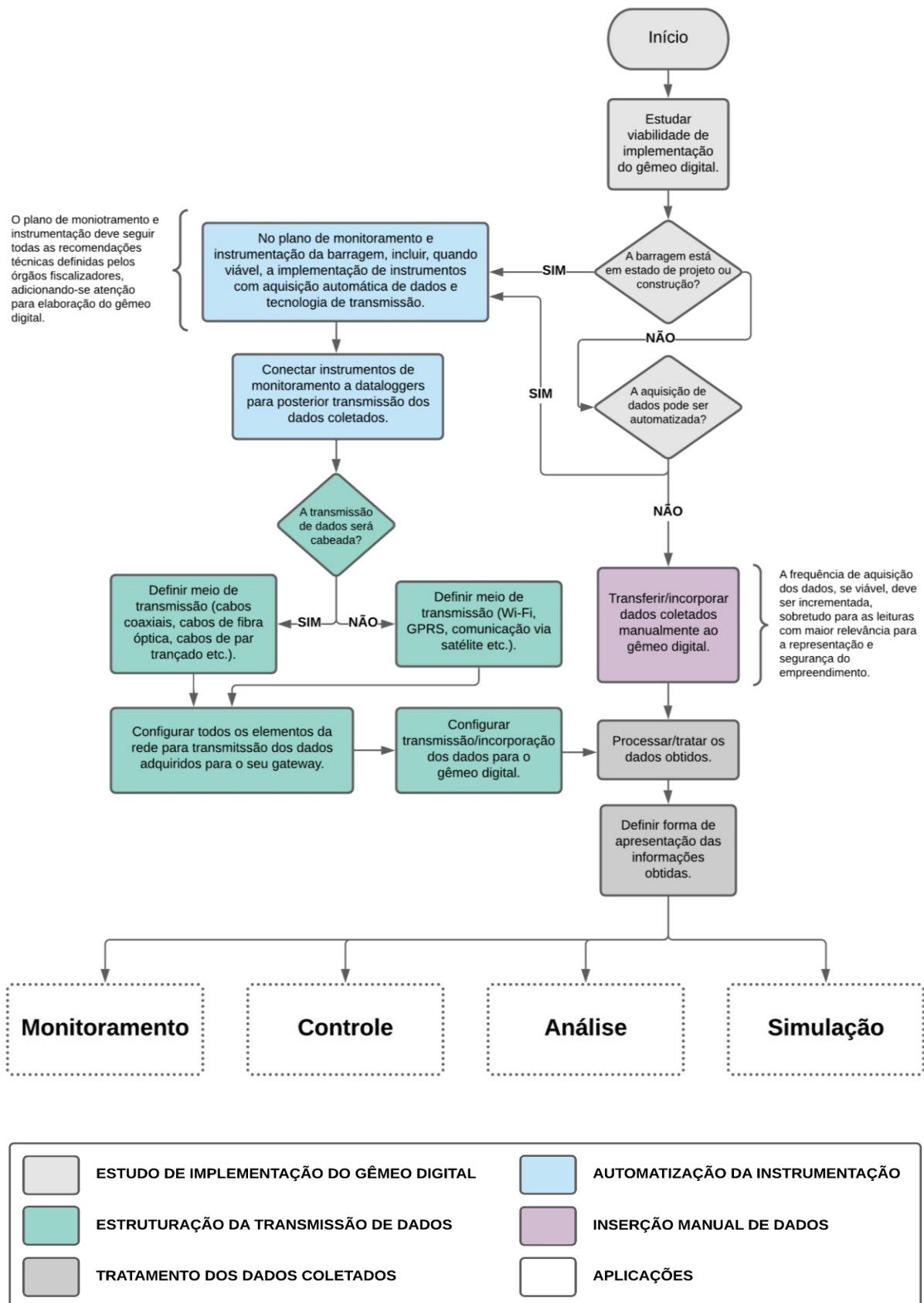


Figura 6.1 - Fluxograma para aquisição e integração dos dados do gêmeo digital de uma barragem

Conforme ilustrado pelo fluxograma proposto, definida a viabilidade de implementação do GD, a depender do estado em que se encontra a barragem, diferentes abordagens devem ser adotadas. Em casos em que a barragem já está construída e a aquisição de dados não pode ser automatizada, as leituras coletadas manualmente podem ser incorporadas diretamente ao gêmeo digital. Nesse sentido, uma aplicação intermediária de *desktop* baseada em C# ou *JavaScript*, por exemplo, pode ser projetada para permitir que o usuário digite e envie os dados coletados à nuvem IoT, a qual pode ser por exemplo o *Azure IoT Hub*.

Por outro lado, quando possível uma aquisição automatizada de dados, a implementação de equipamentos que permitem essa coleta deverá ser prevista dentro do Plano de Monitoramento e Instrumentação da barragem, de forma a levar em conta a etapa em que se encontra o empreendimento (projeto, construção, operação ou descomissionamento). Atualmente, existem no mercado várias opções de instrumentos com aquisição automatizada de dados, piezômetros de corda vibrante, limnígrafos, termômetros, pluviógrafos, inclinômetros e extensômetros são alguns exemplos.

De maneira geral, a automatização da coleta de dados passa pelos instrumentos descritos conectados a *data loggers*, equipamentos eletrônicos capazes de receber, converter, armazenar e transmitir as leituras de forma automática em intervalos configuráveis (SILVA, 2019), sendo, segundo Cerqueira et al. (2015), os principais componentes de uma estação de campo para a coleta de dados automatizada de um piezômetro de corda vibrante, por exemplo.

A transmissão de dados a partir dos *data loggers* pode proceder por diferentes protocolos de comunicação na camada física, com ou sem fio, com ambas as soluções oferecendo diversas possibilidades, cabos de fibra óptica e coaxiais são exemplos de alternativas cabeadas, ao passo que tecnologias de curto e longo alcance podem ser viáveis para transmissão sem fio (*Bluetooth*, *NFC*, ondas de rádio etc.) (ZHENG et al., 2018; QINGLIN QI et al., 2019; TAO et al., 2019). Independentemente do meio de transmissão escolhido, que varia de efetividade a depender das características requeridas para a solução (SARAWI et al., 2017), será necessário definir e configurar os elementos da rede estabelecida, por exemplo, implementando protocolos de comunicação em diferentes camadas, módulos de transmissão, codificação e modulação de canais, equipamentos de comunicação intermediários, métodos de acesso, *firewalls* etc. (QINGLIN QI et al., 2019; SILVA, 2019).

Após serem transmitidos pelos *data loggers*, os dados coletados pelos diversos instrumentos de campo devem chegar ao *gateway* de rede, dispositivo responsável pela conexão entre redes de diferentes tipos, dotado de uma combinação complexa de funções que

possibilitam a convergência das leituras e transmissão das mesmas (SILVA, 2019). A Figura 6.2 ilustra uma visão geral da arquitetura de um sistema de monitoramento automatizado sem fio de uma barragem de rejeitos em que as funções de *data loggers* e *gateways* de rede são sintetizadas.

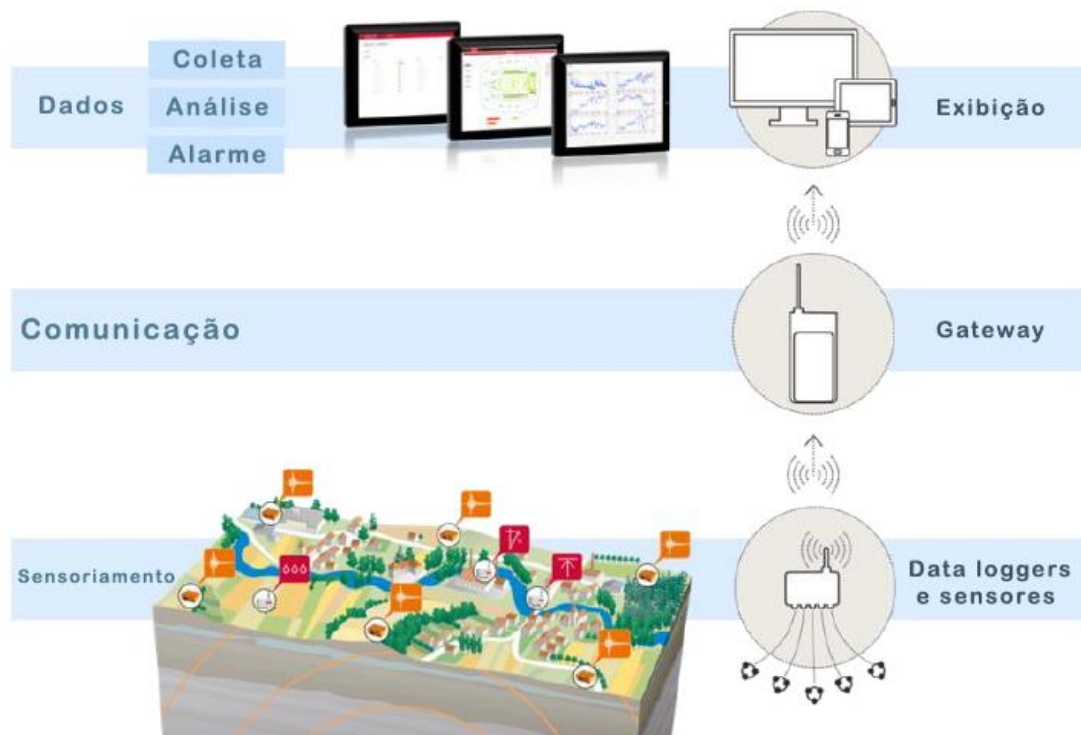


Figura 6.2 - Visão geral da arquitetura de um sistema de monitoramento automatizado sem fio (Fonte: Adaptada de ABANCÓ et al., 2016)

Após serem enviados para o *gateway* de rede, ou para os *gateways* de rede, se for o caso, os dados obtidos devem ser transmitidos e incorporados ao gêmeo digital. Diversos autores (GRIEVES, 2015; SCHLUSE e ROSSMANN, 2016; SCHLEICH et al., 2017; HAAG e ANDERL, 2018; ZHENG et al., 2018; QINGLIN Qi et al., 2019; TAO et al., 2019) destacam que o processo de fusão dos dados com o gêmeo digital deve acontecer em diferentes níveis, de forma que tanto os dados brutos, quanto as funcionalidades e decisões sejam integrados com o produto virtual. Desse modo, num cenário ideal, todas as partes de uma barragem fazem parte do seu gêmeo digital e vice-versa. Nesse sentido, elementos como comportas e equipamentos da casa de força podem fazer parte do GD e ter todas as suas funções e estados integrados com o mesmo. A linguagem de programação C#, por exemplo, fornece diversas bibliotecas que permitem a conexão de diferentes tipos de sensores ao *IoT Hub*, permitindo que esses alimentem em tempo real, naturalmente com uma certa latência, e continuamente um gêmeo digital da *Azure* ou de outras plataformas.

