U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

DESENVOLVIMENTO DE UM *DIGITAL TWIN* NO CONTEXTO DA MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

HÉLDER ALEXANDRE MARTINS DA SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor José Miguel de Freitas Castro

Coorientador: Luís Augusto Ferreira Rodrigues de Macedo

SETEMBRO DE 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus,

“First steps are always the hardest but until they are taken the notion of progress remains only a notion and not an achievement.”

Aberjhani

AGRADECIMENTOS

Ao longo do tempo de desenvolvimento desta dissertação, em jeito de desculpa e quando confrontado com distrações, respondia com "a tese não se faz sozinha". E a realidade é que não só não se faz sozinha como também eu não a teria realizado sozinho. Quero, portanto, de uma forma geral agradecer a todos aqueles que contribuíram para que fosse capaz de finalizar com um sorriso esta etapa da minha vida académica.

Tenho desde logo por todo o acompanhamento, com toda a paciência e disponibilidade que tal exigiram, por todos os ensinamentos e palavras de tranquilidade e acima de tudo por todo o entusiasmo transmitido com que vive a Engenharia, a inovação e a tecnologia, que agradecer ao Professor Miguel Castro. Foi um prazer ter tido a oportunidade de trabalhar e aprender com o professor, recebendo a sua orientação e sentindo a motivação transmitida.

Da mesma forma agradeço ao Professor António Arêde por todo o auxílio e tempo despendido, por toda a partilha de conhecimento e experiência e por toda a paciência para com o desafio presente na dissertação. Deixo também um enorme obrigado à Doutora Susana Moreira que colabora com o Professor António Arêde e que me colocou a par do seu envolvimento com o projeto de monitorização que fornece o caso de estudo para este trabalho, disponibilizando-me inclusivamente material que me foi muito útil.

Recordando o meu percurso ao longo destes anos torna-se agora difícil destacar algumas das amizades a quem devo muito. Mas isso é porque não tenho amigos mesmo. Brincando … como diria a minha caríssima amiga Mafalda Lima. És linda Mafalda. À Catarina agradeço quando casarmos aos 27. És linda também. Uma das duas é mais, lutem entre vocês e tentem descobrir qual. Ao Santos e ao Nelito que me acompanharam a partir do início deste percurso e que me ajudaram a compreender que era isto que queria numa fase de alguma incerteza, à Ana que me fez crescer e mudar muito e que marcou de certa forma um ponto de viragem a partir do qual me foquei mais no curso e assumi mais responsabilidades. Ao Dias que apareceu ligeiramente mais tarde por todas as asneiras, por todas as discussões e por toda a amizade e ao Duarte por toda a rivalidade. A todos os colegas de curso com quem partilhei os melhores momentos neste percurso. À Joana Mota Vrum Vrum porque lhe prometi num jantar de São João.

Na terrinha, por todo o apoio, por toda a confiança e por muito mais à Diana, que esteve sempre presente. Por toda a amizade e companhia ao Rui. Ao Riberinha Café, local de encontro sem marcação onde me pude sempre abstrair para recuperar a motivação necessária para concluir o curso quando nem tudo corria bem.

Por fim, agradeço à minha família que me deu a oportunidade de frequentar o curso e que trabalhou para que nada me faltasse.

RESUMO

No âmbito da quarta revolução industrial surgem novos sistemas e técnicas que permitem impulsionar diferentes áreas do mercado. É entre estes que surge o conceito do *digital twin* que, como sugere o próprio nome, consiste num modelo virtual que acompanha em tempo real a evolução de um modelo e/ou ambiente real que representa. É criado através da interligação entre dados da Internet das Coisas (IoT) e modelos tridimensionais BIM e introduz uma ferramenta de trabalho com a qual é possível garantir uma maior fiabilidade e facilidade na gestão de processos, às quais se associa uma redução de custos.

Esta dissertação apresenta o processo para o desenvolvimento de um *digital twin* representativo de uma igreja localizada na cidade do Porto. O projeto de uma nova linha de metro que envolve um enorme conjunto de escavações exige a monitorização de uma série de edifícios históricos na área de influência da construção, entre os quais o da igreja de Santo António dos Congregados, concluída no ano de 1703.

Um sistema de monitorização baseado num conjunto de sensores e módulos de recolha, tratamento e transmissão de dados foi instalado em três localizações estratégicas da igreja para a deteção de potenciais movimentos estruturais do edifício. Os dados adquiridos são encaminhados para uma plataforma de armazenamento e para uma plataforma de visualização nas quais é possível realizar operações de pós-processamento e obter gráficos personalizáveis e demonstrativos dos parâmetros medidos. A partir da plataforma de armazenamento de séries de dados temporais e de uma API encarregue pela disponibilização dos dados, recorrendo aos serviços da Autodesk Forge, é criado um modelo BIM posteriormente exportado para um ambiente web e são integrados os dados recolhidos para apresentação na localização definida para os sensores representados no modelo.

PALAVRAS-CHAVE: quarta revolução industrial, *digital twin*, IoT, monitorização, BIM

ABSTRACT

In the context of the fourth industrial revolution, new systems and techniques are emerging that make it possible to promote different areas of the market. Among these is the concept of the *digital twin*, which, as its name suggests, consists of a virtual model that tracks in real time the evolution of a model and/or the real environment it represents. It is created by combining data from the Internet of Things (IoT) and BIM three-dimensional models and represents a working tool that can ensure greater reliability and easier management of processes, which is associated with a reduction in costs.

In this dissertation, the process of developing a representative *digital twin* of a church in the city of Porto is presented. The project of a new metro line, which involves a series of excavations, requires the monitoring of a few historical buildings in the area of influence of the construction, including the church of Santo António dos Congregados, completed in 1703.

A monitoring system based on a series of sensors and modules to collect, process and transmit data has been installed in three strategic locations of the church to detect possible structural movements of the building. The acquired data is transmitted to a storage platform and to a visualisation platform where post-processing operations can be performed and customizable graphics can be created to display the measured parameters. Using Autodesk Forge services, a BIM model is created and is then exported to a web environment. From the time series storage platform, using an API responsible for making the data available, the data collected is integrated for presentation at the location defined for the sensors represented in the model.

KEYWORDS: fourth industrial revolution, *digital twin*, IoT, monitoring, BIM

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i

RESUMO iii

ABSTRACT v

1 INTRODUÇÃO 1

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL 1

1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS 2

1.3. METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO 3

2 ESTADO DA ARTE 5

2.1. INDÚSTRIA 4.0 5

2.1.1. INTERNET DAS COISAS 6

2.1.1.1. Sensor 7

2.1.1.2. *Gateway* (módulo de agregação de dados de saída) 8

2.1.1.3. Dados 9

2.1.1.4. Processamento e análise de dados 9

2.1.1.5. *Cloud* 10

2.1.2. A INDÚSTRIA 4.0 EM PORTUGAL 11

2.2. MODELAÇÃO BIM 12

2.2.1. CONCEITO 12

2.2.1.1. Industry Foundation Classes 14

2.2.1.2. Nível de desenvolvimento e nível de detalhe 14

2.2.1.3. Norma ISSO 19650 15

2.2.2. O BIM NA CONSTRUÇÃO CIVIL 15

2.2.3. MODELAÇÃO BIM APLICADA A EDIFÍCIOS HISTÓRICOS 16

2.2.3.1. Caso exemplificativo 16

2.3. *DIGITAL TWIN* 17

2.3.1. CONCEITO 17

2.3.2. TIPOLOGIAS 19

2.3.3. FUNCIONALIDADES E VANTAGENS 19

2.3.4. APLICAÇÃO 20

2.3.4.1. Contexto atual 20

2.3.4.2. Casos exemplificativos 21

2.3.4.3. Na Engenharia Civil e Construção 22

2.4. DO BIM AO *DIGITAL TWIN* 22

2.4.1. BASES DE DADOS 22

2.4.1.1. InfluxDB 23
2.4.2. INTEGRAÇÃO IOT 25
2.4.2.1. Xeokit 3D 25
2.4.2.2. Autodesk Tandem 25
2.4.2.3. Project Dasher 25
2.4.2.4. Autodesk Forge 26
2.5. MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS 26
2.5.1.1. Grafana 28
3 CASO DE ESTUDO 31
3.1. OBJETO DE ESTUDO 31
3.1.1. IGREJA DOS CONGREGADOS 31
3.2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO BIM 33
3.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAS 33
3.2.2. MODELO DE TESTE 33
3.2.3. MODELO DEFINITIVO 35
3.3. METODOLOGIA DE MONITORIZAÇÃO 39
3.3.1. EFEITOS DE UMA ESCAVAÇÃO NA PROXIMIDADE DO OBJETO DE ESTUDO 41
3.3.2. SENSORIZAÇÃO 42
3.3.2.1. Sensores de nível 43
3.3.2.2. Sensores de deslocamento 43
3.3.2.3. Clinómetros 44
3.3.2.4. Sensores de temperatura 44
3.3.2.5. Acelerómetro 45
3.3.2.6. Módulo de aquisição e registo de dados 46
3.3.2.7. Módulo de agregação de dados de saída (*Gateway*) 46
3.3.2.8. Router de transmissão remota de dados 47
3.3.3. ASPETOS GERAIS E ORGANIZAÇÃO 47
3.3.4. REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO NO MODELO BIM 50
4 IMPLEMENTAÇÃO DE UM *DIGITAL TWIN* 55
4.1. AQUISIÇÃO, ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS 55
4.1.1. CONSIDERAÇÕES E PROCEDIMENTOS INICIAS 55
4.1.1.1. Influxdb 56
4.1.1.2. Grafana 58
4.1.2. ALGORITMO PARA AQUISIÇÃO E DEPOSIÇÃO DE DADOS 58
4.1.3. PROCESSAMENTO DE DADOS 61
4.1.4. *DASHBOARD* PARA VISUALIZAÇÃO DE DADOS E MECANISMO DE NOTIFICAÇÃO 61
4.2. PROCEDIMENTO PARA A CRIAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO 63

4.2.1.1. Integração dos dados 67

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 69

5.1. CONCLUSÕES 69

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 71

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fluxograma do trabalho realizado 3
Figura 2.1 - Alguns componentes da Indústria 4.0. Fonte: [6] 6
Figura 2.2 - Ligação entre sensores IoT e uma *gateway* IoT 8
Figura 2.3 - Esquema simplificado do fluxo dos dados 9
Figura 2.4 - Exemplo da aplicação do método da média móvel 10
Figura 2.5 - Dimensão do IDES em Portugal (2021). Fonte: [18] 11
Figura 2.6 - Dimensões do BIM 13
Figura 2.7 - Propriedades de uma parede no *software* Revit 13
Figura 2.8 - Especificação do nível de desenvolvimento, AIA. Fonte: [25] 15
Figura 2.9 - Nuvem de pontos para produção de um modelo BIM 17
Figura 2.10 - Conceito base do *digital twin*. Fonte: [30] 18
Figura 2.11 - Partes distintas que compõe o DT. Fonte: [32] 18
Figura 2.12 - Digital twin: tipologias. Fonte: [35] 19
Figura 2.13 - Tipologia Base de dados de séries temporais 23
Figura 2.14 - Formato típico em tabela de uma série temporal de dados. Fonte: [47] 23
Figura 2.15 - Interface para visualização de dados da plataforma Influxdb 24
Figura 2.16 - Exemplo de uma *dashboard* criada na aplicação Grafana. Fonte: [58] 28
Figura 2.17 - Interface de um painel criado no Grafana 29
Figura 3.1 - Fachada frontal da Igreja dos Congregados 32
Figura 3.2 - Vista da capela-mor da Igreja à esquerda. Vista do coro alto à direita. 33
Figura 3.3 - Modelo BIM de teste 34
Figura 3.4 - Representação de um sensor no modelo de teste 34
Figura 3.5 - Modelo definitivo, vista aérea com detalhe da abertura lateral 35
Figura 3.6 - Modelo com componentes transparentes para visualização do interior 36
Figura 3.7 - Objeto sensor 37
Figura 3.8 - Propriedades de um sensor tipo da família "sensor" 37
Figura 3.9 - Propriedades tipo vs. propriedades instância no Revit 38
Figura 3.10 - Posicionamento de alguns dos sensores presentes no interior do modelo BIM 38
Figura 3.11 - Achados arqueológicos encontrados na fase de escavação 39
Figura 3.12 - Mapa representativo da distância entre a Igreja dos Congregados e a zona de intervenção para a construção de uma nova linha de metro. Fontes: [63], [64] 40
Figura 3.13 - Fotografia panorâmica representativa da distância entre a zona da escavação e a Igreja dos Congregados. Data: 01/07/2022 40

Figura 3.14 - Obras que decorrem na zona da praça da liberdade no momento do desenvolvimento da dissertação. Data: 09/06/2022 41
Figura 3.15 - Obras para a construção da estação da Praça da Liberdade. Fonte: [65]..... 42
Figura 3.16 - Sensor de Nível 43
Figura 3.17 - Fissurómetro 44
Figura 3.18 - Clinómetro..... 44
Figura 3.19 - Transmissor e de temperatura e sonda Pt100 45
Figura 3.20 - Nó acelerómetro 45
Figura 3.21 - Módulo de aquisição e registo de dados 46
Figura 3.22 - Módulo de saída (*gateway*) 46
Figura 3.23 - Router de transmissão remota 47
Figura 3.24 - Zonas definidas para a arquitetura de monitorização 48
Figura 3.25 - Disposição dos níveis em altura de instalação dos sensores 48
Figura 3.26 - Referencial adotado para a Igreja dos Congregados..... 51
Figura 3.27 - Face interior da parede de fachada frontal com sensores dispostos..... 52
Figura 3.28 - Disposição de sensores em planta no nível 0 53
Figura 3.29 - Listagem dos diferentes tipos da família sensor criados..... 54
Figura 4.1 - Sequência de procedimentos para domínio das aplicações InfluxDB e Grafana ... 56
Figura 4.2 - Parte do bloco " main " em Python para passagem de dados entre bases de dados 57
Figura 4.3 - Mecanismo de funcionamento do plugin Telegraf. Fonte: [71] 58
Figura 4.4 - Exemplo de um dataframe obtido com a biblioteca *pandas*……57
Figura 4.5 - Código Python para leitura de ficheiro Excel anexo..... 59
Figura 4.6 - Excel em fase de teste para leitura e seleção de canais a partir de um algoritmo . 60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Tipos de sensores presentes no sistema de monitorização..... 42

Tabela 3.2 - Especificações do conjunto de sensores instalados na Igreja dos Congregados.. 49

GLOSSÁRIO E ABREVIATURAS

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
AIA	American Institute of Architects (Instituto Americano dos Arquitetos)
API	Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicações)
BIM	Building Information System (Modelação de Informação da Construção)
CAD	Computer-Aided Design (Desenho Assistido por Computador)
CSS	Cascading Style Sheets
DT	*Digital twin* (Gémeo digital)
DTA	*Digital twin* Aggregate
DTI	*Digital twin* Instance
FEM	Finite Element Method (Método dos elementos finitos)
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HBIM	Heritage Building Information Modeling
HTML 5	Hypertext Markup Language, versão 5
IDES	Índice de Digitalidade da Economia e da Sociedade
IFC	Industry Foundation Classes
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
LOD	Level of Development (Nível de Desenvolvimento)
MSCL	MicroStrain Communication Library
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NoSQL	Not Only SQL (Não Apenas SQL)
PLM	Product Lifestyle Management (Gestão do Ciclo de Vida de um Produto)
REST	Representational State Transfer (Transferência Representacional de Estado)
SQL	Structured Query Language (Linguagem de Consulta Estruturada)
SVF	Serial Vector Format
TI	Tecnologia da informação
TSDB	Time-Series DataBase (Base de dados de séries temporais)
URL	Uniform Resource Locator
VPN	Virtual Private Network (Rede virtual privada)

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

A quarta revolução industrial surge fortemente associada à transformação digital e integra sistemas inteligentes e técnicas de produção inovadoras que produzem efeitos nos modelos de negócio que vão desde o incremento da eficiência de processos de produção e redução de custos derivados à autonomia dos próprios processos. No campo da engenharia, esta transformação avança geograficamente a ritmos diferentes e está significativamente dependente do investimento que é realizado na área da inovação. Difere muito nas diferentes áreas da engenharia e é sobretudo na engenharia mecânica que surge inicialmente o conceito do *digital twin* e que são elaborados projetos que o envolvem.

O foco da presente dissertação recai sobre um pequeno conjunto de novas funcionalidades, no contexto da monitorização de estruturas, que possibilitam a criação de um *digital twin* para a visualização de dados em tempo real inseridos num modelo de BIM, representativo de um edifício localizado na cidade do Porto, com informações e dados provenientes de sensores instalados em pontos estratégicos do edifício. Num nível inferior de complexidade e num caminho paralelo, os mesmos dados são trabalhados e podem ser visualizados numa forma mais comumente utilizada, em gráficos e tabelas. A utilização de dados obtidos a partir de inspeções não destrutivas e monitorizações nesta área não está ainda tão estabelecido e desenvolvido como noutras áreas, divergindo muito entre diferentes tipos de mercado. No entanto, apresenta um enorme potencial que é explorado ao longo de todo o processo relatado no presente documento. De tal forma, num segundo plano e relativamente à criação da ferramenta, é necessário compreender a viabilidade tendo em conta os diferentes níveis de exigência, de acesso a recursos financeiros, humanos e digitais, e a própria evolução da tecnologia e da conetividade. No âmbito da consolidação e demonstração de conhecimento adquirido ao longo do percurso académico, o projeto enquadra-se sobretudo no campo da monitorização de estruturas e da compreensão do efeito de ações, neste caso resultantes de uma escavação e abertura de um túnel subterrâneo, em estruturas históricas existentes na sua proximidade. As áreas transversais a todas as engenharias da programação, da obtenção, processamento e análise de dados e da internet das coisas são fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e a componente de cálculo assume uma relevância menor face aos principais objetivos, apontados no subcapítulo seguinte, 1.2. Este trabalho é realizado no seguimento e em simultâneo com um projeto de monitorização de edifícios históricos adjudicado à Universidade do Porto pela Metro do Porto, S.A., no âmbito da avaliação e observação do comportamento estrutural de quatro imóveis sensíveis localizados na área de influência da Linha Circular do Metro do Porto – Troço Casa da Música / S. Bento. É desenvolvido com a colaboração duma equipa de trabalho composta por técnicos do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da FEUP (LE-FEUP) liderada pelo Professor António Arêde, responsável

pela montagem do sistema de monitorização. São vários os pontos nos quais se recorre a trabalho desenvolvido por esta equipa.

A adjudicação ocorreu a 21 de janeiro de 2021 e um sistema elétrico que monitoriza a Igreja dos Congregados encontra-se em funcionamento desde o dia 23 de dezembro de 2021, tendo sido o período compreendido entre 23 de dezembro de 2021 e 11 de março de 2022 utilizado para a instalação e a validação dos sistemas que visam registar possíveis movimentos estruturais.

1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Apesar de existir um claro objetivo final e concreto que consiste na disponibilização de uma aplicação web que permita a qualquer utilizador com acesso facultado acompanhar informação em tempo real relativa aos parâmetros medidos e derivados por sensores instalados num edifício sob monitorização, o processo pode facilmente ser dividido por etapas com objetivos distintos que acabam por constituir um final que os engloba. São várias as vias possíveis para atingir o propósito visto que não existem limites vincados para a abordagem no que à criatividade diz respeito. O trabalho encontra-se limitado e dependente do tempo de realização do projeto, da capacidade dos agentes envolvidos e do acesso às ferramentas de auxílio e desenvolvimento do programa. O alvo é concreto, mas a forma como a ferramenta final pode ser apresentada dependerá essencialmente daquilo que serão as melhores soluções entre as várias estudadas e testadas. Desta forma, ao longo do procedimento, vão sendo fixados pequenos objetivos intermédios que pretendem compreender a viabilidade das várias soluções adotadas e a forma como estas se podem interligar. As várias peças que se complementam no *digital twin*: modelo BIM, caminhos de comunicação com os dados e formas de visualização dos mesmos e o funcionamento da plataforma que o apresenta funcionam assim um pouco de forma isolada até que se atinja a última fase de desenvolvimento da ferramenta. Pretende-se que a aplicação final seja de acesso simples evitando esforços para a compreensão e interpretação do utilizador que poderá ter ou não conhecimentos relacionados com o funcionamento de uma estrutura daquela tipologia e que funcione de uma forma interativa e dinâmica apresentando a informação de forma objetiva e de acordo com o que o utilizador pretende. É importante concluir que tipo de vantagens derivam do desenvolvimento de uma ferramenta deste tipo e de que forma podemos ir mais além. Para tal, terá de ser abordado e compreendido o ponto atual de desenvolvimento e utilização dos *digital twins*.

De uma forma sintetizada, os objetivos prendem-se com os seguintes pontos:

- Apresentar o estado de desenvolvimento e de aplicação do que aqui se procura implementar;
- Garantir que os dados armazenados para apresentação num *digital twin* são fiáveis e possuem mecanismos confiáveis de aquisição e processamento;
- Disponibilizar um modelo BIM em ambiente web que reproduza fielmente a igreja que representa e onde facilmente se visualizem os dispositivos modelados correspondentes aos sensores instalados;
- Integrar no processo a criação de mecanismos de notificação e alerta, a encaminhar para a equipa responsável pela monitorização, quando ultrapassados valores limite definidos numa fase de interpretação estrutural dos parâmetros avaliados;
- Avaliar a viabilidade para efetuar o procedimento que visa a criação de um *digital twin* em comparação com métodos mais tradicionais de monitorização;

1.3. METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO

As etapas para a criação de um *Digital twin* (DT) estão agrupadas de acordo com aqueles que são os objetivos apresentados no subcapítulo anterior, 1.2. Pelo facto do tempo estar condicionado, é necessário avançar uma etapa de cada vez tendo a certeza de que cada processo está relativamente controlado, isto é, existem neste tipo de trabalho inúmeras incertezas relativas ao funcionamento de cada componente, de tal forma que é desde logo importante garantir a funcionalidade e fiabilidade da ferramenta e para tal devem ser realizados testes de controlo sobre a medição dos parâmetros, sobre a comunicação com os dados e sobre o funcionamento do servidor que permite a existência de uma aplicação em ambiente web. Numa primeira fase, procura-se permitir uma fácil visualização de dados fora do ambiente do DT que constitui uma referência para comparação com aqueles que surgem integrados no modelo e que garante o bom funcionamento dos canais de ligação aos dados. A segunda fase prende-se com a análise dos dados e o possível tratamento para que estes sejam integrados da forma mais objetiva e dinâmica possível. À parte, é desenvolvido um modelo 3D representativo do edifício em análise, para o qual é realizada num último momento a integração e o trabalho sobre as possíveis formas de visualização do DT. O facto de muitos destes conceitos serem relativamente recentes e de não serem abordados no percurso académico de um estudante de Mestrado em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto obrigam a uma relevante componente de pesquisa sobre os temas. Tal pesquisa foi realizada ao longo de todo o processo de desenvolvimento desta dissertação.

Apresenta-se de seguida na Figura 1.1 um fluxograma de trabalhos com aquele que foi o procedimento geral de realização de tarefas ao longo dos meses de desenvolvimento desta dissertação.

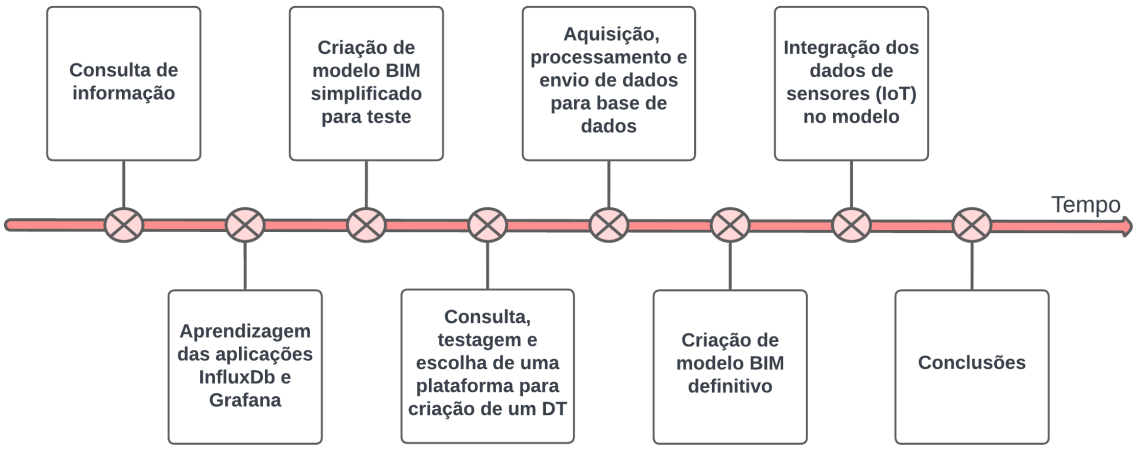


Figura 1.1 - Fluxograma do trabalho realizado

Relativamente à organização do documento, esta dissertação inicia-se com o capítulo atual de Introdução, que apresenta uma vista geral sobre o tópico de desenvolvimento e sobre a organização dos trabalhos. Apresenta os objetivos e contributos a que dissertação se propõe.

O segundo capítulo é referente ao Estado da Arte e cobre alguma literatura que explora os temas que são abordados ao longo de todo o documento, serve de introdução e contextualização do estado dos tópicos mais gerais e essenciais para a criação de um *digital twin*, não aplicados ainda ao caso de estudo. É realizado de uma forma abrangente para que após o capítulo seguinte, de introdução ao caso de estudo, possa convergir, naturalmente, para algo mais preciso e mais focado no caso real abordado.

O terceiro capítulo apresenta o caso real, alvo do estudo, e fornece a base para, em conjunto com os tópicos abordados no Estado da Arte, se poder avançar com o processo para a criação de um *digital twin*. Contextualiza e identifica o edifício e justifica a necessidade de monitorização. Para o mesmo, expõe o desenvolvimento de um modelo BIM. É apresentado o processo de criação de um modelo virtual simplificado numa primeira fase para teste e numa segunda fase para aplicação definitiva, utilizando o *software* Autodesk Revit.

No quarto capítulo, inicia-se o procedimento, com demonstração e apresentação de resultados, do processo para a obtenção da aplicação com o modelo BIM e dados integrados. Na receção, processamento e armazenamento de dados procura-se compreender essencialmente que tipo de informação chega do sistema de monitorização, que tipo de desenvolvimento foi já alcançado fora do ambiente da dissertação e com que objetivo, e define-se uma primeira abordagem para a visualização dos dados através da criação de um *dashboard*, isto é, de um conjunto de painéis gráficos que disponibilizam informação. A aplicação utilizada nesta fase permite estabelecer mecanismos de notificação, quando ultrapassados determinados limites. Os procedimentos para a criação de um *digital twin* apresentam o culminar de todo o trabalho realizado anteriormente com a junção de todas as componentes numa aplicação única. É abordada a forma como, de entre várias alternativas para a disponibilização e apresentação, foi selecionada uma.

Por fim, nas considerações finais, efetuadas no quinto capítulo, são resumidos os resultados e contribuições do trabalho realizado, são apresentados possíveis desenvolvimentos para futuro e são retiradas conclusões acerca do que foi realizado e do que poderia ainda vir a ser realizado.

2
ESTADO DA ARTE

2.1. INDÚSTRIA 4.0

A quarta revolução industrial, também conhecida por Indústria 4.0, define o atual estado de transformação digital, e é impulsionada pelas tecnologias inovadoras que provocam efeitos profundos quer nos sistemas de produção, quer nos modelos de negócio com sistemas complexos mais autónomos, inteligentes e altamente interligados. As principais empresas industriais atravessam uma fase de digitalização das suas funções essenciais na cadeia de valor. Na cadeia de valor vertical, digitalizam funções internas e investem na melhoria dos seus serviços e produtos recorrendo a interfaces digitais com base em dados e informação e na cadeia de valor horizontal digitalizam funções externas que possuem em conjunto com os seus parceiros [1].

Responde a necessidades de flexibilidade que requerem a produção em massa individualizada, isto é, de séries pequenas e com produtos personalizados, e a necessidades de resposta à variabilidade dos mercados. Intervém nos tempos de resposta procurando o encurtamento de ciclos de inovação e de novos ciclos de valor acrescentado e pretende provocar benefícios ao nível da eficiência com o aumento da produtividade, a simplificação de processos e a redução do consumo de energia e recursos [2], [3].

A indústria 4.0 agrega métodos disruptivos como:

- o *Big Data* - armazenamento de grandes quantidades de informação com enorme rapidez que após tratada e analisada facilita a tomada de decisão com maior precisão e confiança;
- as Análises Avançadas (*Advanced Analytics*) - conjunto de métodos e técnicas avançadas para a elaboração de previsões e simulações com base no *Big Data*, que permitem antecipar riscos, tomar decisões e otimizar processos. Foca-se no futuro;
- a Computação na Nuvem (*Cloud Computing*) - sistema cujo armazenamento e processamento é realizado em servidores especializados para os quais o acesso é efetuado remotamente via *internet;*
- a Internet das Coisas (*Internet of Things*) - interligação entre os aparelhos do dia a dia, máquinas, equipamentos de transporte, eletrodomésticos, entre outros, com a Internet, interagindo entre si e reconhecendo o ambiente à sua volta através da utilização de sensores; [4], [5]

e as principais tecnologias que a integram para além das correspondentes a estes métodos, que também podem ser visualizadas na Figura 2.1, são a inteligência artificial, a robótica avançada, a manufatura digital que se baseia na simulação, a visualização 3D, a análise e ferramentas para colaboração aplicadas às definições de processos de manufatura e produto, a manufatura aditiva

que consiste na produção de peças a partir de modelos digitais, a integração de sistemas e os sistemas de simulação.