Vale destacar que vários métodos podem ser utilizados para aprimorar a fusão dos dados nos vários níveis nos quais ela deve acontecer, inferência bayesiana, redes neurais, filtro de Kalman e máquina de vetores de suportes são alguns exemplos desses (LI et al., 2017; ZHENG et al., 2018; WANG et al., 2018; QINGLIN QI et al., 2019).

Para incorporação de dados ao gêmeo digital, além das plataformas e ferramentas citadas, segundo Qinglin Qi et al. (2019), existem muitas outras possibilidades disponíveis no mercado, o *MATLAB*, o *SPSS* e o *Pycharm* são elencados como alguns exemplos. Ademais, outras empresas, como a IBM e a Oracle já comercializam *softwares* ou extensões com essas funcionalidades.

Em seguida, os dados incorporados ao GD devem ser tratados, essa etapa consiste na eliminação de dados desnecessários (dados inconsistentes, redundantes, incompletos, irrelevantes etc.) do volume inicial coletado, além disso, tecnologias de compressão, transformação, limpeza, entre outras, podem ser empregadas para manter apenas os dados úteis no conjunto (ZHENG et al., 2018; QINGLIN QI et al., 2019; TAO et al., 2019). Os mesmos autores destacam que após o tratamento, os dados devem ser analisados por meio de diferentes métodos, entre esses estão os métodos estatísticos, tais como análises de correlação, regressões lineares e não-lineares, estatística descritiva etc., e os métodos de redes neurais, como, por exemplo, o Modelo de Hopfield e a Máquina de Aprendizado Extremo. Nesse sentido, ferramentas como a *Azure Databricks* e *Azure Time Series Insights*, juntamente aos diversos serviços associados a essas, podem ser úteis.

É importante destacar que a análise dos dados deve ser feita de forma a propiciar informações relevantes para a precisa representação do estado atual da barragem, tal como para a sua operação de forma segura e eficiente, nesse sentido regressões que associem várias temperaturas dos arredores da barragem e da água do seu reservatório com o estresse térmico no corpo da mesma, por exemplo, podem ser válidas, o mesmo serve para curvas de vazões de percolação versus poropressões, para correlações da quimicidade da água com o desgaste da face de concreto, para utilização de redes neurais artificiais na previsão de vazões, para curvas de tensão versus deformação, marcação de dados alarmantes etc.

Ressalta-se, além disso, que a análise dos dados coletados, de qualquer forma, é fundamental para a eficiência da gestão da barragem de um modo geral, mesmo assim, é muitas vezes negligenciada no cotidiano desse tipo de empreendimento, já que demanda um corpo técnico qualificado e às vezes oneroso (AMBIENTEBRASIL, 2021). A realização dessa etapa de forma automatizada, portanto, significa um avanço significativo, tanto no ponto de vista técnico, como no econômico.

Por fim, a forma de apresentação do gêmeo digital deve ser definida, a visualização de todo o processamento de dados e funcionalidades feitos nas etapas anteriores é parte essencial para o aproveitamento dos benefícios oferecidos pela tecnologia. Schroeder et al. (2016), Boschert e Rosen (2016), Qinglin Qi et al. (2019) e Tao et al. (2019) salientam que os resultados apresentados devem ser diretos, intuitivos e interativos, fornecendo diferentes informações úteis ao usuário na forma de gráficos, planilhas, imagens e afins que condensem todas as aplicações de um GD. A integração das plataformas *iTwin* e *Azure*, por meio de suas nuvens e da DTDL, por exemplo, pode ser uma boa solução nesse caso, por meio das quais uma apresentação robusta e dinâmica pode ser criada.

Além disso, tecnologias diversas de visualização podem ser empregadas nessa fase, destacando-se entre essas a RV, a RA e a Realidade Mista (RM). Vários autores (SHIN e DUSTON, 2008; DONG e KAMAT, 2013; RANKOHI e WAUGH, 2013), por exemplo, destacam as vantagens significativas oferecidas pela RA em visualização e simulação em diversas indústrias e tipos de tarefas, enfatizando ainda os diversos benefícios relacionados à interação do usuário com o objeto físico e virtual. Ademais, Shin e Duston (2008) apontam as similaridades entre o RA, o RV e a RM, permitindo o entendimento de que muitas das vantagens oferecidas pela realidade aumentada podem se estender para a Realidade Virtual e Mista. Vale salientar que tais tecnologias ganham ainda mais importância quando consideradas as dimensões de uma barragem e as dificuldades de acesso normalmente existentes ao longo da mesma, o que acaba por incrementar mais ainda os benefícios associados ao uso dessas tecnologias de visualização.

6.2 GÊMEOS DIGITAIS DA UHE DE SERRA DA MESA

6.2.1 ITWIN

As Figuras 6.3 a 6.7 a seguir ilustram o modelo do gêmeo digital construído na plataforma *iTwin*, mais especificamente a exploração do *iModel* na ferramenta.

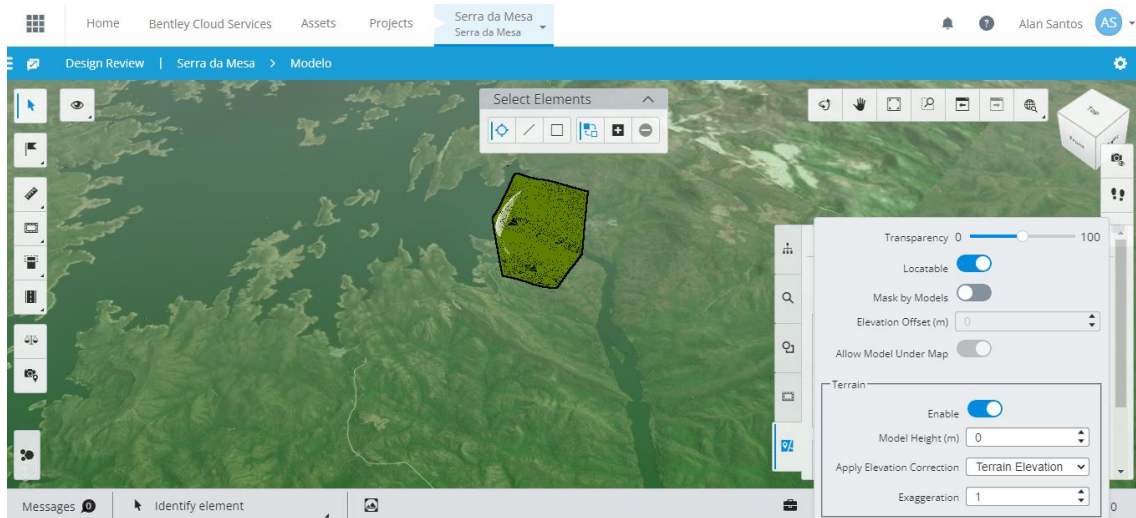


Figura 6.3 - Visualização do iModel - iTwin (1)

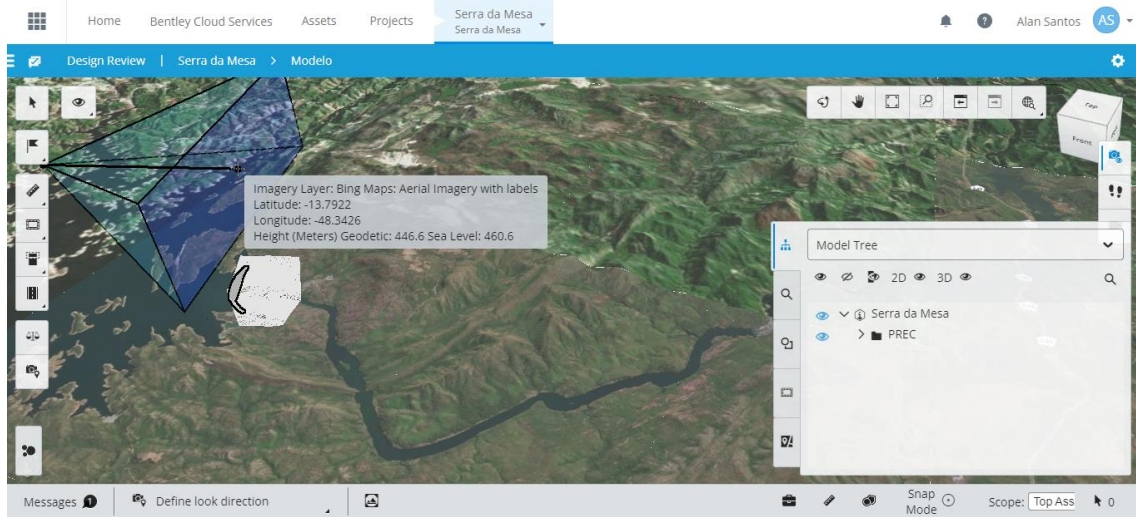


Figura 6.4 - Visualização do iModel - iTwin (2)

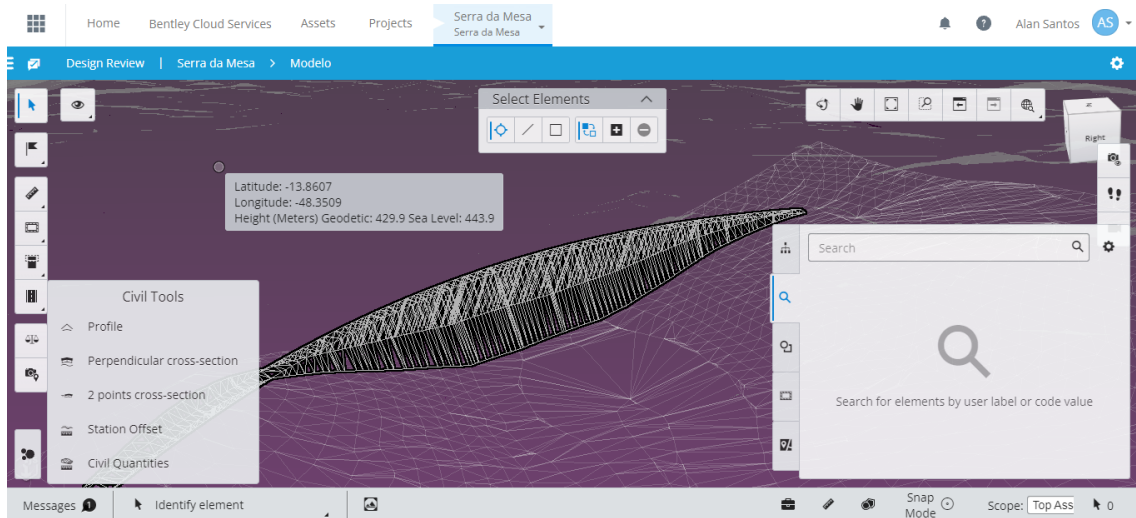


Figura 6.5 - Visualização do iModel - iTwin (3)