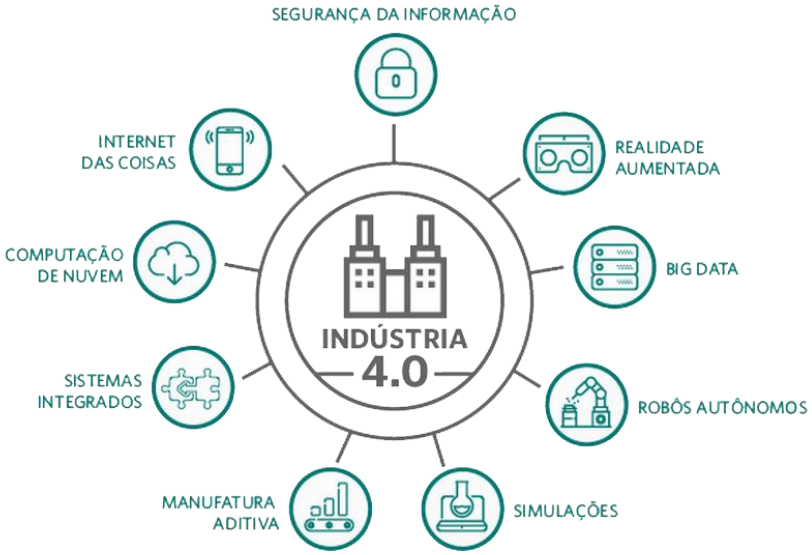


Figura 2.1 - Alguns componentes da Indústria 4.0. Fonte: [6]

No desenvolvimento de um *digital twin*, ainda que surjam várias das tecnologias acima apontadas integradas no processo de criação e disponibilização, é fundamental a compreensão da componente Internet das coisas, visto que se trata da principal responsável por possibilitar a aquisição e transmissão dos dados recolhidos num objeto ou ambiente reais, posterioremente representados de forma digital.

2.1.1. Internet das Coisas

A IoT funciona como uma ponte que faz a ligação entre as pessoas e a *internet*. A sua rápida expansão e diversidade de aplicações está a revelar o potencial da conexão de dados e dispositivos, por *wireless*, que os partilham entre si. Tornaram-se fontes de inteligência que revolucionam a base de muitas indústrias.

O conceito surge em 1999 pelo especialista britânico em tecnologia Kevin Ashton e é mais tarde definida como uma rede de objetos físicos incorporados com sensores para que seja realizada uma recolha e troca de informação entre os objetos. Abre a porta a um enorme conjunto de melhorias que beneficiam colaboradores e empregadores com análises em tempo real para a melhoria da tomada de decisão, para a redução de custos, para a melhoria da produtividade dos trabalhadores e equipamentos e para melhoria do atendimento ao cliente com uma resposta mais objetiva e eficiente. Exige, apesar de tudo, uma complexa infraestrutura de recursos apoiando a sua operacionalização. Os sensores, para além de adquirirem dados do ambiente ou dispositivo no qual estão aplicados, transformam a informação em dados úteis e prontos para serem utilizados pelas pessoas por detrás da operação. Podem coexistir com atuadores que têm a capacidade para alterar condições físicas executando ações para afetar o ambiente, emitindo som, luz e ondas de rádio para além de movimentos. São componentes elétricos, mecânicos e digitais que recebem sinais de sensores para desempenharem funções. Desta forma alteram variáveis como a temperatura, podem desligar a energia, ajustar o fluxo de ar, entre outras ações. A IoT necessita de uma arquitetura de TI de alto nível com várias ferramentas complexas envolvidas, tanto ao nível do *hardware* como ao nível do *software*, que devem funcionar em conjunto com o objetivo de encontrar o melhor funcionamento para o sistema. Para que o tráfego de dados ocorra sem

problema as soluções de conetividade devem procurar alcançar a eficiência, estabilidade e latência da rede. É importante um acesso a uma *cloud* (nuvem), para que os dispositivos comuniquem entre si e para que os dados se unifiquem numa única plataforma.

Com o aparecimento da rede 5G a tendência é para que cada vez mais iniciativas e produtos sejam ligados à rede na mais vasta gama de aplicações que vão desde a saúde e bem-estar à agricultura e pecuária.

2.1.1.1. Sensor

Os sensores possuem a capacidade para a recolha de uma enorme quantidade de informação relativa aos parâmetros do ambiente na área onde são colocados. Funcionam a partir de uma rede *wireless* para a comunicação de um sinal que contém um parâmetro físico medido, convertido e apto para processamento. Este sinal é posteriormente novamente convertido para que possa ser realizada uma leitura por um utilizador. Pode ser composto por vários outros sensores e no caso de ser digital tem três principais componentes:

- o sensor que recolhe os dados do ambiente ou objeto;
- um microprocessador que realiza cálculos computacionais que não são mais do que operações lógicas ou aritméticas entre bits. Contém várias portas lógicas e executa comandos num terminal próprio;
- recursos de comunicação à saída do microprocessador;
- podem ser incluídos ainda transcetores, transdutores, amplificadores, filtros analógicos, entre outros componentes; [7]

Os sensores podem operar com mínima intervenção na estrutura, não exigindo cabos para o funcionamento. A quantidade e qualidade da informação medida pode ser determinada por dois fatores: o número de nós que a recolhem e o número de medidas retiradas por unidade de tempo, por nó, associada à frequência com que o sensor opera. A análise da informação requer que os parâmetros estejam relacionados com o tempo e um dos fatores que mais contribui para o sucesso da operação prende-se com a sincronização temporal dos vários nós [8].

Para que se estabeleça uma ligação entre os vários sensores e entre os sensores e uma nuvem, é necessária uma *gateway* (Figura 2.2).

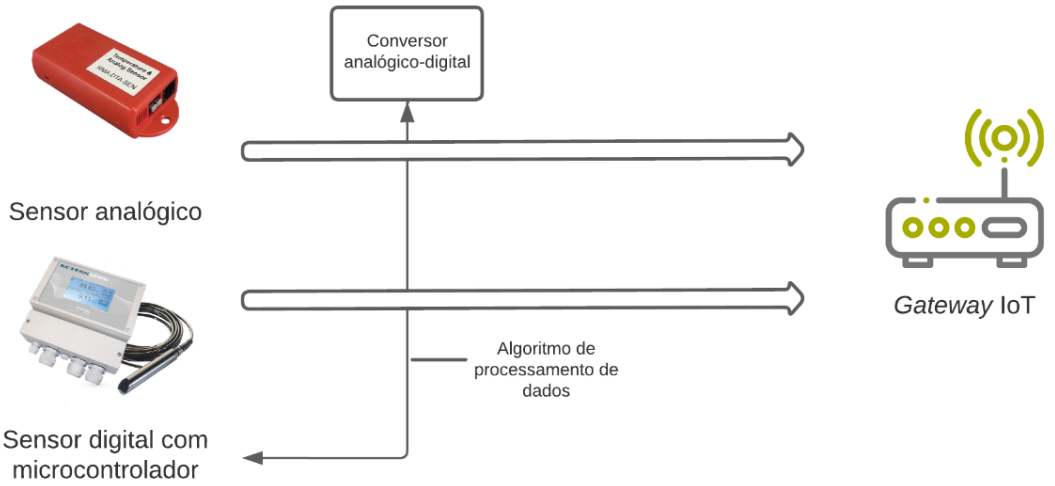


Figura 2.2 - Ligação entre sensores IoT e uma *gateway* IoT

Associados aos sensores e ao software ao qual estão conectados surge a *sampling rate*, isto é, a taxa de amostragem, que consiste no intervalo regular no qual o software efetua o pedido da voltagem do sinal. Corresponde a uma frequência: se a frequência for de 10 Hz em cada segundo serão recolhidos 10 valores. Cada ponto é gravado por um software de análise que contribui para a formação da curva resultante. O espaçamento entre pontos tem um efeito que se reflete na forma como a curva é representada.

Se a frequência de recolha por muito baixa, a informação será perdida e o sinal original não será representado corretamente. Se a frequência de recolha for muito alta, o sinal poderá conter ruído excessivo e o tempo de processamento e utilização da memória de armazenamento aumentarão.

É importante ter em conta a frequência sugerida pelo aparelho. Por vezes vêm acompanhados com uma frequência sugerida para diferentes sinais.

2.1.1.2. *Gateway* (módulo de agregação de dados de saída)

Qualquer sistema IoT necessita de uma forma de conectar os sensores/dispositivos numa nuvem para que os dados possam ser permutados. Uma *gateway* ou módulo de agregação de dados de saída funciona como uma ponte entre os elementos com a qual estes podem comunicar efetuando pedidos. A necessidade da existência desta ponte que torna indireta a comunicação prende-se, entre outros fatores, com o gasto de bateria consumida pelos sensores que incrementa com a distância da ligação. Tal fator é relevante sobretudo quando se trata de dispositivos instalados em áreas remotas. As *gateways* permitem uma comunicação a distâncias mais curtas aumentando o período de vida das baterias. Para diferentes tipos de protocolo na transmissão de dados, isto é, formatos da informação, permitem traduzir todos os dados para um protocolo padrão antes que estes sejam enviados para a nuvem. Podem processar e filtrar dados de forma a diminuir a necessidade de capacidade de armazenamento e reduzem a latência ao permitirem o processamento na *gateway* em substituição do processamento na nuvem [9]. O fluxo dos dados é ilustrado na Figura 2.3.

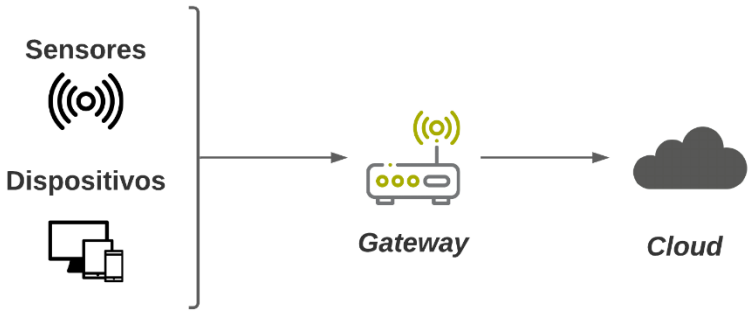


Figura 2.3 - Esquema simplificado do fluxo dos dados

2.1.1.3. Dados

A frase "Dados são o novo petróleo" citada em 2006 por Clive Humby, matemático e empresário britânico na área da ciência de dados, e publicada pelas revistas *The Economist* a 6 de maio de 2017 e *Forbes* a 15 de novembro de 2019 ilustra a importância e o valor que vão sendo atribuídos aos dados no contexto atual. Esta ideia simples está relacionada com a forma como ambos são desprovidos de qualquer valor no seu estado bruto, de como surgem com um grande impacto na humanidade e de como transportam consigo um lado negativo igualmente impactante [10].

Os dados são conjuntos de valores discretos contendo informação e tornam-se relevantes quando são adquiridos em conjuntos fiáveis e completos a partir dos quais é possível realizar um tratamento e definir uma ferramenta de auxílio à decisão. Normalmente são organizados em tabelas para que possuam contexto e significado [11].

A pandemia provocada pelo COVID-19 exemplifica perfeitamente a forma como são fundamentais para se procurem e fundamentem as melhores soluções, neste exemplo, com o objetivo da redução da disseminação do vírus. Ao mesmo tempo exemplifica a forma como uma solução pode ser enviesada pelo desprezo de determinadas variáveis na fase de tratamento e análise dos dados, caso da variável relacionada com a testagem que está naturalmente correlacionada com a deteção de casos positivos.

2.1.1.4. Processamento e análise de dados

Uma informação de qualidade está ligada a um processamento de dados realizado de forma eficiente. Este procedimento ocorre ao longo de diversas etapas e envolve o conjunto do *hardware* que adquire os dados na memória e os distribuí e do *software* que os receciona, analisando-os e tratando-os para gerar informação útil que possa ser compreendida na saída.

A análise de dados representa uma etapa no processamento de dados e nela são retirados valores anómalos que tornem enviesada a série e são realizadas filtragens para correção de inconsistências. Os dados poderão no final ser classificados e organizados de forma a evidenciar o que se pretende em prol dos objetivos estabelecidos [12].

No que à filtragem diz respeito, existem duas categorias principais de filtros. Os analógicos ou de *hardware* que filtram o sinal contínuo antes que este seja convertido para digital. Os digitais ou de *software* filtram os dados após a conversão para digital e armazenamento numa forma bruta.

Os primeiros podem ser úteis quando existe, à partida, conhecimento de que será necessário remover ruído do sinal. Com estes filtros o ruído pode ser removido antes da amplificação, que está associada ao intervalo de valores para os quais o hardware irá procurar informação e tem

efeito direto na resolução. Reduzir a amplitude para o encaixe do sinal melhora a resolução, porém reduzir demasiado pode eliminar picos e desprezar detalhes relevantes. A resolução está relacionada com o número de pontos de dados no eixo vertical y ou com a densidade de dados utilizados para criar uma representação digital do sinal. Não há forma de remover o filtro depois de obtidos os dados armazenados.

Os segundos são aplicados sobre os dados brutos em tempo real ou depois de armazenados. Podem assim ser manipulados em qualquer momento. Os mais comuns são os filtros *low pass* ou *high pass*.

O *low pass filter* permite que sejam gravados sinais com pequenas frequências removendo simultaneamente os de alta frequência. Útil quando existe ruído.

O *high pass filter* permite que sejam gravados somente os sinais de alta frequência eliminando os de baixa frequência [13].

Um método muito aplicado neste contexto e pertencente à segunda categoria é o método da média móvel que no fundo corresponde a uma forma simplificada de um filtro *low pass* onde é controlado o número de entradas que participam no cálculo de um valor médio. A aplicação deste método numa série de dados obtém uma série formada pela média de subséries com n elementos da sequência. Suavizam flutuações curtas e destacam tendências de longo prazo como é visível na Figura 2.4 [14].