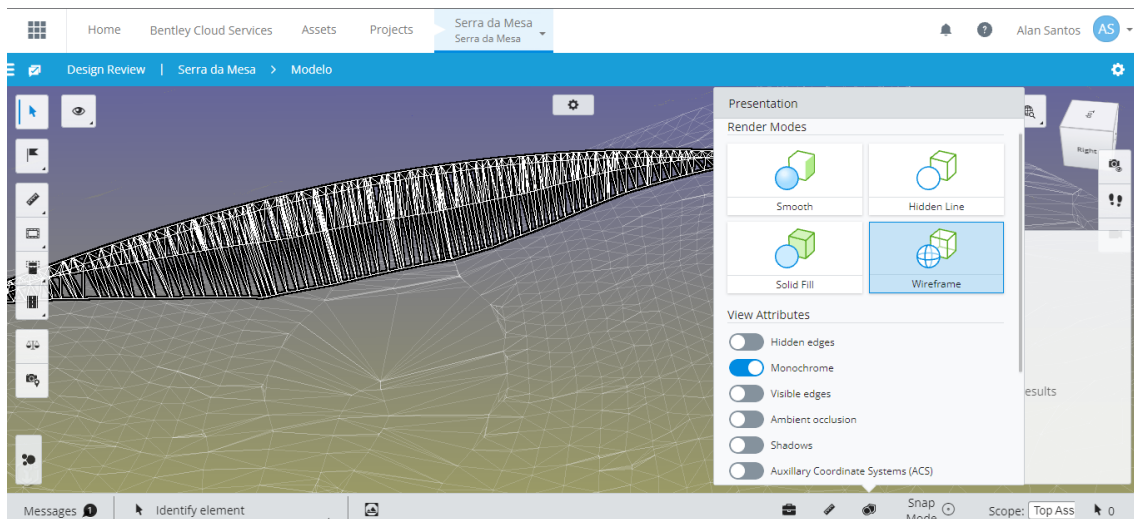


Figura 6.6 - Visualização do iModel - iTwin (4)

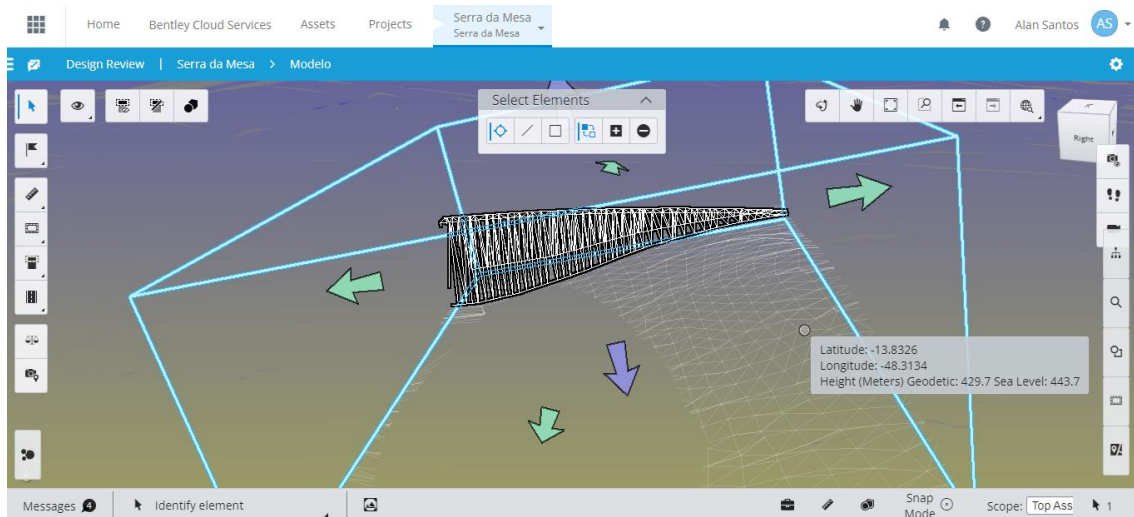


Figura 6.7 - Visualização do iModel - iTwin (5)

Nesta etapa, principalmente a faceta visual do gêmeo digital foi explorada, sendo o processo apresentado demonstrativo dos passos para a modelagem de um GD e sua incorporação à plataforma. Vale destacar que uma alternativa ao uso do visualizador padrão do *iModelHub* seria a modificação de um visualizador exemplo disponibilizado no repositório da *iModel.js* (2021), no qual os arquivos são escritos majoritariamente em *TypeScript* e *JSON*, e podem ser alterados para acomodar as funcionalidades requisitadas pelo desenvolvedor, além de eventualmente permitir a integração com outras plataformas e serviços, como os da *Azure*, por meio da *DTDL*.

É importante notar que o visualizador padrão da plataforma oferece diversas funcionalidades, como a integração com *softwares* de modelagem de infraestruturas e geolocalização, além disso, possibilita a modificação contínua do *iModel* definido. Além disso, um outro fator destacável tem relação com a possibilidade de desagregação do *iModel*,

o que permite uma análise mais robusta do ativo, especialmente preponderante no contexto de *softwares* embebidos no processo BIM, que podem representar mais fielmente o ativo e resultar em um gêmeo digital do mesmo mais fidedigno.

Finalmente, salienta-se que as diversas funções de visualização oferecidas pela plataforma devem ser pensadas não individualmente, caso em que se trataria apenas de funcionalidades comuns de *softwares* de modelagem, mas sim num contexto de alimentação e representação em tempo real de dados de instrumentação e funcionalidades associadas conforme possibilitado pela plataforma.

6.2.2 AZURE

Inicialmente é ilustrado na Figura 6.8 o gráfico do todo do gêmeo digital definido no ambiente do *Azure Digital Twins Explorer*, responsável, conforme anteriormente destacado, por permitir a conexão com a instância do *Azure Digital Twins*.

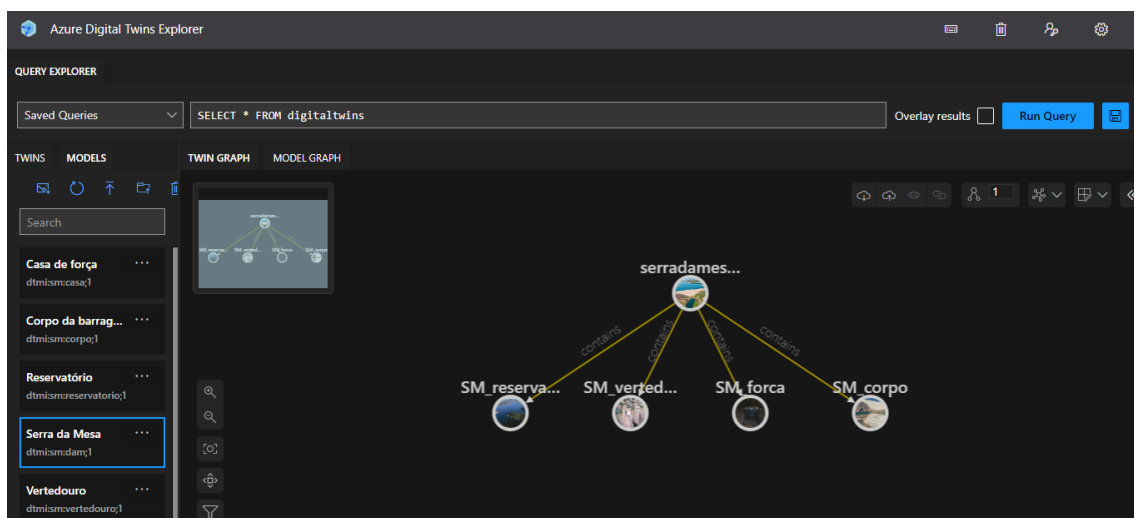


Figura 6.8 - Gráfico do gêmeo digital no Azure Digital Twins Explorer

Prosseguindo com os procedimentos, após a simulação da telemetria do GD, os dados enviados ao *IoT Hub* são conectados ao *Azure Time Series Insights*, de forma a ser possível em seguida a visualização dos mesmos no *TSI Explorer*. A Figura 6.9 ilustra uma dessas visualizações, em que os dados das placas magnéticas presentes no corpo da barragem são dispostos na forma de uma série temporal.

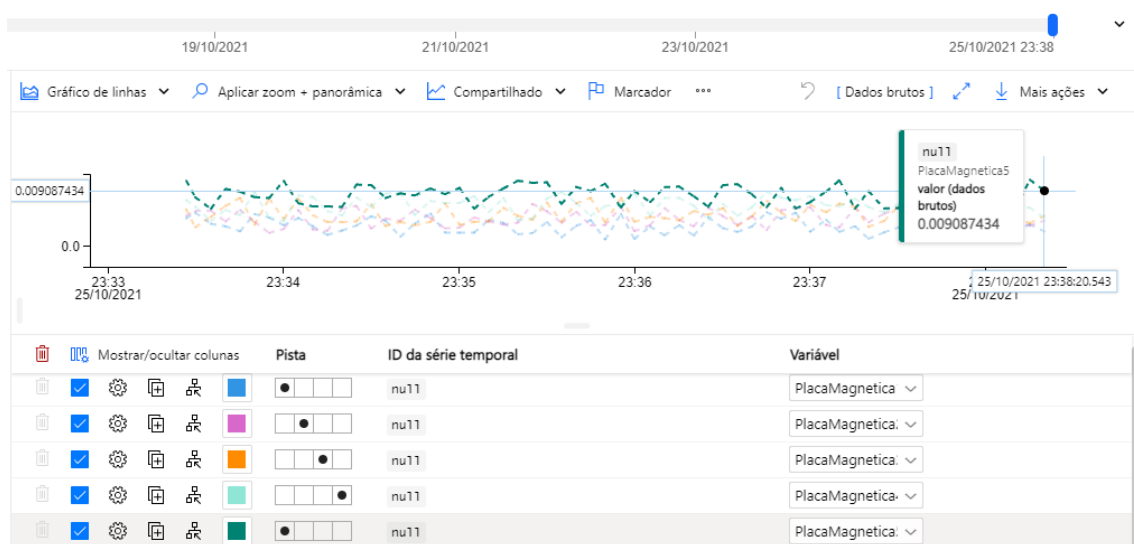


Figura 6.9 - Visualização da telemetria por meio do TSI Explorer (1)

Nessa análise, os dados de telemetria foram incorporados ao *Azure Time Series Insights* com uma certa latência, na forma de série histórica, isso porque a alimentação em tempo real da ferramenta acarretava em custos adicionais. De qualquer forma, vale salientar a simplicidade e usabilidade da aplicação, de maneira que análises e visualizações úteis podem ser obtidas rapidamente e em poucos passos.

As Figuras 6.10 e 6.11 destacam a placa magnética 2, com sua telemetria disposta na forma de gráfico de linha e mapa de calor, respectivamente. Em seguida, na Figura 6.12, uma visão dos dados brutos no formato de tabela é apresentada.

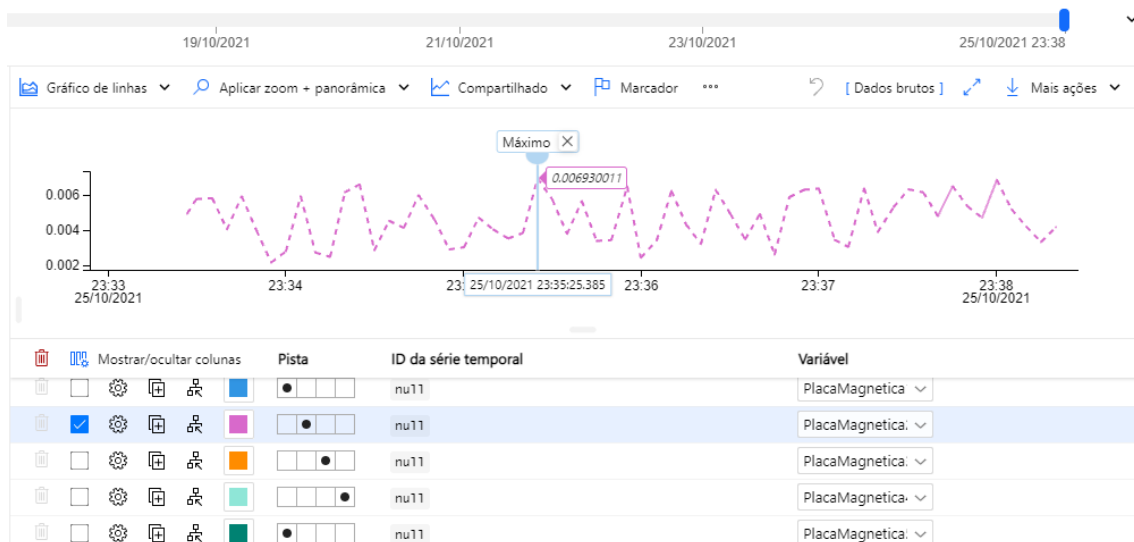


Figura 6.10 - Visualização da telemetria por meio do TSI Explorer (2)



Figura 6.11 - Visualização da telemetria por meio do *TSI Explorer* (3)

	timestamp (UTC-03:00) Local - America/Sao Paulo	PlacaMagnetica1	PlacaMagnetica2	PlacaMagnetica3	PlacaMag
<input type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:26.688				
<input type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:26.688				
<input type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:26.698	0.004543031063247629	0.004926376808765368	0.006031633336900276	0.007534
<input checked="" type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:26.954				
<input checked="" type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:30.122	0.005485015154464271	0.005752423873846381	0.0030623179379815776	0.006478
<input checked="" type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:30.151				
<input checked="" type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:30.151				
<input checked="" type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:30.261				
<input type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:35.089				
<input type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:35.153	0.003641724138946392	0.005802439359696142	0.004770867778158837	0.004114
<input type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:35.214				
<input type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:35.214				
<input type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:40.153				
<input type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:40.153				
<input type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:40.200	0.0032426175083782975	0.004028559588759912	0.00658347215332799	0.005920
<input type="checkbox"/>	10/25/2021 23:33:40.278				

Figura 6.12 - Visualização da telemetria por meio do *TSI Explorer* (4)

Ainda em relação ao *TSI Explorer*, na Figura 6.13, uma visão de uma análise simples dos dados dos piezômetros 1 e 12 num determinado período de tempo pode ser vista. É importante apontar que no ambiente da *Azure Time Series Insights* métricas e alarmes podem ser definidos para reagir de acordo com certas condições cumpridas pelos dados transmitidos, com essa funcionalidade, eventos críticos ou alarmantes que viessem a ocorrer em uma barragem poderiam ser rapidamente identificados.

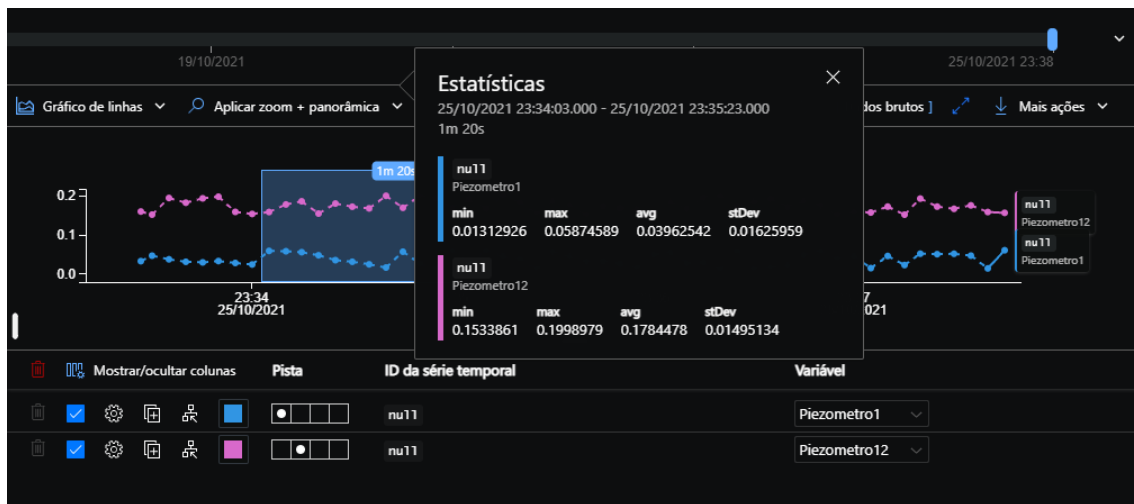


Figura 6.13 - Visualização da telemetria por meio do TSI Explorer (5)

Continuando as explorações das ferramentas da *Azure*, num segundo momento dados históricos reais do reservatório de Serra da Mesa foram incorporados ao *IoT Hub* por meio de uma aplicação em *JavaScript*, sendo esses em seguida, por motivos práticos, transmitidos em um intervalo de tempo irreal de 10000 milissegundos, correspondendo medições de 21 de setembro de 2021 a 19 de outubro de 2021. A Figura 6.14 ilustra a telemetria transmitida, que indica queda do nível do reservatório no período.

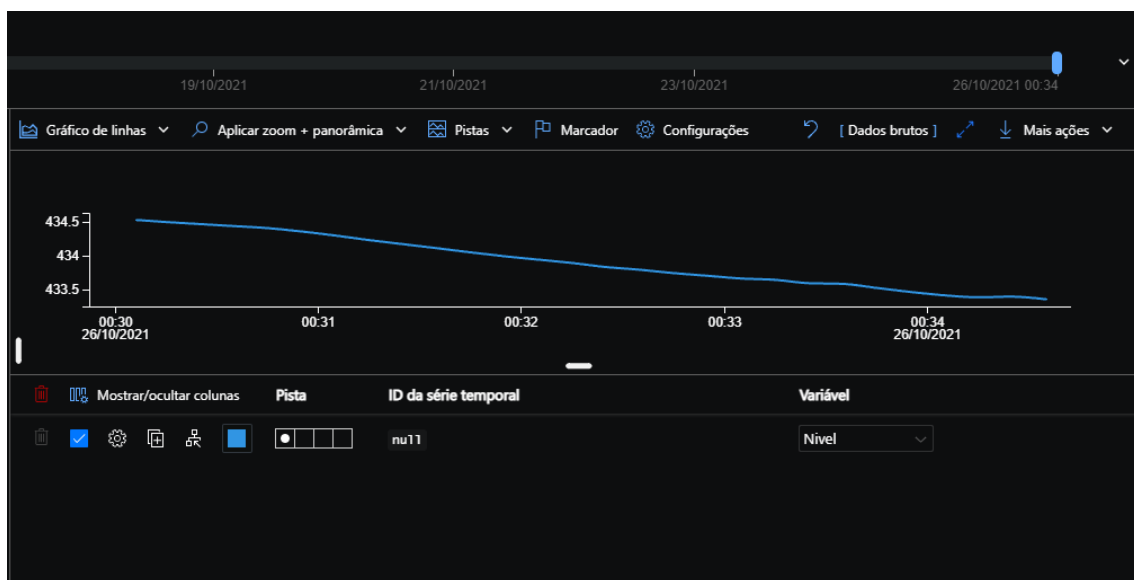


Figura 6.14 - Visualização da telemetria real do reservatório de Serra da Mesa por meio do TSI Explorer

Do *TSI Explorer*, os dados foram conectados ao *Power BI*, ambiente para o qual algumas possibilidades rápidas de exploração de dados são apresentadas (Figuras 6.15, 6.16 e 6.17)

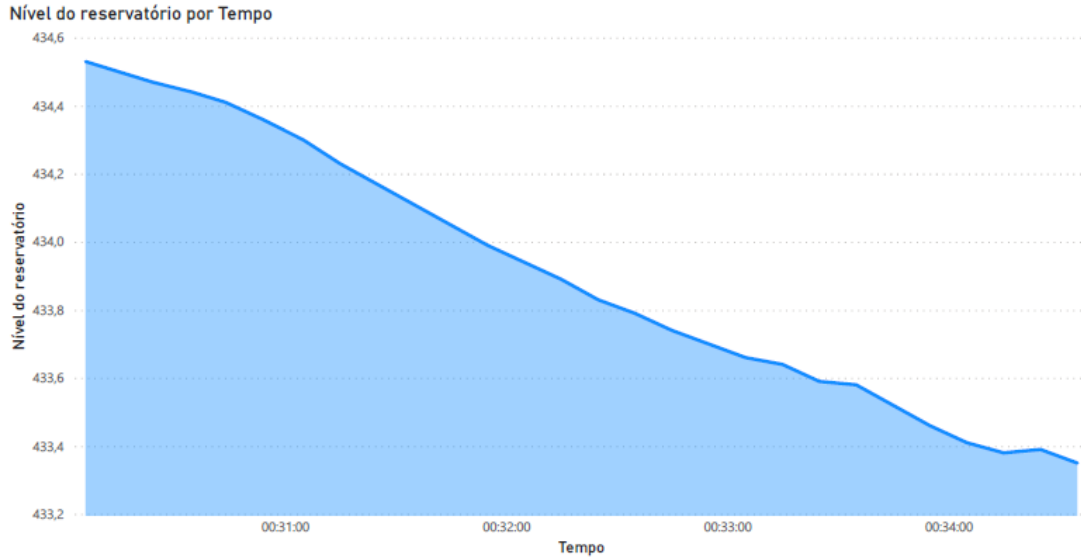


Figura 6.15 - Gráfico de área do nível do reservatório por tempo (datas fictícias) (Power BI)