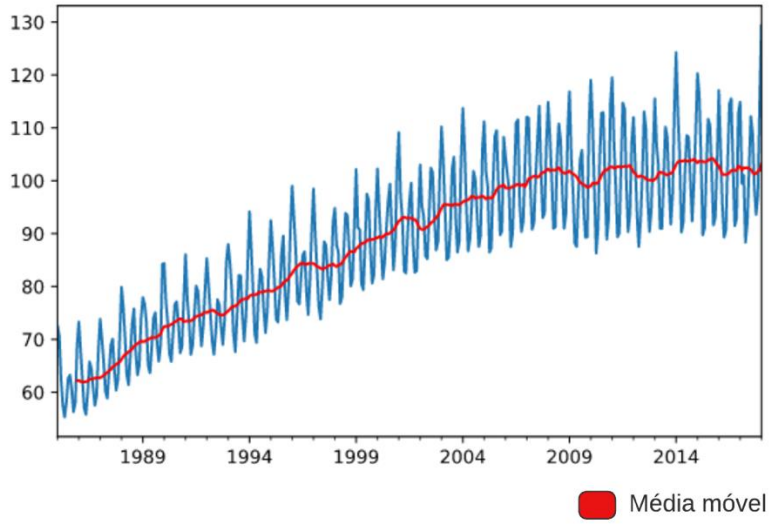


Figura 2.4 - Exemplo da aplicação do método da média móvel

Na aplicação a séries temporais é importante destacar também o filtro de Kalman que estima valores desconhecidos mais precisos que aqueles que são baseados numa única medida através de uma função de distribuição probabilística. Estima a incerteza do valor previsto e calcula a média ponderada entre este valor e o valor medido, sendo o maior peso atribuído ao valor de menor incerteza.

2.1.1.5. *Cloud*

O conceito de *cloud* ou de nuvem se traduzido, é utilizado para descrever uma rede global de servidores remotos, cada um com uma função única. Os servidores estão interligados através de intranets e/ou da internet e devem funcionar como um ecossistema único. Armazenam e gerem dados, executam aplicações e fornecem conteúdos ou serviços como a transmissão de fluxo em vídeos e o webmail. Ao invés de um acesso executado a partir de um computador local ou pessoal,

o acesso é realizado online a partir de um dispositivo conectado com a internet. A informação estará disponível a qualquer momento, em qualquer lugar [15].

2.1.2.A INDÚSTRIA 4.0 EM PORTUGAL

Em Portugal o Ministério da Economia e da Transição Digital integra a iniciativa "Indústria 4.0" resultante de um protocolo assinado em janeiro de 2017 na "Estratégia Nacional para a Digitalização da Economia" e pretende criar condições favoráveis para o seu desenvolvimento, dotando o tecido empresarial de conhecimento e informação, promovendo os fornecedores tecnológicos portugueses e tornando Portugal um polo atrativo para o investimento. Contém um conjunto de 60 medidas de iniciativa pública e privada que se estimava ter impacto sobre mais de 50000 empresas a operar em Portugal. Mais de 200 entidades e empresas, nacionais e multinacionais, estiveram envolvidas no lançamento deste programa [16].

O Plano de Recuperação e Resiliência com período de execução até ao ano de 2026 pretende implementar um conjunto de investimentos e reformas destinados a impulsionar o crescimento económico sustentado do país e contempla uma parcela muito relevante para a aposta na transição digital. As medidas de apoio nesta correspondem a 22% da dotação total do plano.

Apesar deste investimento e dos bons exemplos que vão surgindo, são relatadas grandes dificuldades nas pequenas e médias empresas de cariz mais industrial. Um estudo apresentado no ano de 2022 pela IDC FutureScape, no evento *FutureScape® 2022* cuja informação se apresenta em https://www.idc.com/eu/events/69359-idc-futurescape-2022/, prevê que cerca de metade de todo o investimento a ser realizado até 2025 em Portugal nas tecnologias da informação será orientado para a inovação e para a transformação digital, o que é revelador das prioridades atuais e da falta de investimento passado. O facto de o tecido industrial ser composto sobretudo por pequenas e médias empresas mais dependentes de incentivos e mais cautelosas pesa no compasso de modernização. Perante estas estão ao alcance sistemas já existentes eventualmente adaptáveis e não tanto soluções à medida cujos custos podem ser avultados e incomportáveis [17].

Atualizado em 2021, o Índice de Digitalidade da Economia e Sociedade (IDES) permite comparar os níveis de transição digital na União Europeia e desta forma obter uma noção do posicionamento de Portugal por comparação. Portugal posiciona-se em décimo sexto lugar e apresenta um desempenho acima da média no índice global. Na integração de tecnologia digital, onde se enquadra a ferramenta que se pretende desenvolver com este trabalho, ocupa, porém, o décimo sétimo posto (Figura 2.5).

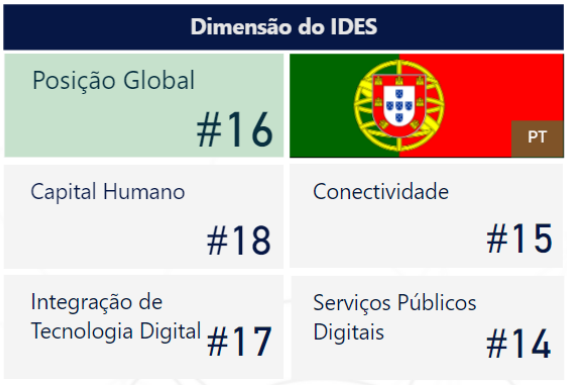


Figura 2.5 - Dimensão do IDES em Portugal (2021). Fonte: [18]

Associada à Internet das coisas num *digital twin*, estará um modelo tridimensional BIM. Para que o conceito de *digital twin* no subcapítulo 2.3 seja facilmente entendido é necessário reunir algum conhecimento em relação à modelação da informação da construção.

2.2. MODELAÇÃO BIM

2.2.1. CONCEITO

A forte evolução do *software* e *hardwar*e disponíveis na atualidade permitiu impulsionar entre outras, a indústria AEC, com a aptidão para a criação de sistemas que privilegiam o fluxo de dados entre múltiplos intervenientes numa ótica de partilha instantânea e de acesso atualizado e facilitado. É nesta perspetiva que surge o conceito de BIM.

Idealizado na década de 70 e utilizado a partir da década de 80, popularizando-se mais tarde com o lançamento de um *whitepaper* da Autodesk, o BIM, *Building Information Modelling*, define-se como o conjunto de ferramentas que permitem desenvolver modelos digitais 3D baseados em objetos e que possuem dados em relação aos mesmos. Armazenam todos os aspetos considerados na edificação de um projeto de uma forma organizada e integrada. De uma forma geral, estas informações são todas as necessárias para a conceção, construção e operação de uma obra e são representadas num modelo virtual, em 3D, de forma embutida nos objetos, sendo que existem informações geométricas e não geométricas como relações espaciais, informações geográficas, quantidades e propriedades construtivas. A informação contida num modelo pode ser categorizada segundo diferentes dimensões (Figura 2.6), que ilustram diferentes níveis introduzidos e que se relacionam com a adaptabilidade do processo e com os usos que o modelo pode ter [19], [20].

- A primeira dimensão define a estratégia ou conceito e inclui os requisitos para troca de informação e o plano de execução.
- A segunda dimensão apresenta desenhos que são no fundo dados vetoriais, como vistas e planos. Constitui a base de todo o processo de construção. Foi a partir desta dimensão e do CAD que se compreendeu a utilidade que as tecnologias poderiam introduzir nos projetos.
- A terceira e mais conhecida, 3D, define a geometria que reúne os dados gráficos e cria modelos que permitem detetar conflitos. O 3D por si só não pode ser considerado como BIM por não ter qualquer tipo de informação associada.
- A quarta dimensão inclui uma componente de gestão da construção ao assumir o fator tempo. Estuda a ligação e escalonamento entre tarefas.
- No 5D definem-se estimativas que abrangem os custos e as quantidades, que se relacionam. Os modelos permitem extrair a analisar custos de diferentes cenários e localizar na linha temporal onde se encontram os mais significativos.
- A sexta dimensão define a performance, que consiste na informação do ciclo de vida, e integra dispositivos IoT e noções de sustentabilidade.

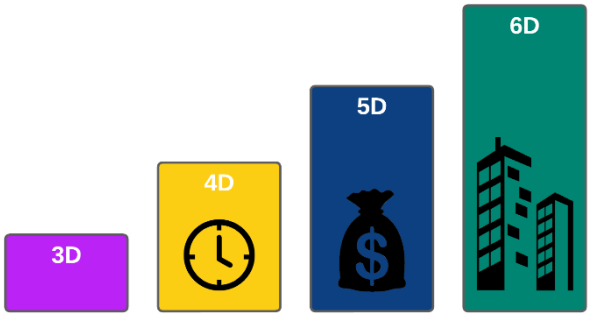


Figura 2.6 - Dimensões do BIM

Para o exemplo de uma parede, é possível especificar, entre outras propriedades, o material, as tramas de superfície, as propriedades térmicas e acústicas, custos de material e de construção e até parâmetros criados pelo próprio utilizador (Figura 2.7).

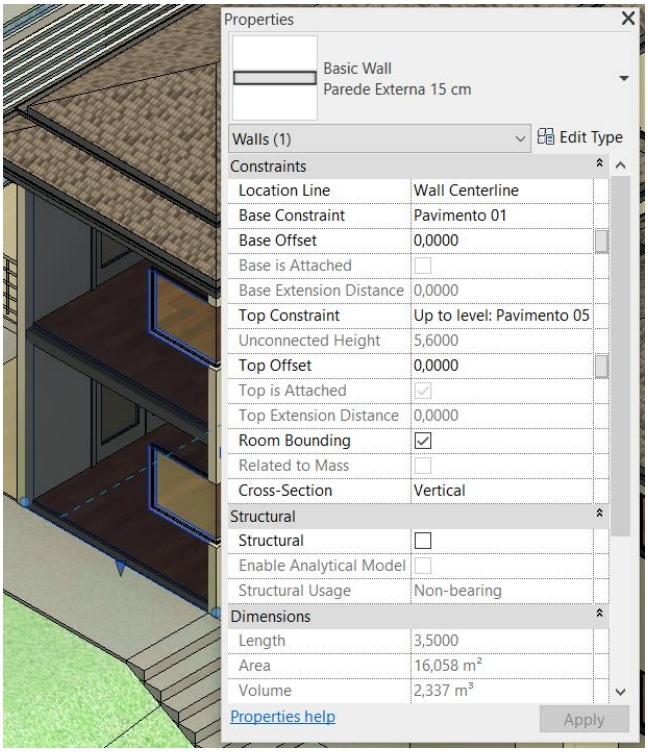


Figura 2.7 - Propriedades de uma parede no *software* Revit

Demonstra-se superior ao projeto 2D, minimizando erros comuns nesse tipo de processo e revela-se a favor de uma melhor gestão, organização e produtividade para um projeto em todas as suas etapas. Numa aplicação típica a conceção do edifício resulta da agregação dos elementos construtivos, tanto em 2D como em 3D, compatibilizados. O facto de idealizar um modelo equivalente ao de uma edificação real permite-lhe reter muitos detalhes relativos à composição dos materiais de cada elemento e permite efetuar simulações e prever comportamentos numa fase de conceção, prévia à de construção. Funciona como um auxiliar de decisão em qualquer momento da fase de conceção e do período de vida de uma obra. O uso desta tecnologia facilita a partilha e discussão de um projeto entre os vários profissionais que intervêm no mesmo.

A modelação no geral pode ser efetuada recorrendo ao auxílio de *laser scanners* ou a fotogrametria [21]. O mais usual é a combinação de ambos os métodos. A fotogrametria é baseada no princípio da triangulação, com imagens capturadas a partir de diferentes pontos. O *laser scanning* permite a captura de alta resolução das texturas dos materiais. É necessário que para esta combinação os dispositivos estejam devidamente calibrados.

Nos últimos tempos há um formato que tem sobressaído consideravelmente no campo da interoperabilidade entre sistemas, isto é, na capacidade de dois sistemas trocarem dados entre si e trabalharem em conjunto como parte integrante de um único, o formato IFC (Industry Foundation Classes). No contexto do BIM é importante garantir a capacidade de transmitir informação entre diferentes plataformas que trabalham sincronizadamente e em conjunto.

2.2.1.1. Industry Foundation Classes

Desenvolvido pela buildingSMART, referência mundial para a evolução da indústria AEC, funciona como ponte de ligações entre aplicações BIM operando também como sistema de classificação para organização e definição do modo de representação da informação [22]. Descreve objetos naquela que é a forma que possuem, a forma como estão ligados e como a informação permuta e se armazena. Permite que cada pessoa envolvida num projeto utilize o software que melhor se adapta às suas necessidades sem comprometer as transferências de informação.

2.2.1.2. Nível de desenvolvimento e nível de detalhe

Por norma e quase de uma forma inevitável, um modelo BIM está associado a um nível de detalhe e a um nível de desenvolvimento que por sua vez estão dependentes e relacionados com aquelas que são as exigências e especificações de determinado projeto. Apesar da diferença entre os dois conceitos é habitual criar-se alguma confusão na distinção. O nível de desenvolvimento (LOD) quantifica a informação que é incluída na parametrização dos elementos modelados, sendo tanto maior quanto maior o número de características disponíveis, enquanto o nível de detalhe define o quão pormenorizada é a modelação dos objetos modelados. É importante que se normalizem os diferentes níveis de desenvolvimento para que as exigências e especificações possam ser claras. Num mesmo modelo podem coexistir objetos com diferentes LOD's [23]. Uma especificação foi desenvolvida pelo Instituto Americano de Arquitetos (AIA), em 2009 e atualizada em 2013, fornecendo definições e ilustrações de elementos BIM em diferentes fases de desenvolvimento e utilização [24]. É composta pelos níveis:

LOD 100 – Elementos de modelo que podem ser representados graficamente ou por símbolos que mostram somente a existência de um componente não incluindo a sua forma, dimensão ou localização precisa

LOD 200 – Elementos passam a ser reconhecidos pelos componentes que representam, com forma aproximada e podendo conter informação não gráfica.

LOD 300 – A quantidade, dimensão, formato e orientação do elemento pode ser retirado diretamente do modelo. A origem do projeto está definida e informações não gráficas podem ser adicionadas ao elemento.

LOD 350 – O elemento é representado graficamente no interior do modelo com um sistema, objeto ou conjunto específico de termos de quantidade, dimensão, formato, localização, orientação, interfaces com outros sistemas de construção, podendo conter informação não gráfica.

LOD 400 – Um elemento é modelado com detalhe e precisão suficiente para a sua produção. A quantidade, dimensão, forma, localização e orientação podem ser retiradas diretamente do modelo. Informação não gráfica pode ser adicionada.

A Figura 2.8 ilustra para o exemplo de parte de uma viga os diferentes níveis de desenvolvimento.

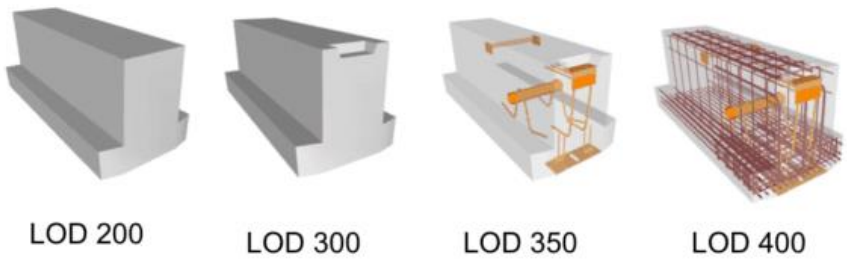


Figura 2.8 - Especificação do nível de desenvolvimento, AIA. Fonte: [25]

Apesar desta especificação permitir facilmente categorizar um modelo BIM, sobretudo tendo em conta que o objetivo deste trabalho nesta componente visa somente obter um modelo que identifique o caso de estudo e as várias posições dos dispositivos que realizam monitorização, é importante dar conta de que esta especificação não estandardizada pode desde 2018 ser substituída pela norma ISO 19650 [26].