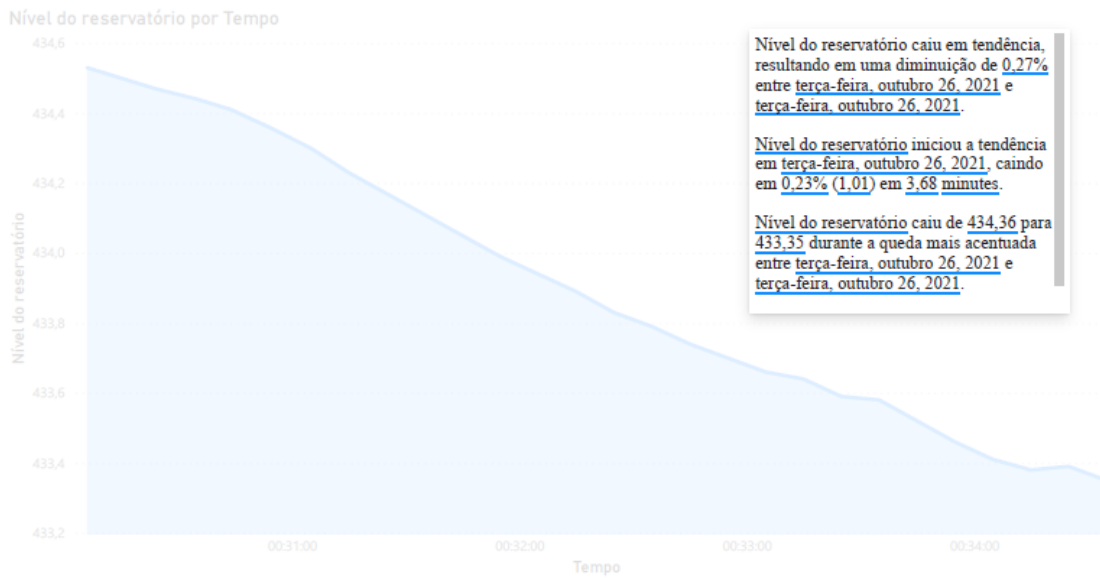


Figura 6.16 - Gráfico de área do nível do reservatório por tempo com resumo do comportamento dos dados em destaque (datas fictícias) (Power BI)

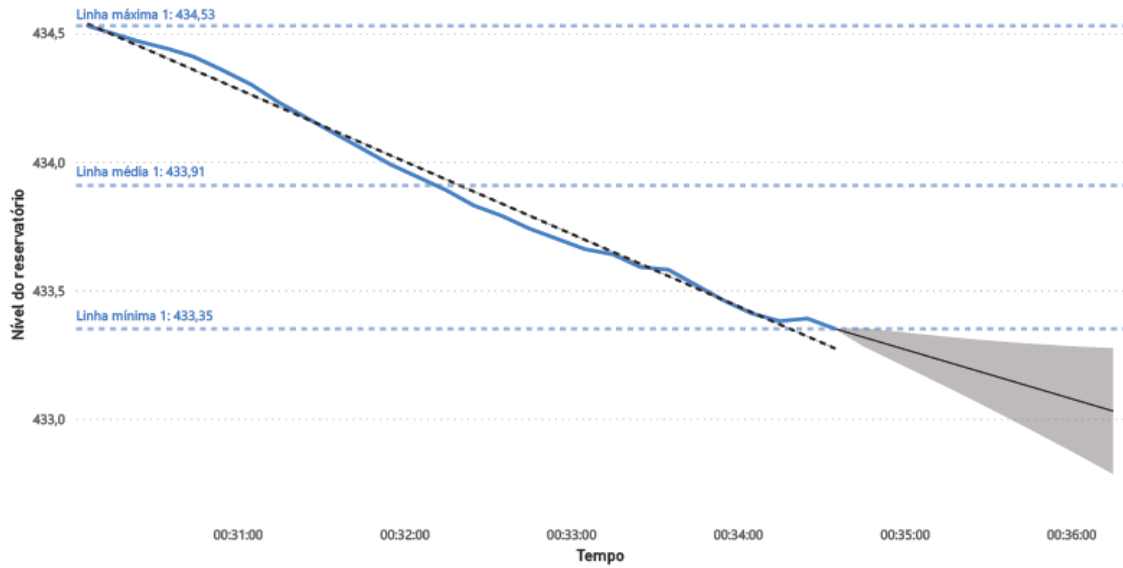


Figura 6.17 - Gráfico de linhas do nível do reservatório da Serra da mesa por tempo com linhas de média, mínima, máxima, de tendência e previsão

As figuras apresentadas ilustram funcionalidades básicas, simples e rápidas de se empregar. Vale notar, todavia, que diversas possibilidades surgem a partir de uma integração contínua, que ainda está em fase beta de desenvolvimento, com aplicações como o Power BI e afins. Diante de uma base real e mais robusta de dados, por exemplo, análises, regressões, correlações, relatórios, previsões etc. que levassem em conta diferentes tipos de variáveis e suas relações poderiam ser rapidamente obtidos. Além disso, esse cenário propicia que dados de telemetria do gêmeo digital possam continuamente alimentar outras ferramentas externas ou da plataforma, acarretando em um GD poderoso, com funcionalidades diversas que poderiam acarretar em uma gestão mais eficiente de uma barragem.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho desenvolvido permitiu o entendimento da complexidade de uma barragem e da sua necessidade de ser construída e gerida com rigor técnico elevado durante toda a sua vida útil, haja vista o alto risco potencial associado a essa, que é de um nível de grandeza similar a sua importância para a humanidade.

O gêmeo digital, ferramenta proposta como solução para o incremento da segurança e eficiência da construção e gestão de um barramento, se mostrou um conjunto de tecnologias extremamente promissor, repleto de funcionalidades disruptivas que se bem integradas podem proporcionar inúmeros benefícios e ser aplicado em diversos setores da humanidade, tornando altamente provável o posicionamento do GD como tecnologia central dos próximos anos.

A forma de implementação do gêmeo digital de barragens se mostrou fortemente dependente das características de instrumentação do empreendimento, conforme evidenciado pelo fluxograma de processos para aquisição e incorporação de dados do GD de um barramento desenvolvido neste trabalho, que acabou por destacar também a importância da definição da viabilidade do gêmeo digital e do planejamento da implantação do mesmo no Plano de Monitoramento e Instrumentação da barragem.

Ademais, para a comunicação de dados, diferentes protocolos de comunicação em diversas camadas mostraram-se necessários, com grande variação de características que demandam estudos mais aprofundados para garantia da segurança e integridade dos dados alimentadores do gêmeo digital, por exemplo.

Outro fator de destaque é o conjunto de tecnologias necessárias e possíveis para que a construção do GD seja viável e eficiente, nesse sentido, um grande grupo de linguagens de programação, plataformas e ferramentas existem, sendo as principais apresentadas nesta monografia.

Em se tratando de plataformas, duas foram apresentadas: *iTwin* e *Azure*, com ambas apresentando funcionalidades interessantes e promissoras, além de algumas limitações. Neste trabalho, principalmente as ferramentas de visualização, sincronização e conceitos principais da plataforma *iTwin* foram explorados, sendo evidenciado no decorrer do estudo e do desenvolvimento do gêmeo digital nessa uma usabilidade da plataforma não tão elevada para usuários comuns ou de áreas diferentes da de engenharia de software, questão natural haja vista o estado ainda inicial que se encontra a ferramenta.

Mesmo assim, a *iTwin* oferece possibilidades de integração promissoras e diversas outras ferramentas que não foram exploradas, o que sugere a possibilidade da criação de um

gêmeo digital poderoso diante da integração das funcionalidades de diferentes plataformas. Isso posto, tem-se como uma das recomendações deste trabalho o estudo em detalhe dos meios para que isso seja viabilizado, que passam pelo domínio da DTDL, linguagem fundamental para comunicar e integrar soluções IoT e de gêmeos digitais de diferentes fontes.

No estudo da segunda plataforma, a *Azure*, foi notado um grande número de soluções disponíveis, sendo nesse sentido ferramentas de processamento, análise e tratamento de dados alguns dos exemplos apresentados nas discussões e no decorrer da elaboração do gêmeo digital nessa plataforma. As soluções se mostraram altamente integráveis, com aplicações repletas de funcionalidades de grande utilidade para a gestão de barragens. Por outro lado, é válido destacar que alguns dos serviços da plataforma são pagos, de forma que foi utilizada nesta pesquisa uma licença temporária e com limitações. De qualquer forma, uma maior exploração dos serviços do ambiente é recomendada, juntamente com a integração desses com outras soluções, como por exemplo com a plataforma *iTwin*, que é de código aberto.

Ademais, vale destacar a necessidade de um estudo pormenorizado dos processos para implementação do gêmeo digital de um barramento, com questões gerais importantes a serem discutidas, como a de segurança e de custos. Dessa forma, seria interessante para trabalhos futuros que a discussão para seleção dos melhores meios entre as diferentes tecnologias, ferramentas e soluções de gêmeos digitais fosse aprofundada, para que em seguida uma aplicação real dos conceitos e possibilidades apresentadas fosse implantada.

Dado esse passo, os caminhos possíveis são diversos, como exemplo disso está a possibilidade de que sejam pensados treinamentos/soluções/*softwares* especializados em auxiliar gestores na construção de gêmeos digitais de suas barragens, de forma que essas réplicas digitais, alimentadas em tempo real, pudessem ser disponibilizadas para órgãos de fiscalização, para a população dos arredores do empreendimento e/ou para o público em geral.

De qualquer maneira, o que se tem de certo é a necessidade urgente de se buscar novas soluções que aumentem a segurança de barragens, de forma que os riscos associados à gestão desses empreendimentos sejam minorados a níveis aceitáveis.

REFERÊNCIAS

- ABANCÓ, C.; FALGÀS, E.; PAYÀS, B.; PÉREZ-ARCAS, J.; SCOTT, P. (2016) *Wireless low power real-time solutions for tailing dams - a case study*. APSSIM 2016. Australian Centre for Geomechanics. Perth, Austrália.
- AL-SARAWI, S.; ANBAR, M.; ALIEYAN, K.; ALZUBAIDI, M. (2017) *Internet of Things (IoT) communication protocols: Review*. 2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT). doi:10.1109/icitech.2017.8079928.
- AMAZON WEB SERVICES (2021) *O que é o DevOps?*. Disponível em: <<https://aws.amazon.com/pt/devops/what-is-devops/>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.
- AMBIENTEBRASIL (2021) *Quais são os tipos de barragens e por que a Vale construiu a menos segura na mina Córrego do Feijão?*. Disponível em: <<https://noticias.ambientebrasil.com.br/clipping/2019/01/30/150076-quais-sao-os-tipos-de-barragem-e-por-que-a-vale-construiu-a-menos-segura-na-mina-corrego-do-feijao.html>>. Acesso em: 14 de outubro de 2021.
- ANA Agência Nacional de águas e Saneamento Básico (Brasil) (2016a) *Guia Prático de Pequenas Barragens*. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, vol. 8. Brasília, Brasil. 120 p.
- ANA Agência Nacional de águas e Saneamento Básico (Brasil) (2016b) *Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens*. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, vol. 7. Brasília, Brasil. 135 p.
- ANA Agência Nacional de águas e Saneamento Básico (BRASIL) (2020) *Relatório de segurança de barragens 2019*. Brasília, Brasil. 131 p.
- ANA Agência Nacional de águas e Saneamento Básico (BRASIL) (2021) *Dados de operação dos reservatórios SIN*. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>>. Acesso em: 18 de outubro de 2021.
- ARROW (2021) *Azure IoT Hub*. Disponível em: <<https://www.arrow.com/ais/membedded/products-and-offerings/microsoft-azure-cloud-solutions/azure-iot-hub>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.
- ASSIS, A. P.; HERNANDEZ, H. M.; COLMANETTI, J.P. (2003) *Apostila de barragens*. Material apresentado na disciplina de graduação Barragens de Terra e Enrocamento da Universidade de Brasília no segundo semestre de 2020. Brasília, Brasil.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. (2010) *The Internet of Things: A survey*. Computer Networks, Volume 54, Issue 15, Páginas 2787-2805, ISSN 1389-1286, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
- AZUMA, R. T. (1997) *A Survey of Augmented Reality*. Presence: Teleoperators and Virtual Environments. vol. 6, no. 4, pp. 355-385.
- AZURE (2021a) *Digital Twins Definition Language (DTDL)*. Repositório do GitHub. Disponível em: <<https://github.com/Azure/opendigitaltwins-dtdl/blob/master/DTDL/v2/dtdlv2.md>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.
- AZURE (2021b) *Introducing Azure Functions*. Disponível em: <<https://azure.microsoft.com/en-us/blog/introducing-azure-functions/>>. Acesso em: 17 de outubro de 2021.