2.2.1.3.Norma ISO 19650

Esta norma internacional é composta por cinco partes e pretende regulamentar a aplicação e implementação do BIM. A primeira parte contém uma introdução e constitui uma base de referência conceitual e terminológica para as restantes partes. A segunda e terceira parte abordam as duas fases principais nas quais um ativo é dividido, isto é, a fase de desenvolvimento e a fase de operação e as restantes duas partes cobrem detalhes relacionados com aspetos específicos do fluxo de informações digitais quando se utiliza o BIM.

A parte um contém no capítulo 5 informação relacionada com as exigências ao nível da informação que permitem enquadrar um modelo BIM de uma forma bastante completa e associada a uma componente organizacional, a uma do ativo, a uma do projeto e a uma relacionada com trocas de informação.

2.2.2. O BIM NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Existe uma tendência generalizada na indústria para o acompanhamento e adaptação perante a inovação, no entanto no setor da construção verifica-se alguma relutância apesar das vantagens evidentes, tal como comprova o facto de ser a alteração da lei em vigor o catalisador das mudanças na indústria. O recurso a uma ferramenta como o BIM na construção é representativo de um enorme progresso em comparação com as técnicas previamente utilizadas, no que à qualidade do processo construtivo diz respeito. Proporciona vantagens ao nível da colaboração entre intervenientes, da redução de erros, incompatibilidades, prazos, orçamentação e do aperfeiçoamento do rigor, do planeamento e da fiabilidade do projeto [23].

2.2.3. MODELAÇÃO BIM APLICADA A EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

Na aplicação do BIM a estruturas históricas, designado por HBIM, processo relativamente recente, surgem dificuldades e desafios específicos relacionados com a ausência de informação e com a necessidade de levantamentos sofisticados. Edifícios históricos são caracterizados por possuírem morfologias complexas e heterogéneas, que chocam com os procedimentos estandardizados de um *software* de modelação 3D. Não é possível ainda utilizar mecanismos totalmente automáticos para a modelação desta tipologia de construção. Existem, no entanto, resultados promissores em processos como o da criação da interface de videojogos, por exemplo, com plug-ins desenvolvidos para a criação de objetos inteligentes nas viagens digitais. Os métodos tradicionais de triangulação e fotogrametria digital que permitem obter propriedades geométricas e de textura/material são por norma processos mais dispendiosos nesta tipologia de edificação. A informação necessária para a modelação e análise de edifícios históricos inclui:

- Dados geométricos como dimensões
- Estilo arquitetónico que pode incluir componentes específicos
- Características materiais
- Dano verificado nas fachadas e tipologias de degradação
- Histórico de intervenções realizadas
- Fichas de diagnóstico de danos
- Parâmetros ambientais e seus efeitos

Ainda que se tenham verificado já algumas tentativas para a representação da condição de uma estrutura num modelo BIM, que corresponde ao seu estado de conservação, esta tarefa revela-se difícil visto que a interpretação dos profissionais que fazem a avaliação desempenha aqui um papel muito relevante. Em suma, depende da sua experiência e do seu rigor.

2.2.3.1. Caso exemplificativo

Para a estação ferroviária de Edinburgh Waverley, principal estação ferroviária que serve Edimburgo, foi requisitado à empresa AHR um modelo tridimensional que representasse a cabine para compra de bilhetes e áreas adjacentes para funcionários. Este modelo contemplaria dois pisos e necessitava de incluir o telhado e a área de entrada e saída da estação.

Para uma redução geral de custos e para a diminuição do tempo despendido, através de um alto nível de comunicação entre os membros da equipa de trabalho responsável pelo projeto, a abordagem adotada pela AHR consistiu em produzir um modelo BIM da estação. Foi utilizada tecnologia de *laser scanning* para obter a nuvem de pontos que pode ser visualizada na Figura 2.9 e um modelo foi criado no *software* Autodesk Revit [27].

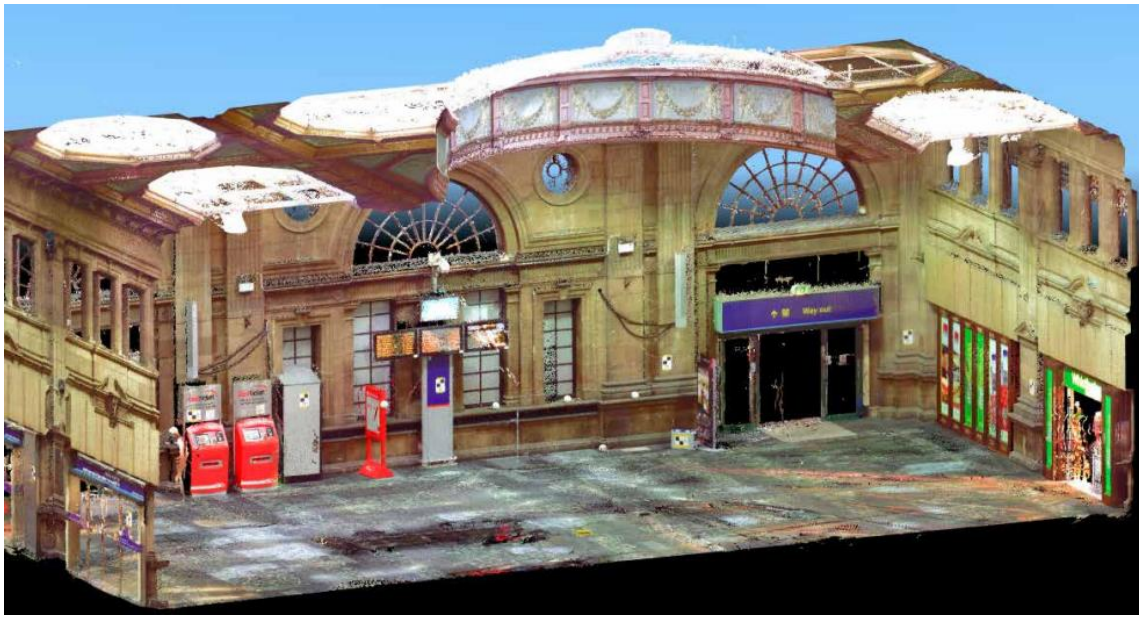


Figura 2.9 - Nuvem de pontos para produção de um modelo BIM

As principais dificuldades que surgem com um edifício desta tipologia, recorrente em edifícios históricos, prendeu-se com as formas irregulares dos objetos e com os detalhes presentes na estrutura, que consequentemente apresentam a agravante de sobrecarregarem os ficheiros com dados geométricos. A geometria é complexa e facilmente colide.

2.3. *DIGITAL TWIN*

2.3.1. CONCEITO

Tecnologia promissora e disruptiva que assume cada vez mais relevância na indústria, teve o seu conceito introduzido em 2010, por John Vickers, tecnólogo da NASA, a partir da visão de produtos inteligentes previamente idealizados, nomeadamente a do engenheiro de computação Michael Grieves, (Universidade de Michigan, 2002) publicitada numa conferência da *Society of Manufacturing Engineers* em Troy, Michigan, e a de David Gelernter na publicação do livro *Mirrors Worlds*. Grieves propôs o conceito dum modelo que acompanhasse a gestão de um produto no seu período de vida [28].

A definição mais utilizada refere um espelho do estado corrente do gémeo correspondente, isto é, do modelo que o representa digitalmente (Figura 2.10), no entanto não apresenta uma definição estandardizada. No fundo, trata-se de uma representação virtual de um produto, processo ou serviço, que abrange o seu ciclo de vida ou parte do mesmo e que é atualizado a partir de dados em tempo real que permitem prever comportamentos futuros e/ou hipotéticos a partir das especificações do presente ou até utilizar perspetivas e especificações futuras para uma simulação do seu comportamento e funcionamento [29].

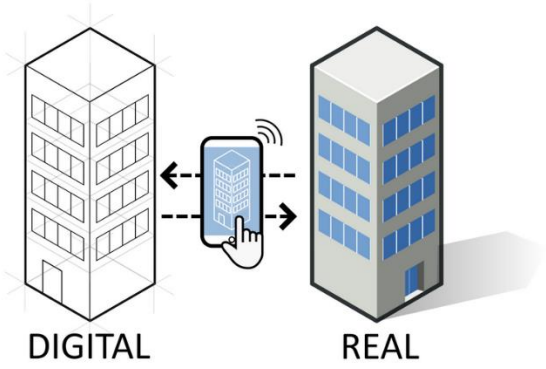


Figura 2.10 - Conceito base do *digital twin*. Fonte: [30]

Utiliza a simulação, aprendizagem, raciocínio de máquina e tecnologia relacionada com o Big Data para auxiliar a tomada de decisão e a informação adquirida é processada com inteligência artificial e computação de nuvem. Apesar de ser um termo bastante desenvolvido em termos teóricos, há falta de casos reais disponíveis para qualquer utilizador que o representem. Tal facto, deve-se sobretudo à complexidade do sistema e ao grande número de funcionalidades que apresenta. Vem ganhando cada vez mais relevância no cenário empresarial, onde se enquadra no processo de transformação digital que este atravessa. As tecnologias que mais marcam as funcionalidades do *digital twin* são a Internet das coisas (IOT), a Inteligência Artificial (AI) associada aos algoritmos que operam sobre os dados e que permitem antecipar problemas e o *Machine Learning* [31].

Pode ser visto como a junção de duas componentes sendo que a primeira componente corresponde à realidade física. É composta pelo sistema físico selecionado e pelo ambiente que se traduz pelos aspetos da realidade física exterior ao objeto. Com base nos resultados esperados a partir do DT são definidas áreas críticas a representar, sobretudo se para as mesmas for necessária ou prevista uma monitorização. A segunda componente diz respeito à representação virtual dos dados adquiridos. O conceito consiste em 3 partes distintas: o protótipo (DTP), associado à componente física, a instância (DTI) e o agregado (DTA), que resulta da agregação de DTI's cujos dados e informação podem ser requisitados (Figura 2.11).

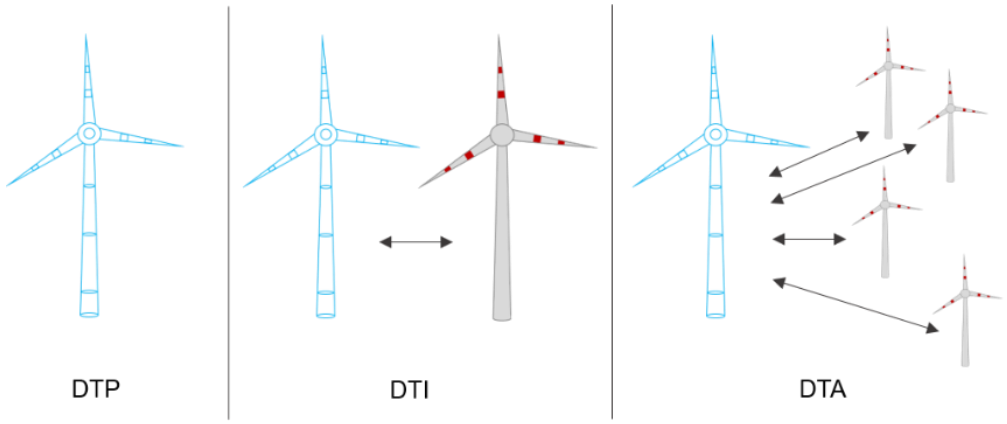


Figura 2.11 - Partes distintas que compõe o DT. Fonte: [32]

Com o aparecimento da Internet das coisas, os *digital twins* tornaram-se mais acessíveis, sendo que têm ambos uma raiz baseada na conetividade no qual é estabelecida uma ligação entre a componente física e a digital que o representa. Esta conetividade é criada por sensores colocados no objeto físico de forma estratégica tendo como finalidade a recolha da informação mais impactante ou que melhor se prende com os objetivos e que consiste em dados relativos a

diferentes aspetos da performance. Podemos tomar como exemplo a recolha de temperatura e condições climatéricas, habitualmente realizada em diversos projetos. Uma vez comunicados, os dados permitem correr simulações no modelo virtual, realizar estudos e análises de performance e gerar possíveis caminhos para melhorias. A componente da realidade física é assim constituída pelo sistema físico determinado para modelação e seu ambiente, isto é, aspetos exteriores que afetam o sistema. A componente virtual é o conjunto de dados e modelos computacionais do sistema e ambientes determinados [33].

Ao contrário de uma simulação, ainda que ambos criem modelos virtuais, um *digital twin* consiste num ambiente, o que o torna consideravelmente mais apropriado para estudos. Em termos de escala, a simulação tipicamente dedica-se somente à avaliação de um processo particular enquanto o DT corre um número de simulações superior em simultâneo para o estudo de múltiplos processos, beneficiando ainda de dados atualizados em tempo real. No mundo digital várias técnicas são estabelecidas para o suporte dos processos de design e de construção. Durante décadas utilizaram-se ferramentas baseadas no *Computer Aided Design* (CAD) e nos elementos finitos (FEM) porém desenvolvimentos recentes como aquele que levou ao surgimento da Internet das Coisas (IoT), uma das novidades mais impactantes e com maior potencial para presente e futuro, têm vindo a revolucionar as metodologias de trabalho na indústria. Estes desenvolvimentos incluem o *Building Information System* (BIM) e o DT, motivados inicialmente pela resolução de problemas e acompanhamento de processos da Engenharia Mecânica. Um dos motivos pelo qual existiu um grande desfasamento temporal entre o aparecimento destas tecnologias na Engenharia Mecânica e na Engenharia Civil pode dever-se ao tempo de vida consideravelmente superior das estruturas em relação ao das aplicações da Mecânica [34].

2.3.2. Tipologias

O tipo de DT adotado depende por norma do nível de aproximação do produto e da área de aplicação. Podem coexistir diferentes tipos num mesmo sistema ou processo (Figura 2.12) [33].

- DT de componente/peça: unidade básica de DT, escala mais aproximada.
- DT de ativos: aplicado no estudo da interação entre componentes que trabalham em conjunto.
- DT de sistema ou unidade: permitem compreender como diferentes ativos interagem formando um sistema funcional.
- DT de processos: de nível macro, revelam como sistemas trabalham em conjunto numa unidade de produção (fábrica).



Figura 2.12 - Digital twin: tipologias. Fonte: [35]

2.3.3. Funcionalidades e Vantagens

Os *digital twins* serão responsáveis pela transformação de múltiplos processos. Elevam de forma considerável a eficiência na pesquisa e design de melhores produtos. Sugerem através da informação ideias que podem provocar um refinamento de um produto numa fase anterior à de produção. Permitem monitorizar sistemas de produção, objetos e processos durante o seu ciclo de

vida ou parte do mesmo, podendo inclusivamente determinar o prazo de validade destes. Permitem ao utilizador interagir com o *digital twin* da mesma forma que iria interagir com o objeto físico real, obtendo perceções fiéis e úteis. Surge na indústria como um elemento de revolução da gestão do ciclo de vida de um produto (PLM), com benefícios ao nível da eficiência. Permite a uma empresa obter uma impressão digital de todos os seus produtos, desde o momento do design ao desenvolvimento e período de vida do produto. Permitem prever/precaver eventos futuros, muitas vezes em substituição de análises do passado do produto [36].

A empresa de consultoria IDC afirma que empresas que realizam um investimento nesta tecnologia são capazes de obter uma melhoria de 30% no tempo do ciclo de vida de processos críticos, tornando assim os tempos de produção consideravelmente mais rápidos. Já a Gartner, empresa de consultoria, prevê que uma aposta nos digital twins permita às empresas industriais uma melhoria de 10% na eficácia da produção.

2.3.4.APLICAÇÃO

Naturalmente não é viável esta aplicação para qualquer tipo de produto criado ou processo. Nem todos contêm a complexidade requerida para que se intensifique a recolha de dados que se verifica com o DT, nem do ponto de vista financeiro é comportável face ao retorno que daqui resulta. Ainda assim, são inúmeros os projetos que podem beneficiar com esta ferramenta: grandes projetos do ponto de vista físico como grandes construções (pontes, estruturas offshore, …) ou construções exigentes, projetos mecanicamente complexos (como equipamento de geração de energia) e grandes cadeias de produção (indústria automóvel). Existem também utilizações realizadas ao nível do planeamento urbano (Singapura é um grande impulsionador nesta vertente).

2.3.4.1.Contexto atual

O *Going Digital Awards*, anteriormente denominado *The Year in Infrastructure Awards* consiste numa competição global conceituada que procura reconhecer os avanços digitais em infraestruturas de todo o mundo. Reúne profissionais de infraestruturas e elementos dos media para que compartilhem métodos inovadores em design, engenharia, construção e operações de projetos em infraestruturas e é aberto a todos os utilizadores do software da Bentley. Entre os finalistas do evento correspondente ao ano de 2021, 36% recorriam à modelação da realidade e estabeleciam bases para digital twins de pesquisa contínua para que pudessem ser constantemente atualizados [37].

Uma pesquisa do ARC Advisory Group indica que a Internet das Coisas, ativos interligados dotados de inteligência e sobretudo os digital twins são responsáveis pelo impacto mais imediato e significativo na forma como as empresas implementam as suas tecnologias. De acordo com um outro estudo realizado em fevereiro de 2019 pelo grupo Gartner, 13% das empresas que implementaram a IoT já utilizavam digital twins e 62% pretendiam utilizar num prazo de um ano [38][39].

A correlação entre a internet das coisas e o *digital twin* que se deve naturalmente ao facto de ser necessária uma recolha de dados para que estes possam integrar um modelo que acompanha o objeto e/ou ambiente que representa leva a que a aposta nesta ferramenta implique inicialmente a instalação de sistemas de recolha de informação. É desta forma nestes meios onde se destaca a indústria da manufatura, que pretende monitorizar os seus equipamentos e obter dados de desempenho das máquinas em tempo real, que se verifica a aposta ou pretensão de aposta nos *digital twins* como ferramenta de auxílio à produção. A evolução da tecnologia de realidade

aumentada contribuirá para acelerar este efeito já que permitirá introduzir os *digital twins* no nosso espaço de trabalho.

2.3.4.2.Casos exemplificativos

São muitas as provas de conceito disponíveis para consulta relativas ao desenvolvimento de digital twins, porém, casos práticos concluídos e em funcionamento são ainda relativamente escassos a menos que se tratem de ferramentas desenvolvidas por empresas que naturalmente não as disponibilizam a qualquer utilizador. Os *digital twins* para apoio a causas públicas são de mais fácil consulta e representam de uma forma geral o conceito que foi aqui apresentado aplicado aos mais diversos meios e fins. Porém, da mesma forma, são muitos os projetos em fase de desenvolvimento tendo em conta precocidade da aposta no *digital twin*. Tomem-se alguns casos como exemplo para que se possa melhor compreender de que forma esta tecnologia pode ser aplicada:

- Para assegurar um uso eficaz do espaço e dos recursos naturais disponíveis no país, a autoridade territorial de Singapura criou um modelo virtual detalhado da malha da cidade que processa um conjunto de mais de 160000 imagens de alta resolução com uma precisão de 0,1m. É o primeiro *digital twin* representativo de uma inteira nação e foram incorporados mais de 24 terabytes de dados que cobrem informação de todas rede viária pública. O modelo permitirá apoiar novas iniciativas e projetos de infraestruturas sustentáveis a nível nacional e foi concluído no início do ano de 2022. Auxiliará também na resposta a desafios como os impostos pelos impactos das alterações climáticas. Os *digital twins*em Singapura são discutidos desde o ano de 2017 e é válido afirmar que cresceram nesta cidade tendo em conta a escala dos projetos que vão sendo realizados e a antecipação com que Singapura se lançou nesta tecnologia comparativamente com o resto do mundo [40].
- Para melhorar a segurança rodoviária em autoestradas espanholas a multinacional de consultoria e tecnologia Indra vai constituir um centro de controlo virtual numa autoestrada em Guadalajara com o objetivo de facilitar operações de manutenção de forma remota. A partir do modelo virtual será possível realizar a gestão do equipamento em tempo real. O projeto procura contribuir para a redução do número de acidentes e custos de manutenção, aumentar a disponibilidade e capacidade da rede e melhorar a eficácia das ações de intervenção rodoviária [41].
- A GE Renewable Energy, fabricante franco-americana de turbinas eólicas, aumentou a produtividade do seu parque eólico em cerca de 20% através da utilização da informação em tempo real adquirida por sensores que alimenta as réplicas digitais de turbinas e sugere designs mais eficientes para cada turbina ativa. É possível combinar 20 configurações diferentes para cada uma e os resultados que se obtêm definem a melhor solução. Trata-se no fundo de um problema de otimização resolvido por um DT [42].
- Com o objetivo de explorar algumas capacidades e oportunidades associadas à tecnologia do *digital twin* e para dar resposta à necessidade de melhorar a eficiência energética dos edifícios, quatro membros da BUILT CoLAB que opera em Portugal no setor AEC desenvolveram um digital twin de um escritório da empresa no Porto através da criação de um modelo BIM com recurso a *laser scanning*, da instalação de sensores e modelação dos seus objetos digitais e da integração dos dados recolhidos no modelo [43].

2.3.4.3.Na Engenharia Civil e Construção

No ambiente da Engenharia civil/construção mais direcionada para as estruturas, em grande parte devido à adoção da modelação BIM, do planeamento, do design e de atividades de monitorização e manutenção, os DT são vistos como uma extensão lógica aos processos. Cargas de serviço, ações ambientais e acidentais são agentes que podem provocar dano numa estrutura/infraestrutura. Em países mais desenvolvidos nesta área, muitas vezes é realizado em conjunto com um projeto de um sistema de monitorização de integridade estrutural (SHM) – envolve a observação e monitorização de um sistema ao longo do tempo, sendo periodicamente calibrado, e envolve a deteção de dano – na fase de construção para assegurar a segurança exigida e procurar reduzir custos. Um processo pode ser executado pelas seguintes etapas: recolha de dados (acelerações, deslocamentos, temperaturas, …), processamento dos dados (modos de vibração, frequências, …), identificação de danos por alterações das condições e elaboração de plano de ação.

2.4. DO BIM AO *DIGITAL TWIN*

Apesar do enorme potencial e de alguns casos práticos, está ainda numa fase inicial a exploração da integração de modelos BIM com tecnologias da IoT.

São alguns os artigos nos quais são realizadas provas de conceito que cobrem este tópico e vão surgindo algumas implementações com casos práticos sobretudo com objetivos como os de monitorização de processos construtivos, gestão de performance energética, planeamento de saúde e segurança e de conforto térmico interior. Ainda que por vezes surja alguma confusão entre os dois, sobretudo pelo facto de ambos representarem modelos virtuais de um objeto, enquanto o BIM é responsável pela construção inteligente, o DT funciona como a ferramenta que trata da gestão da construção [44]. Faz o acompanhamento do estado da construção ao longo de um período com o recurso de informação retirada do ambiente e/ou objeto real e não é imutável. Não exige a intervenção do utilizador para que passe a apresentar diferente informação ao contrário de um modelo BIM.

Para que a integração das tecnologias da IoT num *digital twin* se possa realizar é por norma necessário recorrer a uma base de dados. Apesar de ser possível criar um canal de comunicação direto entre alguns tipos de sensores e um modelo BIM, é importante num *digital twin* disponibilizar um histórico de informação para além daquela que é apresentada em tempo real. As bases de dados possuem a capacidade de armazenamento e de processamento necessária para que os dados sejam manipulados e entrem num canal de comunicação na forma desejada para a apresentação.

2.4.1.BASES DE DADOS

Consistem em conjuntos de arquivos relacionados com registos de forma organizada para que se crie algum sentido e para que possam ser encarados como informação. Constituem a principal componente dos sistemas de informação e segurança [45]. Podem ser de diferentes tipologias, sendo as mais comuns as seguintes:

- Bases de dados relacionais – as mais comuns pela facilidade de armazenamento e pela confiança na informação. Os dados são armazenados de forma tubular, isto é, em colunas, enquanto a descrição fica situada em linhas e atributos. A linguagem destes bancos é baseada no SQL, utilizado com o propósito de manipular e consultar dados, que torna a inserção fácil e recuperável.

- Bases de dados não relacionais – utilizadas quando se pretende um trabalho sobre os dados que não podem ser inseridos na forma de uma tabela (imagens, vídeos e gráficos). Muito valorizados no mercado, dispensam um sistema de relacionamento. A sua linguagem é a NoSQL.
- Bases de dados orientadas a objetos – As informações são organizadas em blocos de com identificadores, sem que haja uma lógica preestabelecida. Imagine-se que se pretende criar um identificador denominado "humano". Para este passamos atributos como "género", "cor dos olhos", "cor do cabelo", entre outros, com os respetivos valores.
- Bases de dados de séries temporais (TSDB) (Figura 2.13) - Uma série temporal consiste num conjunto de observações com dados bem definidos e resultantes de medições ao longo de um período de tempo, indexadas com a correspondente ordem temporal que forma uma sequência de pontos. Uma base de dados de séries temporais (TSDB) é assim um grupo de medições ou eventos monitorizados, armazenados e agregados. Designa-se por "timestamp" a marca temporal no formato de uma cadeia de caracteres que representam a data e/ou hora do evento que ocorreu, como pode ser visualizado na primeira coluna da tabela representada na Figura 2.14. A aplicação Influxdb constitui uma base de dados de séries temporais [46].

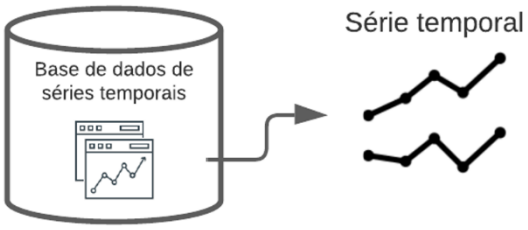


Figura 2.13 - Tipologia Base de dados de séries temporais

date	charter_foreign	total_foreign	charter_domestic	total_domestic
date	bigint	bigint	bigint	bigint
Date	Integer	Integer	Integer	Integer
2008-01-01T00:00:00.000Z	57463	5642057	174692	7394181
2008-02-01T00:00:00.000Z	56651	5053435	142931	6837201
2008-03-01T00:00:00.000Z	95878	6071551	176906	8439191
2008-04-01T00:00:00.000Z	100198	5731709	103054	7467710
2008-05-01T00:00:00.000Z	130720	6003335	88631	7840260
2008-06-01T00:00:00.000Z	196656	6467543	99579	8274573
2008-07-01T00:00:00.000Z	195873	6861571	130766	8971734
2008-08-01T00:00:00.000Z	152848	6895232	77253	8717085
2008-09-01T00:00:00.000Z	88267	5539617	40070	6371669
2008-10-01T00:00:00.000Z	76723	5564387	43003	6520788
2008-11-01T00:00:00.000Z	26671	5128350	50322	6223857
2008-12-01T00:00:00.000Z	30963	5624131	54894	6959043
2009-01-01T00:00:00.000Z	35174	5399479	60652	6805171

Figura 2.14 - Formato típico em tabela de uma série temporal de dados. Fonte: [47]

2.4.1.1.InfluxDB

O InfluxDB é uma plataforma de armazenamento de séries temporais, de código aberto, desenvolvida pela empresa InfluxData. Está programada seguindo a linguagem de programação

Go. Possui a capacidade para a injeção de milhões de pontos por segundo o que se traduz numa enorme precisão e confiança com a recolha dos dados. O Influxdb permite a obtenção de gráficos para a visualização em tempo real através da construção de *queries*, isto é, solicitações de informação efetuadas à base de dados, que retornam uma tabela ou conjunto delas, figuras, gráficos ou resultados mais complexos [48]. Os dados são armazenados em *buckets*, localizações nomeadas onde as séries são armazenadas, com um período de retenção especificado e alterável que dita o período de tempo para o qual os pontos de dados persistem. Na organização dos dados, que permitem a filtragem, é importante conhecer os conceitos associados a esta base de dados, alguns específicos da mesma. Podem ser consultados na documentação online da aplicação juntamente com outros conceitos chave, em https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.8/concepts/key_concepts/ [49], entre os quais se podem encontrar os seguintes:

- Campo (*field*) – são obrigatórios nas estruturas de dados e não são indexados, isto é, a consulta de valores verifica todos os pontos que correspondem ao intervalo de tempo especificado. Os valores correspondem aos verdadeiros dados e estão sempre associados a uma *timestamp*;
- Medida (*measurement*) – descreve os dados armazenados nos campos. São da classe string, sequência de zero ou mais caracteres utilizados habitualmente para representar texto ou uma sequência de bytes;
- Etiqueta (*tag*) – parte opcional da estrutura de dados, úteis para armazenar dados comumente consultados. Ao contrário dos campos, são indexadas para que as consultas apresentem um bom desempenho; [50]

A interface do Influxdb onde ocorre a filtragem de dados e onde se visualiza a informação de forma gráfica pode ser visualizada na seguinte Figura, 2.15.