- AZURE (2021c) *Azure IoT Node.js SDK*. Repositório do GitHub. Disponível em: <<https://github.com/Azure/azure-iot-sdk-node>>. Acesso em: 20 de outubro de 2021.
- BENTLEY Bentley Systems, Incorporated (2021a) *What is the iTwin Platform?*. Disponível em: <<https://developer.bentley.com/itwinplatform/>>. Acesso em: 10 de maio de 2021.
- BENTLEY Bentley Systems, Incorporated (2021b) *iTwin Synchronizer*. Disponível em: <<https://www.bentley.com/en/products/product-line/digital-twins/itwin-synchronizer>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.
- BISWAS, A. R.; GIAFFREDA, R. (2014) *IoT and cloud convergence: Opportunities and challenges*. 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT). doi:10.1109/wf-iot.2014.6803194.
- BOSCHERT, S.; ROSEN, R. (2016) *Digital Twin—The Simulation Aspect*. In: Hehenberger P., Bradley D. (eds) *Mechatronic Futures*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5.
- BOTTA, A.; DE DONATO, W.; PERSICO, V.; PESCAPÉ, A. (2014) *On the Integration of Cloud Computing and Internet of Things*. 2014 International Conference on Future Internet of Things and Cloud, 2014, pp. 23-30, doi: 10.1109/FiCloud.2014.14.
- BOURHIS, P.; REUTTER, J. L.; SUÁREZ, F.; VRGOČ, D. (2017) *JSON: Data model, Query languages and Schema specification*. Proceedings of the 36th ACM SIGMOD-SIGACT-SIGAI Symposium on Principles of Database Systems - PODS '17. doi:10.1145/3034786.3056120.
- BRASIL (2010) *Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos.
- BRASIL (2019) *Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019*. Diário Oficial da União. Edição 154, Seção 1, Página 44. Órgão: Ministério de Minas e Energia/Agência Nacional de Mineração.
- BRASIL (2020) *Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020*. Diário Oficial da União. Edição 189, Seção 1, Página 3. Órgão: Atos do Poder Legislativo.
- BUKENYA, P.; MOYO, P.; BEUSHAUSEN, H.; OOSTHUIZEN, C. (2014) *Health monitoring of concrete dams: a literature review*. J Civil Struct Health Monit 4, 235–244.
- CAI, Y.; STARLY, B.; COHEN, P.; LEE, Y.-S. (2017) *Sensor Data and Information Fusion to Construct Digital-twins Virtual Machine Tools for Cyber-physical Manufacturing*. Procedia Manufacturing, 10, 1031–1042. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.094.
- CERQUEIRA, H.; LOPES, M.; QUEIROZ, C. M.; VIEL, I do. N.; SOARES, L.; SEBASTIÃO, C. S.; DIAS, L. S de. O. (2015) *Estudo de acurácia da automatização de piezômetros tipo Casagrande em barragens*. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas. ABMS. Belo Horizonte, Brasil. 10.20906/CPS/CB-11-0034.
- CHEN, H.; CHIANG, R.; STOREY, V. (2012) *Business Intelligence and Analytics: From Big Data to Big Impact*. MIS Quarterly, 36(4), 1165-1188. doi:10.2307/41703503.
- CHEN, M.; MAO, S.; ZHANG, Y.; LEUNG, V. C. M. (2014) *Big Data: Related Technologies, Challenges and Future Prospects*. Springer Publishing Company, Incorporated.

- COSTA, W. D. (2012) *Geologia de barragens*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. São Paulo, Brasil.
- CRACKFORD, D. (2008) *JavaScript: The Good Parts*. O'Reilly Media, Inc. Primeira edição.
- DEBROY, T.; ZHANG, W.; TURNER, J.; BABU, S. S. (2017) *Building digital twins of 3D printing machines*. Scripta Materialia, 135, 119–124. doi:10.1016/j.scriptamat.2016.12.
- DELBRUGGER, T.; LENZ, L. T.; LOSCH, D.; ROSMANN, J. (2017) *A navigation framework for digital twins of factories based on building information modeling*. 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). doi:10.1109/etfa.2017.8247712.
- DINADRILL (2021) *Alternativas para desativação de barragens no Brasil: descaracterização ou descomissionamento?*. Disponível em: <<https://www.dinadrill.com.br/noticia/alternativas-para-desativacao-de-barragens-no-brasil%3A-descaracteriza%C3%A7%C3%A3o-ou-descomissionamento>>. Acesso em: 10 de outubro de 2021.
- DONG, S.; KAMAT, V.R. (2013) *SMART: scalable and modular augmented reality template for rapid development of engineering visualization applications*. Vis. in Eng. 1, 1 (2013). <https://doi.org/10.1186/2213-7459-1-1>.
- DUARTE (2008) *Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- EXIMIACO (2019) *O que é e por que usar Azure Functions? Relação com Serverless Architectures e pontos de atenção*. Disponível em: <<https://eximia.co/o-que-e-e-por-que-usar-azure-functions-relacao-com-serverless-architectures-e-pontos-de-atencao/>>. Acesso em: 17 de outubro de 2021.
- FAO (2011) *Manual sobre pequenas barragens de terra (Guia para a localização, projecto e construção)*. Roma, Itália.
- GEOSCAN (2021) *Descaracterização de baggens: Saiba mais sobre!*. Disponível em: <<https://www.geoscan.com.br/blog/descaracterizacao-de-barragens/>>. Acesso em: 10 de outubro de 2021.
- GIUSTO, D.; IERA, A.; MORABITO, G.; ATZORI, L. (2010) *The Internet of Things: 20th Tyrrhenian Workshop on Digital Communications*. Países Baixos: Springer New York.
- GLAESSGEN, E.; STARGEL, D. (2012) *The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles*. Paper for the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>.
- GPS VISUALIZER (2021) *Convert a GPS file to plain text or GPX*. Disponível em: <https://www.gpsvisualizer.com/convert_input>. Acesso em 17 de outubro de 2021.
- GRIEVES, M. (2015) *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*.
- GUTIÉRREZ, J. L. C. (2003) *Monitoramento da Instrumentação da Barragem de Corumbá-I por Redes Neurais e Modelos de Box & Jenkins*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. v., 146 f.

- HAAG, S.; ANDERL, R. (2018) *Digital twin – Proof of concept*. Manufacturing Letters, Volume 15, Part B, Páginas 64-66, ISSN 2213-8463, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.006>.
- HAVARD, V.; JEANNE, B.; LACOMBLEZ, M.; BAUDRY, D. (2019) *Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations*. Production & Manufacturing Research, 7(1), 472–489. doi:10.1080/21693277.2019.1660283.
- HEJLSBERG, A.; TORGENSEN, M.; WILTAMUTH, S.; GOLDE, P. (2008) *The C# Programming Language*. Pearson Education. Terceira edição.
- ICOLD International Commission of Large Dams (2000) *Automated dam monitoring systems, Guidelines and case histories*. Committee on automated monitoring of dams and their foundations. Paris, França.
- IMODELJS (2021) *Desktop Starter*. Repositório do GitHub. Disponível em: <<https://github.com/imodeljs/desktop-starter>>. Acesso em: 10 de outubro de 2021.
- ISO 16757-1 (2015) *Data structures for electronic product catalogues for building services — Part 1: Concepts, architecture and model*. International Organization for Standardization.
- ISTOÉ (2021) *Ibram: algumas barragens precisam de prazo de descomissionamento maior*. Disponível em: <<https://www.istoedinheiro.com.br/ibram-algumas-barragens-precisam-de-prazo-de-descomissionamento-maior/>>. Acesso em 10 de outubro de 2021.
- ITAIPU (2021) *Auscultação*. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/auscultacao>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.
- ITU (2012) *Recommendation ITU-T X.1361*. Series X: Data Networks, Open System Communications and Security. Secure applications and services (2) – Internet of things (IoT) security. Security framework for the Internet of things based on the gateway model.
- ITWINJS (2021a) *iModels*. Disponível em: <<https://www.itwinjs.org/learning/imodels/>>. Acesso em: 16 de outubro 2021.
- ITWINJS (2021b) *Base Infrastructure Schemas (BIS)*. Disponível em: <<https://www.itwinjs.org/bis/>>. Acesso em: 16 de outubro 2021.
- ITWINJS (2021c) *iModelHub – The Backbone for iTwin.js Applications*. Disponível em: <<https://www.itwinjs.org/learning/imodelhub/>>. Acesso em: 16 de outubro 2021.
- JANSEN, R. H. (2015) *Learning TypeScript*. Packt Publishing Ltd.
- KEIM, D. A. (2002) *Information visualization and visual data mining*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 8(1), 1–8. doi:10.1109/2945.981847.
- KRITZINGER, W.; KARNER, M.; TRAAR, G. HENJES, J. SIHN, W. (2018) *Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification*. IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 11, Páginas 1016-1022, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.
- KUTS, V.; OTTO, T.; TÄHEMAA, T.; BONDARENKO, Y. (2019) *Digital twin based synchronised control and simulation of the industrial robotic cell using virtual reality*. Journal of Machine Engineering.