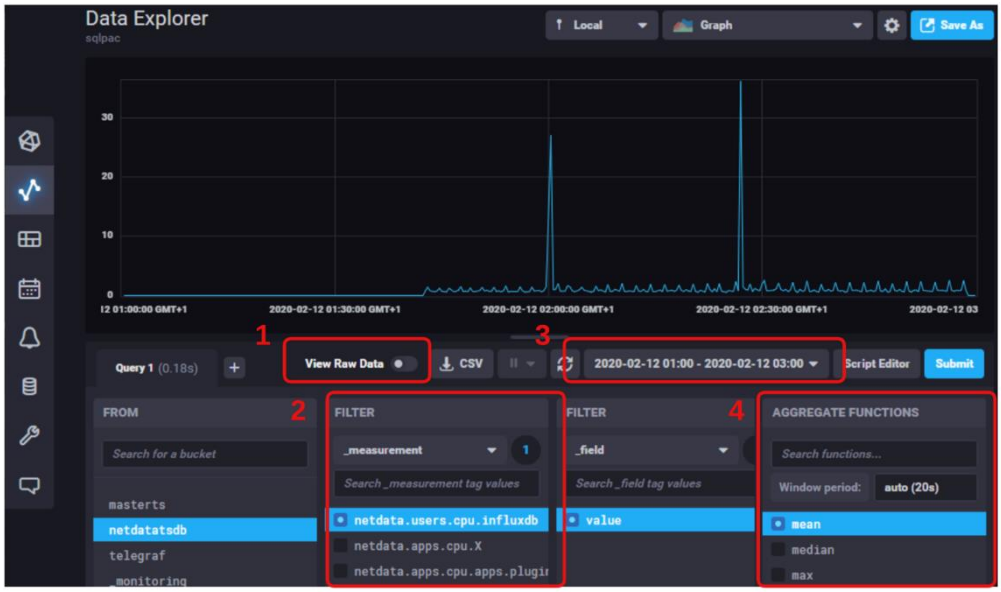


Figura 2.15 - Interface para visualização de dados da plataforma Influxdb

- 1: Permite trocar a janela de visualização gráfica por uma janela de visualização dos dados listados numa tabela, no formato que contém no momento da entrada na base de dados Influx.

- 2: Permite efetuar a filtragem dos dados com base em medidas, campos ou etiquetas. No caso da figura, a opção recaí sobre uma filtragem por medidas, para a qual surgem as medidas disponíveis imediatamente abaixo da seleção "_measurement".
- 3: Permite definir o intervalo de tempo para o qual é desejada a apresentação de dados. É possível pela indexação das *timestamps*.
- 4: Permite definir a forma de agregação dos dados, se tal for necessário ou desejado. A agregação pode conduzir à diminuição da precisão e da confiança na informação e deve ser realizada somente para determinadas situações como necessidade de libertar armazenamento.

2.4.2.INTEGRAÇÃO IOT

A integração toma vantagem das propriedades paramétricas e geométricas dos modelos BIM e das informações em tempo real disponibilizadas pelos dados medidos por dispositivos IoT e cria então o *digital twin* como o conjunto interligado das duas peças.

O processo habitual inicia-se com a aquisição de dados que é dependente do tipo de sensor disponível, que os remete para uma base de dados que pode diferir [33]. São exemplos de bases de saída o Microsoft Excel, MongoDB, Microsoft Azure SQL Database, InfluxDB, etc. Estas bases de dados podem permitir diretamente uma visualização dos dados de forma mais intuitiva e gráfica, ou podem permitir criar pontes de comunicação com aplicações onde estes se tornaram disponíveis de forma mais apelativa. Aqui marca-se uma diferença entre aquilo que é o designado *raw* data, isto é, dados em estado bruto e sob determinado tipo de código e aquilo que é a interpretação da *raw data* pelas aplicações, que permitem criar painéis com estes dados organizados de diferentes formas gráficas e não gráficas com filtragens e agregações [51][52]. Os seguintes pontos são relativos à descrição de aplicações projetadas para a integração de dados e desenvolvimento de digital twins.

2.4.2.1. Xeokit 3D

É um kit de desenvolvimento de *software* de gráficos 3D, de livre acesso, desenvolvido pela Xeolabs e construído para a visualização de grandes modelos numa plataforma browser.

O facto de possuir código JavaScript editável permite a incorporação da IoT, porém poucos progressos podem ser observados nesta componente mais específica por se tratar de algo relativamente recente, criado em 2021.

2.4.2.2. Autodesk Tandem

Plataforma criada a partir de uma base de dados carregada com ficheiros provenientes de ferramentas para modelação como o Revit. Os modelos são agregados e modificam-se conforme alterações detetadas ao longo do tempo. É possível realizar pedidos ao modelo em forma de query para recuperar subconjuntos. É altamente complementar com o Project Dasher, porém encontra-se em fase de desenvolvimento tendo-se este iniciado somente em fevereiro de 2020 [53] [54].

2.4.2.3. Project Dasher

Projeto em desenvolvimento por uma equipa da Autodesk Research utilizando uma plataforma baseada em BIM que permite aos utilizadores visualizar construções com informação gerada em tempo real. Um modelo BIM funciona como o núcleo e o princípio é o de ligar elementos do modelo a fontes de dados externas. Tal implica localizar sensores algures no espaço 3D e utilizar

estas localizações para contextualizar dados da IoT. Existe um demo representativo disponível com um edifício de habitação e escritórios designado NEST e não existe informação relativa à data de lançamento da aplicação. Desta forma, naturalmente, não será possível utilizar a ferramenta para o desenvolvimento de um DT na presente dissertação. Integra modelos e capacidades criadas e disponíveis no Forge para a construção de um DT apesar de ser um projeto que o antecede. As equipas dos dois projetos interagem e trabalham em conjunto para que recursos desenvolvidos para o Project Dasher se tornem desde logo alcançáveis no Forge [55].

2.4.2.4. Autodesk Forge

A Autodesk é responsável pela criação e gestão de uma enorme quantidade de aplicações que partilham entre si determinados requerimentos, como a capacidade de ler e escrever sobre documentos DWG, IFC, render, etc. Perante a inevitável substituição dos computadores pelas *clouds* a empresa reescreveu as funcionalidades do núcleo como um conjunto de serviços disponíveis numa rede global de servidores, a *cloud*, para os quais podem ser realizados acessos via APIs.

O Forge é assim um conjunto de serviços alocados em redes de servidores globais, desenvolvido pela Autodesk, que se torna fundamental para a criação do DT proposto nesta dissertação. É a opção mais desenvolvida para o efeito e sobre a qual existe mais informação. Funciona em ambiente web com um conjunto de APIs para a comunicação entre os vários programas de um computador, a partir de normas web em RESTful APIs, HTML 5, CSS e JavaScript. Possui atualmente serviços para visualização de modelos 3D, para renderização, para gestão de documentos e para conversão de dados. Entre as várias APIs, e extensões, a mais relevante para este estudo é a de visualização de dados designada *Data Visualization*, que permite atribuir mapas de calor e objetos representativos de sensores em comunicação com bases de dados aos modelos associados a qualquer componente ou ponto localizado no modelo. Contém uma linha temporal que permite percorrer os vários *timestamps* recolhidos a partir da base de dados, formando assim um historial de dados. Surgem como fundamentais as APIs de visualização através das quais é realizado o upload de um modelo 3D em qualquer um de 60 formatos aceites pela interface. A API de visualização de dados, *Hyperion Reference App*, foi lançada a 3 de maio de 2021 como um conjunto de ficheiros que integram dados de sensores a partir de serviços de bases de dados em modelos BIM. Há uma aplicação de referência que demonstra estes recursos disponível na ligação https://hyperion.autodesk.io/.

2.5. MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

No âmbito do caso de estudo que será abordado, a monitorização insere-se no contexto da monitorização da integridade estrutural de edifícios históricos, para os quais são específicas as condições de inspeção e de intervenção tendo em conta a degradação temporal dos materiais e a ausência de informação documentada sobre aspetos relativos à construção original e a intervenções passadas. É fundamental para a previsão do comportamento estrutural e para a avaliação do estado de conservação de edifícios desta tipologia.

Na monitorização em geral, a utilização de uma ferramenta como um DT auxilia o processo de agendamento de intervenções de uma forma eficiente, reduzindo o tempo de reparação e o esforço necessário. Permite estimar o tempo de vida restante de uma estrutura. Existem diversas formas de beneficiar dos dados provenientes de inspeções e monitorizações obtidos durante a fase de design e construção assim como durante o período de vida da obra. A maior parte das construções

é composta por um conjunto de diferentes materiais como aço, betão, polímeros, fibras, madeira, etc. e por vezes as quantidades de cada um destes não está bem documentada de tal forma que o estado da estrutura é estimado a partir de inspeções esporádicas. Representar uma estrutura da forma mais realista implicaria reter num modelo todos os aspetos relativos aos materiais, incluindo a composição e deterioração e um modelo com este nível de aproximação micro exigiria o consumo de um período de tempo excessivo e poderia tornar-se ineficiente dependendo do nível de detalhe requerido. Outro ponto relevante relaciona-se com a interação da estrutura com cargas e reações, excitações e deslocamentos a que está sujeita. Sem esta informação o modelo pode acabar enviesado. É importante recolher e analisar os dados das inspeções e monitorizações. Se dados relevantes forem disponibilizados ao longo do tempo de forma periódica, o modelo pode fazer a leitura e análise da informação, atualizando-se, de uma forma que indique o momento e forma ideal para uma intervenção. Uma manutenção preditiva reduz esforços e custos e os níveis de eficiência aumentam [56]. A obtenção de dados de diferentes áreas do objeto é crucial para estabelecer um modelo válido, sobretudo a nível estrutural. Combinações de sensores são também necessárias para a distinção entre comportamentos normais e anormais da estrutura. Diferenças naturais da temperatura ambiente entre os diferentes constituintes de uma estrutura provocam diferentes expansões e retrações que podem provocar elevados valores de deformação. Os melhores pontos para a colocação dos dispositivos de aquisição de dados não se devem basear somente no palpite e na experiência, mas em modelos numéricos e algoritmos que determinem as melhores localizações, sob determinadas condições.

Os edifícios históricos apresentam um papel importante na cultura de um determinado local e tendo sido expostos a longos períodos de tempo são especialmente sensíveis em relação a possíveis intervenções. Mantê-los o mais intactos possível é um fator crítico para a sua integridade. Eventos como terramotos, condições climáticas extremas e vibrações induzidas no terreno por fatores externos constituem um risco de grande relevância para estas estruturas. A escolha da melhor estratégia para as medições fornecidas pelo sistema de monitorização é crucial e deve ser encontrado um equilíbrio e compromisso entre aquela que é a informação necessária, a complexidade do sistema e a obtenção das medições e custos relacionados. A dificuldade na modelação de edifícios históricos apresenta uma agravante que se traduz na dificuldade de fixar limites apropriados de segurança com base nas previsões do modelo, de tal forma que registos de longo termo, completos, podem e devem ser tidos em conta para este objetivo, detetando alterações em alguns dos parâmetros obtidos nos registos.

A monitorização pode assim ser alcançada recorrendo a uma rede de sensores conectados com uma rede wireless, sistema com capacidade para adquirir informação de forma rápida e confiável, com mínima evasão arquitetónica e sem interferir com as condições de operação normais das construções, sendo ainda assim necessário numa primeira fase um levantamento detalhado de todos os danos observáveis e documentados. Entre os principais parâmetros habitualmente medidos, estão deslocamentos, deformações e temperaturas e o foco recaí sobre o movimento da estrutura [56][57].

Para que a informação recolhida possa ser visualizada imediatamente após a instalação dos dispositivos e enquanto um *digital twin* é desenvolvido, pode ser criada uma ligação entre os dados recolhidos e uma plataforma de visualização. A plataforma de visualização exige um menor esforço e tempo para que se torne operacional e é importante que a monitorização possa ser realizada a partir do momento em que a informação está disponível. Estão há mais tempo estabelecidas como ferramenta de monitorização e as plataformas existentes tornam-se mais facilmente e mais rapidamente operacionais, contendo em muitos casos funcionalidades muito úteis de manipulação dos dados. O Influxdb, referido atrás, embora consista numa base de dados

permite a visualização numa janela denominada “Data Explorer”. Apesar de tudo não apresenta tantas funcionalidades como outras aplicações disponíveis online. Entre as mais utilizadas para o efeito estão o Microsoft Power BI, o Qlikview, o Google Data Studio, o Grafana, entre outros. Pela facilidade com se cria uma ligação entre o Influxdb e o Grafana, isto é, um caminho de transição de informação, visto que o segundo disponibiliza um plugin para esta conexão reconhecendo a linguagem Flux da base de dados (uma solicitação em Grafana pode ser realizada recorrendo à linguagem da base de dados Influxdb) e pelos casos de estudo disponíveis online onde estas plataformas surgem interligadas, é importante destacar aqui esta plataforma de visualização que pode ser utilizada para a monitorização de estruturas.

2.5.1.1. Grafana

Trata-se de uma aplicação web de código aberto, fator importante para a escrita de plugins, que permite efetuar solicitações (*querys*), visualizar dados e criar alertas tornando-se assim possível realizar análises e monitorizar dados ao longo de períodos de tempo. Pode ser conectada com múltiplas fontes de dados como são exemplo o Influx DB, Prometheus, Graphite, MySQL, etc.

Tem vindo a ganhar popularidade na indústria e tem sido utilizado por grandes empresas como a Paypal, o eBay e a Intel [58].

O ambiente da visualização da informação designa-se “dashboard” e é altamente personalizável. É formado por um conjunto de painéis e apresenta-se como um quadro geral no qual os painéis podem ser apresentados com a forma, dimensão e localização desejada. A *dashboard* será a primeira interface de monitorização, quando esta aplicação é utilizada, através da qual esta pode ser realizada de uma forma relativamente fácil e rápida atendendo aos valores medidos em tempo real e ao histórico graficamente apresentado. Tudo isto dependerá ainda assim de como o quadro é montado. Pode ser observado o exemplo de uma *dashboard* na seguinte Figura 2.16:



Figura 2.16 - Exemplo de uma *dashboard* criada na aplicação Grafana. Fonte: [58]

Cada um dos painéis adicionados possui interface própria na qual podem ser definidas inúmeras propriedades, entre as quais o tipo de painel (onde surgem como opções séries temporais, gráficos de barras, medidores Gauge, tabelas, mapas de calor, histogramas, etc.), diferentes formas de legendar os dados, mecanismos próprios de alerta, unidades dos parâmetros avaliados, entre outras opções. É importante destacar a forma como é criada uma ligação com a fonte de dados. No interior de cada painél existe uma zona específica de “query”, isto é, de realização de pedidos, na qual é escolhida a fonte de dados para a recolha, são preenchidas opções relativas à frequência de recolha, são criados alertas para determinadas situações nas quais valores limite são atingidos

e fundamentalmente para a introdução do código que faz a seleção, agregação e filtragem dos dados. Este código está relacionado com o tipo de fonte selecionada. Quando a fonte Influxdb é selcionada o código pode ser introduzido no mesmo formato que é utilizado na base de dados, isto é, em Flux. A seguinte Figura 2.17 ilustra a interface própria de um painel.