- LANTHALER, M.; GÜTL, C. (2012) *On using JSON-LD to create evolvable RESTful services*. Proceedings of the Third International Workshop on RESTful Design - WS-REST '12. doi:10.1145/2307819.2307827.
- LI, C.; MAHADEVAN, S.; LING, Y.; CHOZE, S.; WANG, L. (2017) *Dynamic Bayesian Network for Aircraft Wing Health Monitoring Digital Twin*. AIAA JOURNAL. <https://doi.org/10.2514/1.J055201>.
- LI, S.; XU, L. D.; ZHAO, S. (2014) *The internet of things: a survey*. Information Systems Frontiers, 17(2), 243–259. doi:10.1007/s10796-014-9492-7.
- LYU, Z.; CHAI, J.; XU, Z.; QIN, Y.; CHAO, J. (2019) *A comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History*. Hindawi. Advances in Civil Engineering, vol. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4159306>.
- MACHADO, W. G. F. (2007) *Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- MASSAD, F. (2010) *Obras de terra: curso básico de geotecnia*. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. São Paulo, Brasil.
- MATTERN, F.; FLOERKEMEIER, C. (2010) *From the Internet of Computers to the Internet of Things*. From Active Data Management to Event-Based Systems and More, 242–259. doi:10.1007/978-3-642-17226-7_15.
- MCCARTHY, J. (2007) *What is Artificial Intelligence?*. Disponível em: <<http://jmc.stanford.edu/articles/whatisai/whatisai.pdf>>. Acesso em: 16 de outubro 2021.
- MELLO, V. F. B. de. (1975) *Maçãos e Obras de Terra*. Anotações de apoio às aulas. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.
- MICROSOFT (2021a) *Como funciona o Azure*. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/pt-br/azure/cloud-adoption-framework/get-started/what-is-azure>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.
- MICROSOFT (2021b) *What is Azure Time Series Insights Gen2*. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/en-us/azure/time-series-insights/overview-what-is-tsi>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.
- MICROSOFT (2021c) *Welcome to Azure Stream Analytics*. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/en-us/azure/stream-analytics/stream-analytics-introduction>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.
- MICROSOFT (2021d) *What is Azure Databricks?*. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/en-us/azure/databricks/scenarios/what-is-azure-databricks>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.
- MICROSOFT (2021e) *O que é o Apache Spark?*. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/pt-br/dotnet/spark/what-is-spark>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.
- MICROSOFT (2021f) *Learn about twin models and how to define them in Azure Digital Twins*. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/concepts-models>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.

- MICROSOFT (2021g) *Introdução ao Azure Functions*. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/pt-br/azure/azure-functions/functions-overview>>. Acesso em: 17 de outubro de 2021.
- MICROSOFT (2021h) *Supported Languages in Azure Functions*. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/en-us/azure/azure-functions/supported-languages>>. Acesso em: 17 de outubro de 2021.
- MICROSOFT (2021i) *TypeScript*. Repositório do GitHub. Disponível em: <<https://github.com/microsoft/TypeScript>>. Acesso em: 17 de outubro de 2021.
- MONOSTORI, L. (2014) *Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges*. Procedia CIRP. 17. 9–13. 10.1016/j.procir.2014.03.115.
- MORAN, A.; GADEPALLY, V.; HUBBELL, M.; KEPNER, J. (2015) *Improving Big Data visual analytics with interactive virtual reality*. 2015 IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC). doi:10.1109/hpec.2015.7322473.
- MOZILLA (2021) *About JavaScript*. Disponível em: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/About_JavaScript>. Acesso em: 17 de outubro de 2021.
- NAIK, N. (2017) *Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP*. 2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE). doi:10.1109/syseng.2017.8088251.
- NBS (2021) *What is BIM?*. Disponível em: <<https://www.thenbs.com/knowledge/what-is-building-information-modelling-bim>>. Acesso em: 15 de outubro de 2021.
- NEGRI, E. FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. (2017) *A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems*. Procedia Manufacturing, Volume 11, Páginas 939-948, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>.
- O'LEARY, D. E. (2013) *Artificial Intelligence and Big Data*. IEEE Intelligent Systems, vol. 28, no. 2, pp. 96-99, March-April 2013, doi: 10.1109/MIS.2013.39.
- OLSHANNIKOVA, E.; OMETOV, A.; KOUCHERYAVY, Y.; OLSSON, T. (2015) *Visualizing Big Data with augmented and virtual reality: challenges and research agenda*. Journal of Big Data 2, 22. <https://doi.org/10.1186/s40537-015-0031-2>.
- OUSSOUS, A.; BENJELLOUN, F-Z.; LAHCEN, A.A., SAMIR BELFKIH (2017) *Big Data Technologies: A Survey*. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksuci.2017.06.001>.
- OWENS, M. (2006) *The Definitive Guide to SQLite*. doi:10.1007/978-1-4302-0172-4.
- PECK, R. B. (1984) *observations and instrumentation, some elementary considerations*. 1983 postscript. Judgment in Geotechnical Engineering: The Professional Legacy of Ralph Peck, J. Dunicliff and D. U. Deere (Eds), Wiley, New York.
- PEREIRA, D. de A. (2005) *Previsão de Poropressão Construtiva em Barragens Via Simulação Numérica*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. xxi, 112 p.
- PEZOA, F.; REUTTER, J. L.; SUAREZ, F.; UGARTE, M.; VRGOČ, D. (2016) *Foundations of JSON Schema*. Proceedings of the 25th International Conference on World Wide Web - WWW '16. doi:10.1145/2872427.2883029.

- PORTER M. E., HEPPELMANN J. E. (2014) *How smart, connected products are transforming competition*. Harv Bus Rev 92:11–64.
- QINGLIN QI; TAO, F (2018) *Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison*. IEEE Access, 6, 3585–3593. doi:10.1109/access.2018.2793265.
- QINGLIN QI; TAO, F.; HU, T.; ANWER, N. (2019) *Enabling technologies and tools for digital twin*. Journal of Manufacturing Systems, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>.
- QUEIROZ, R. C. (2016) *Geologia e Geotecnia Básica para Engenharia Civil*. São Paulo: Blucher, 2016. São Paulo, Brasil.
- 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. Geotecnia e Desenvolvimento Urbano. ABMS. Salvador, Brasil.
- RANKOHI, S.; WAUGH, L. (2013) *Review and analysis of augmented reality literature for construction industry*. Visualization in Engineering. 1. 1-18. 10.1186/2213-7459-1-9.
- SAGIROGLU, S.; SINANC, D. (2013) *Big data: A review*. 2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS), 2013, pp. 42-47, doi: 10.1109/CTS.2013.6567202.
- SAI, Y.; ZHANG, T.; HUANG, X.; DING, C. (2020) *Analysis of Digital Twins and Application Value of Power Engineering Based on BIM*. 10.1007/978-981-15-2568-1_74.
- SANTOS, A. C. C dos. (2019) *Análise Crítica da Previsão do Comportamento Mecânico de Enrocamentos por meio de Modelagem em Escala de Laboratório*. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil. (xxxiv), 580 p.
- SCHLEICH, B.; ANWER, N.; MATHIEU, L.; WARTZACK, S. (2017) *Shaping the digital twin for design and production engineering*. CIRP Annals, Volume 66, Issue 1, Páginas 141-144, ISSN 0007-8506, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>.
- SCHLUSE, M.; ROSSMANN, J. (2016) *From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems*. 2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/SysEng.2016.7753162.
- SCHROEDER, G.; STEINMETZ, C.; PEREIRA, C. E.; MULLER, I. (2016) *Visualising the digital twin using web services and augmented reality*. IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2016, pp. 522-527, doi: 10.1109/INDIN.2016.7819217.
- SHIN, D. H.; DUNSTON, P. S. (2008) *Identification of application areas for Augmented Reality in industrial construction based on technology suitability*. Automation in Construction, Volume 17, Issue 7, Páginas 882-894, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.02.012>.
- SILVA, M. F. S. (2019) *Sistema de monitoramento online de barragens de mineração*. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.
- SILVEIRA, J. F. A. (2006) *Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento*. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. São Paulo, Brasil.

- STACKOWIAK, R. (2019) *Azure Internet of Things Revealed*. doi:10.1007/978-1-4842-5470-7.
- STERGIOU, C.; PSANNIS, K. E.; KIM, B.-G.; GUPTA, B. (2018) *Secure integration of IoT and Cloud Computing*. *Future Generation Computer Systems*, 78, 964–975. doi:10.1016/j.future.2016.11.031.
- TAO, F.; CHENG, J.; QI, Q.; ZHANG, M.; ZHANG, H.; SUI, F. (2017) *Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data*. *Int J Adv Manuf Technol* 94, 3563–3576 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.
- TAO, F.; ZHANG, H.; LIU, A.; NEE, A. Y. C. (2019) *Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," in IEEE Transactions on Industrial Informatics*. vol. 15, no. 4, pp. 2405-2415, doi:10.1109/TII.2018.2873186.
- TERAS, M.; RAGHUNATHAN, S. (2015) *Big data visualisation in immersive virtual reality environments: embodied phenomenological perspectives to interaction*. SOCO 2015.
- THOMAS, H. H. (1976) *The Engineering of Large Dams*. John Wiley and Sons, Inc.
- U. S. BUREAU OF RECLAMATION (1987) *Embankment Dam Instrumentation Manual*. Bartholomew, C. L.; Murray, B. C.; Goins, D. L. U.S. Department of the Interior, Janeiro, 250 pp.
- VIEIRA, B. F. Q. (2009) *Análise do comportamento estrutural de barragens abóbada com descarregadores de superfície de grandes dimensões*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- W3C (2014) *JSON-LD 1.0*. A JSON-based Serialization for Linked Data. W3C Recommendation 16 January 2014. Disponível em: <<http://www.w3.org/TR/2014/REC-jsonld-20140116/>>. Acesso em: 17 de outubro de 2021.
- WAHLSTROM, E. E. (1974) *Dams, Dam Foundations, and Reservoir Sites*. *Developments in Geotechnical Engineering* 6. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdã, Oxford, New York. 278 p.
- WANG, J.; WANG, K.; WANG, Y.; HUANG, Z.; XUE, R. (2018) *Deep Boltzmann machine based condition prediction for smart manufacturing*. *J Ambient Intell Human Comput* 10, 851–861 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0794-3>.
- WORTMANN, F.; FLÜCHTER, K. (2015) *Internet of Things*. *Business & Information Systems Engineering*, 57(3), 221–224. doi:10.1007/s12599-015-0383-3.
- ZHENG, J. M.; CHAN, K. W.; GIBSON, I. (1998) *Virtual reality*. *IEEE Potentials*, 17(2), 20–23. doi:10.1109/45.666641.
- ZHENG, Y.; YANG, S.; CHENG, H. (2018) *An application framework of digital twin and its case study*. *J Ambient Intell Human Comput* 10, 1141–1153 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0911-3>.
- ZHOU, J.; LEPPANEN, T.; HARJULA, E.; YLIANTTILA, M.; OJALA, T.; Yu, C.; JIN, H. (2013) *CloudThings: A common architecture for integrating the Internet of Things with Cloud Computing*. *Proceedings of the 2013 IEEE 17th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*. doi:10.1109/cscwd.2013.6581037.

APÊNDICE A1

CÓDIGO DTDL PARA DEFINIÇÃO DOS MODELOS DO GÊMEO DIGITAL NA PLATAFORMA AZURE

```
[
  {
    "@id": "dtmi:sm:reservatorio;1",
    "@type": "Interface",
    "@context": "dtmi:dtdl:context;2",
    "displayName": "Reservatório",
    "contents": [
      {
        "name": "Nivel",
        "@type": "Property",
        "schema": "double"
      },
      {
        "name": "Quimicidade",
        "@type": "Property",
        "schema": "double"
      },
      {
        "name": "Temperatura",
        "@type": "Property",
        "schema": "double"
      }
    ]
  },
  {
    "@id": "dtmi:sm:corpo;1",
    "@type": "Interface",
    "@context": "dtmi:dtdl:context;2",
    "displayName": "Corpo da barragem",
    "contents": [
      {
        "name": "Inclinometro1",
        "@type": "Property",
        "schema": "double"
      },
      {
        "name": "PlacaMagnetica1",
        "@type": "Property",
        "schema": "double"
      }
    ]
  }
]
```

```

    "name": "PlacaMagnetica2",
    "@type": "Property",
    "schema": "double"
  },
  {
    "name": "PlacaMagnetica3",
    "@type": "Property",
    "schema": "double"
  },
  {
    "name": "PlacaMagnetica4",
    "@type": "Property",
    "schema": "double"
  },
  {
    "name": "PlacaMagnetica5",
    "@type": "Property",
    "schema": "double"
  },
  {
    "name": "Piezometro1",
    "@type": "Property",
    "schema": "double"
  },
  {
    "name": "Piezometro2",
    "@type": "Property",
    "schema": "double"
  },
  {
    "name": "Piezometro3",
    "@type": "Property",
    "schema": "double"
  },
  {
    "name": "Piezometro4",
    "@type": "Property",
    "schema": "double"
  },
  {
    "name": "Piezometro5",
    "@type": "Property",
    "schema": "double"
  },
  {
    "name": "Piezometro6",
    "@type": "Property",
    "schema": "double"
  },
},

```



```
{
  "name": "Piezometro7",
  "@type": "Property",
  "schema": "double"
},
{
  "name": "Piezometro8",
  "@type": "Property",
  "schema": "double"
},
{
  "name": "Piezometro9",
  "@type": "Property",
  "schema": "double"
},
{
  "name": "Piezometro10",
  "@type": "Property",
  "schema": "double"
},
{
  "name": "Piezometro11",
  "@type": "Property",
  "schema": "double"
},
{
  "name": "Piezometro12",
  "@type": "Property",
  "schema": "double"
},
{
  "name": "Celula1",
  "@type": "Property",
  "schema": "double"
},
{
  "name": "Celula2",
  "@type": "Property",
  "schema": "double"
},
{
  "name": "Caixa1",
  "@type": "Property",
  "schema": "double"
},
{
  "name": "Caixa2",
  "@type": "Property",
  "schema": "double"
}
```

```

    },
    {
      "name": "Caixa3",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    },
    {
      "name": "Caixa4",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    },
    {
      "name": "Caixa5",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    },
    {
      "name": "Caixa6",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    },
    {
      "name": "Caixa7",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    }
  ]
},
{
  "@id": "dtmi:sm:casa;1",
  "@type": "Interface",
  "@context": "dtmi:dtdl:context;2",
  "displayName": "Casa de força",
  "contents": [
    {
      "name": "Unidade1",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    },
    {
      "name": "Unidade2",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    },
    {
      "name": "Unidade3",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    }
  ]
}

```

```

]
},
{
  "@id": "dtmi:sm:vertedouro;1",
  "@type": "Interface",
  "@context": "dtmi:dtd1:context;2",
  "displayName": "Vertedouro",
  "contents": [
    {
      "name": "Comporta1",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    },
    {
      "name": "Comporta2",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    },
    {
      "name": "Comporta3",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    },
    {
      "name": "Comporta4",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    },
    {
      "name": "Comporta5",
      "@type": "Property",
      "schema": "double"
    }
  ]
}
]

```

APÊNDICE A2

CÓDIGO DTDL PARA DEFINIÇÃO DOS RELACIONAMENTOS DOS MODELOS DOS GÊMEOS DIGITAIS NA PLATAFORMA AZURE

```
[
  {
    "@id": "dtmi:sm:dam;1",
    "@type": "Interface",
    "@context": "dtmi:dtdl:context;2",
    "displayName": "Serra da Mesa",
    "contents": [
      {
        "name": "Estado",
        "@type": "Property",
        "schema": "string"
      },
      {
        "@type": "Relationship",
        "name": "contains",
        "displayName": "Composta por",
        "properties": [
          {
            "name": "relacao",
            "@type": "Property",
            "schema": "string"
          }
        ]
      }
    ]
  }
]
```

APÊNDICE A3

SIMULAÇÃO DA TELEMETRIA

```
//ver referência para melhor entendimento do programa (AZURE, 2021c)

'use strict';

//Conecta por meio do protocolo MQTT ao IoT Hub
//A forma de definição da conexão não é ideal no que tange aos aspectos de
segurança, sendo definida apenas por questões práticas e de didática
var clientFromConnectionString = require('azure-iot-device-
mqtt').clientFromConnectionString;
var Message = require('azure-iot-device').Message;
var connectionStringCorpo = 'OMITIDO';
var connectionStringReservatorio = 'OMITIDO';
var connectionStringVertedouro = 'OMITIDO';
var connectionStringForca = 'OMITIDO';
var client = clientFromConnectionString(connectionStringCorpo);
var client2 = clientFromConnectionString(connectionStringReservatorio);
var client3 = clientFromConnectionString(connectionStringVertedouro);
var client4 = clientFromConnectionString(connectionStringForca);

// A função seguinte, assim como as subsequentes do mesmo tipo, cria a
mensagem e a envia a cada 5000 ms ao IoT hub
setInterval(function(){
  // Simula a telemetria
  var Nivel = 460 + (Math.random() * 0.5);
  var Quimicidade = 0.004 + (Math.random() * 0.005);
  var Temperatura = 25 + (Math.random() * 10);
  var message = new Message(JSON.stringify({
    Nivel: Nivel,
    Quimicidade: Quimicidade,
    Temperatura: Temperatura
  }));

  message.properties.add('NivelAlert', (Nivel > 460.5) ? 'true' : 'false');

  console.log('Enviando mensagem: ' + message.getData());

  // Envia a mensagem
  client.sendEvent(message, function (err) {
    if (err) {
      console.error('envia erro: ' + err.toString());
    } else {
      console.log('Mensagem enviada');
    }
  });
});
```

```
}, 5000);
```

```
setInterval(function(){  
  // Simula a telemetria  
  var InclinoMetro1 = 0.005 + (Math.random() * 0.005);  
  var PlacaMagnetica1 = 0.001 + (Math.random() * 0.005);  
  var PlacaMagnetica2 = 0.002 + (Math.random() * 0.005);  
  var PlacaMagnetica3 = 0.003 + (Math.random() * 0.005);  
  var PlacaMagnetica4 = 0.004 + (Math.random() * 0.005);  
  var PlacaMagnetica5 = 0.006 + (Math.random() * 0.005);  
  var Piezometro1 = 0.01 + (Math.random() * 0.05);  
  var Piezometro2 = 0.02 + (Math.random() * 0.05);  
  var Piezometro3 = 0.03 + (Math.random() * 0.05);  
  var Piezometro4 = 0.04 + (Math.random() * 0.05);  
  var Piezometro5 = 0.06 + (Math.random() * 0.05);  
  var Piezometro6 = 0.07 + (Math.random() * 0.05);  
  var Piezometro7 = 0.08 + (Math.random() * 0.05);  
  var Piezometro8 = 0.10 + (Math.random() * 0.05);  
  var Piezometro9 = 0.11 + (Math.random() * 0.05);  
  var Piezometro10 = 0.12 + (Math.random() * 0.05);  
  var Piezometro11 = 0.05 + (Math.random() * 0.05);  
  var Piezometro12 = 0.15 + (Math.random() * 0.05);  
  var Celula1 = 0.1 + (Math.random() * 0.05);  
  var Celula2 = 0.3 + (Math.random() * 0.05);  
  var Caixa1 = 0.28 + (Math.random() * 0.5);  
  var Caixa2 = 0.55 + (Math.random() * 0.5);  
  var Caixa3 = 0.8 + (Math.random() * 0.5);  
  var Caixa4 = 0.26 + (Math.random() * 0.5);  
  var Caixa5 = 0.87 + (Math.random() * 0.5);  
  var Caixa6 = 0.59 + (Math.random() * 0.5);  
  var Caixa7 = 0.23 + (Math.random() * 0.5);  
  var message = new Message(JSON.stringify({  
    InclinoMetro1: InclinoMetro1,  
    PlacaMagnetica1: PlacaMagnetica1,  
    PlacaMagnetica2: PlacaMagnetica2,  
    PlacaMagnetica3: PlacaMagnetica3,  
    PlacaMagnetica4: PlacaMagnetica4,  
    PlacaMagnetica5: PlacaMagnetica5,  
    Piezometro1:Piezometro1,  
    Piezometro2:Piezometro2,  
    Piezometro3:Piezometro3,  
    Piezometro4:Piezometro4,  
    Piezometro5:Piezometro5,  
    Piezometro6:Piezometro6,  
    Piezometro7:Piezometro7,  
    Piezometro8:Piezometro8,  
    Piezometro9:Piezometro9,
```

```

    Piezometro10:Piezometro10,
    Piezometro11:Piezometro11,
    Piezometro12:Piezometro12,
    Celula1: Celula1,
    Celula2: Celula2,
    Caixa1: Caixa1,
    Caixa2: Caixa2,
    Caixa3: Caixa3,
    Caixa4: Caixa4,
    Caixa5: Caixa5,
    Caixa6: Caixa6,
    Caixa7: Caixa7
  }));

  console.log('Enviando mensagem: ' + message.getData());

  // Envia a mensagem
  client2.sendEvent(message, function (err) {
    if (err) {
      console.error('envia erro: ' + err.toString());
    } else {
      console.log('Mensagem enviada');
    }
  });
}, 5000);

setInterval(function(){
  // Simula a telemetia
  var Unidade1 = 400 + (Math.random() * 50);
  var Unidade2 = 400 + (Math.random() * 50);
  var Unidade3 = 400 + (Math.random() * 50);
  var message = new Message(JSON.stringify({
    Unidade1: Unidade1,
    Unidade2: Unidade2,
    Unidade3: Unidade3
  }));

  console.log('Enviando mensagem: ' + message.getData());

  // Envia a mensagem.
  client3.sendEvent(message, function (err) {
    if (err) {
      console.error('envia erro: ' + err.toString());
    } else {
      console.log('Mensagem enviada');
    }
  });
}, 5000);

```

```

    });
}, 5000);

setInterval(function(){
    // Simula a telemetria
    var Comporta1 = 10 + (Math.random() * 5);
    var Comporta2 = 15 + (Math.random() * 5);
    var Comporta3 = 20 + (Math.random() * 5);
    var Comporta4 = 25 + (Math.random() * 5);
    var Comporta5 = 30 + (Math.random() * 5);
    var message = new Message(JSON.stringify({
        Comporta1:Comporta1,
        Comporta2:Comporta2,
        Comporta3:Comporta3,
        Comporta4:Comporta4,
        Comporta5:Comporta5
    }));

    console.log('Enviando mensagem: ' + message.getData());

    // Envia a mensagem
    client4.sendEvent(message, function (err) {
        if (err) {
            console.error('envia erro: ' + err.toString());
        } else {
            console.log('Mensagem enviada');
        }
    });
}, 5000);

```