Figura 2.17 - Interface de um painel criado no Grafana

- 1: Local de visualização dos dados selecionados
- 2: Definição da fonte de dados
- 3: Opções para a solicitação
- 4: Local para introdução do algoritmo que determina os dados que chegarão da fonte e a forma como serão disponibilizados

O Grafana permite definir uma taxa de atualização para que a solicitação à base de dados seja realizada e o valor medido chegue no intervalo definido para a taxa. A taxa mínima corresponde, por padrão, a 5 segundos mas pode ser reduzida através de alterações simples ao nível dos ficheiros de configuração da aplicação.

3
CASO DE ESTUDO

3.1. OBJETO DE ESTUDO

Para o desenvolvimento de um *digital twin* seria necessário, no mínimo, um conjunto de dados disponibilizados em tempo real para integração num modelo virtual representativo de um objeto real ou hipotético. Em articulação com o projeto liderado pelo Professor António Arêde, no âmbito da monitorização de edifícios históricos na área de influência das obras da Linha Circular do Metro do Porto – Troço Casa da Música / S. Bento, que ocorre em simultâneo com esta dissertação, foi possível aceder a um conjunto de dados reais resultantes da instalação de um sistema de monitorização.

O objeto adotado para o estudo corresponde a um edifício entre quatro monitorizados pela equipa, o da Igreja de Santo António dos Congregados situada na Praça Almeida Garret, na cidade do Porto.

3.1.1. IGREJA DOS CONGREGADOS

Foi concluída no ano de 1703, cerca de 9 anos após o lançamento da primeira pedra e é anexa ao convento da Congregação do Oratório, situando-se num local onde existia previamente uma capela dedicada a Santo António datada de 1662. Possui planta em cruz latina, é composta por nave única e capela-mor retangular (Figura 3.2, esquerda). Os telhados são de duas águas e a fachada principal possui dois registos de cornija saliente, o primeiro em cantaria de granito e o segundo ritmado por pilastras. Entre as molduras das janelas existem azulejos lisos amarelos e na restante superfície envolvendo os vãos, painéis de azulejos azuis e brancos alusivos à vida de Santo António. Os painéis interiores foram colocados somente no ano de 1927. No interior o coro-alto assenta em três arcos sobre colunas jónicas estriadas tendo o subcoro dois altares de mármore (Figura 3.2, direita) [59].



Figura 3.1 - Fachada frontal da Igreja dos Congregados

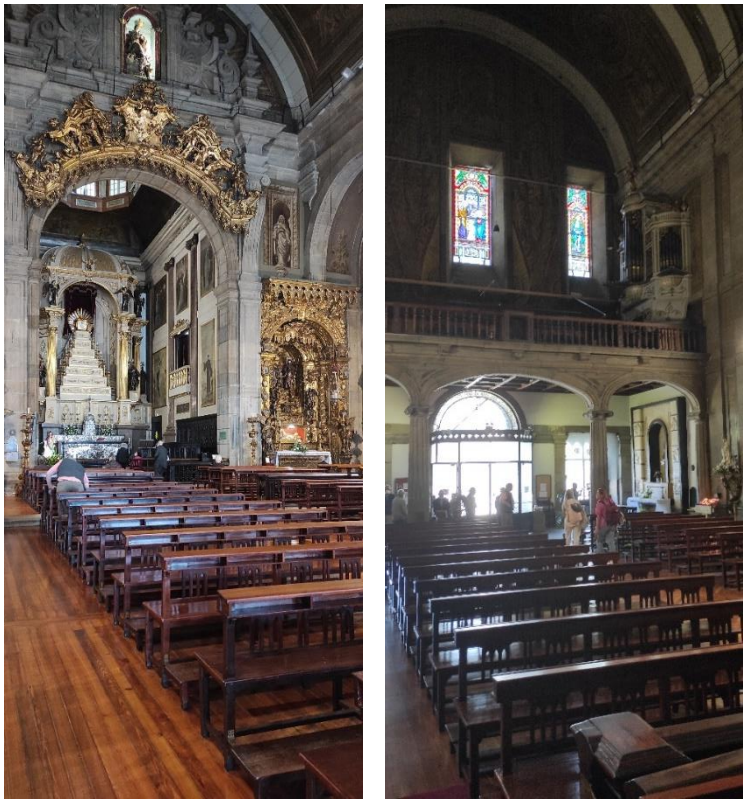


Figura 3.2 - Vista da capela-mor da Igreja à esquerda. Vista do coro alto à direita.

3.2.DESENVOLVIMENTO DO MODELO BIM

3.2.1.CONSIDERAÇÕES INICIAS

Será imperativo criar um modelo virtual 3D que represente a Igreja dos Congregados visto ser este um dos elementos que compõe o *digital twin*. É necessário numa fase inicial escolher o *software* onde a Igreja será criada e fixar um nível de detalhe mínimo.

A escolha do programa a utilizar para a modelação recai sobre o Autodesk Revit, *software* de BIM amplamente reconhecido no mundo da arquitetura, do urbanismo e da engenharia que permite exportar ficheiros em diversos formatos, entres os quais o IFC que é importante para o *upload* numa plataforma web que será apresentada mais à frente na presente dissertação. Ambas as ferramentas pertencem à mesma empresa e desta forma minimizam-se problemas de compatibilidade.

O nível de detalhe, tendo em conta que se trata sobretudo de uma prova de conceito e acima de tudo, para que não sobrecarregue a plataforma, será o de um modelo básico que reproduza aproximadamente a forma geométrica da Igreja e que a permita identificar e nela localizar objetos representativos de sensores, não entrando no detalhe da definição exata dos materiais ou de geometrias mais específicas. Funcionará como um modelo de casca no qual serão representados os sensores. Na especificação do AIA, o nível de desenvolvimento deverá corresponder ao de um modelo situado entre o LOD 200 e o LOD 300.

3.2.2.MODELO DE TESTE

Não tendo ainda sido definida a plataforma para o desenvolvimento da aplicação web, mas sendo necessário um modelo para a incorporação e teste, existem duas opções viáveis para que este

passo seja realizado: pode ser utilizado um modelo genérico duma biblioteca livre disponível online, ou pode ser criado um modelo genérico de raiz. Para que o modelo de teste possua um pequeno objeto representando um sensor (Figura 3.4), e para que a própria criação e exportação do modelo sejam testadas, foi criado um modelo simples (Figura 3.3), e posteriormente foi exportado para o formato IFC. A partir deste ponto estaria apto para integrar uma aplicação.

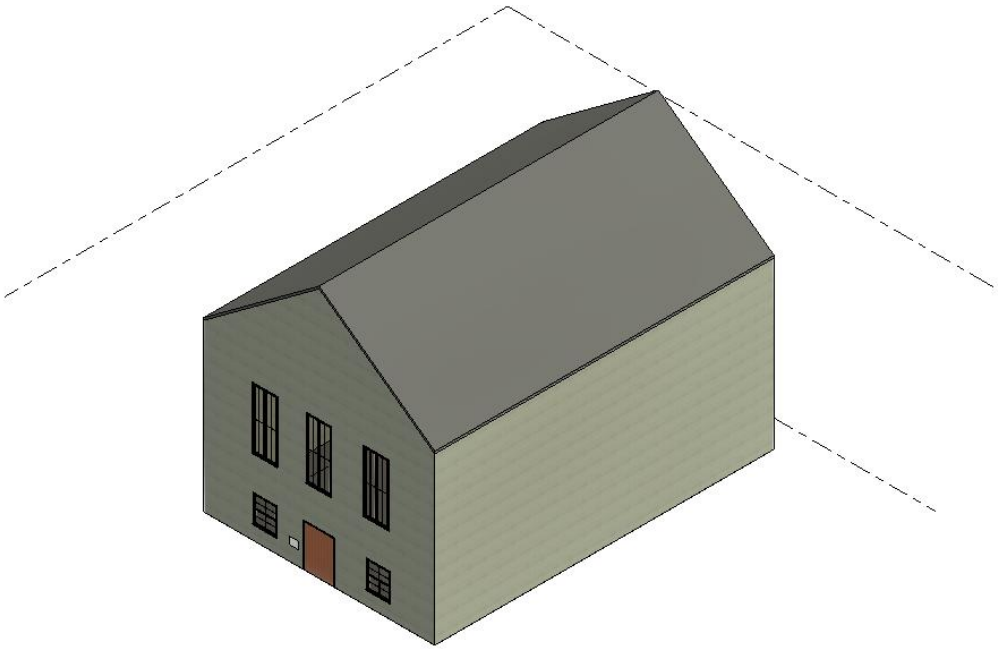


Figura 3.3 - Modelo BIM de teste

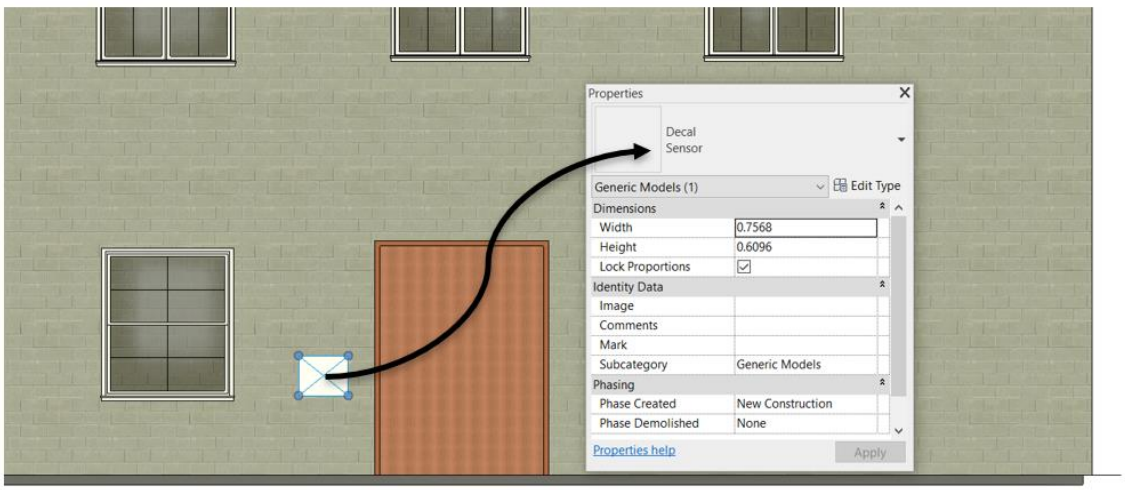


Figura 3.4 - Representação de um sensor no modelo de teste

As propriedades deste modelo não são relevantes para o processo em causa, não foram tomadas medidas de referência nem foi procurada a criação de um edifício geometricamente viável. A única intenção nesta fase foi desenvolver um modelo esteticamente apelativo e introduziram-se janelas e uma porta como objetos de famílias disponíveis na versão de padrão do Autodesk Revit para que fosse obtida alguma semelhança em relação à Igreja de Santo António dos Congregados. No modelo definitivo, que exigirá um maior período de preparação, será tido em conta o detalhe

e desenvolvimento e passará a existir um objetivo relacionado com a obtenção de um edifício que represente verdadeiramente a Igreja.

3.2.3. MODELO DEFINITIVO

O modelo definitivo foi produzido somente após a opção pelo conjunto de serviços da Autodesk Forge, descritos no subcapítulo 2.4.2.4, para reprodução de um *digital twin* e após a testagem do funcionamento do modelo de teste na plataforma. Foi necessário compreender se seria a melhor opção, até porque a criação do modelo pode estar condicionada pelo tipo de procedimento que seria executado mais tarde. Estando interligados processos adjacentes, é necessário um jogo que permita procurar a melhor solução geral a partir da melhor solução para cada um e para a forma como se relacionam.

O modelo foi criado a partir de um outro formulado no Autocad 3D pela Doutora Susana Moreira da equipa de trabalho responsável pela monitorização e foi inserido num projeto de Revit como uma família. A partir desta, foi modulado em sobreposição um edifício com as principais componentes, com as mesmas dimensões e disposições, foram inseridos alguns detalhes e foi excluído o modelo importado inicialmente que serviu de base para a construção de um novo. Em termos de definição e aproximação deste modelo, e utilizando a classificação do AIA, o nível de desenvolvimento corresponderá a um modelo próximo do LOD300. Ao modelo final foi retirada toda uma parede lateral, para que o interior da Igreja fosse facilmente visualizado, local onde se encontram dispostos os vários sensores (Figura 3.5). Inicialmente a ideia seria adicionar transparência a objetos do modelo (Figura 3.6) e desta forma facilmente se identificariam os dispositivos, porém no processo de exportação para a plataforma da Autodesk Forge esta transparência é desprezada e o modelo disponível na web coloca todos os objetos opacos por predefinição.

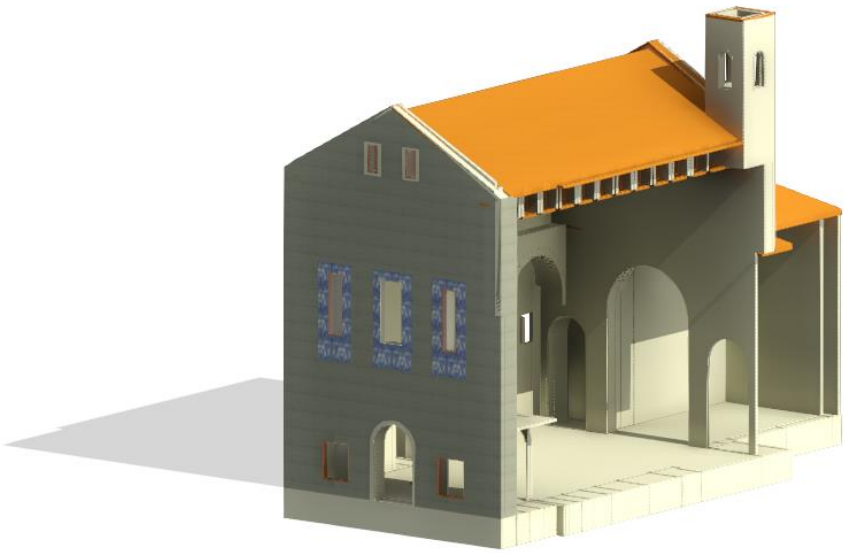


Figura 3.5 - Modelo definitivo, vista aérea com detalhe da abertura lateral



Figura 3.6 - Modelo com componentes transparentes para visualização do interior

Poderia ser criada uma opção em código JavaScript, no Autodesk Forge, que permitisse ocultar determinado elemento de uma outra forma, porém tal opção não foi considerada indispensável para o projeto corrente, para os quais os objetivos são outros. Neste tipo de projeto, o foco recaiu sobre os principais objetivos e opções que valorizassem a ferramenta seriam apenas consideradas como propostas para desenvolvimentos futuros, no capítulo de conclusões. O processo para a criação do modelo exigiu alguma consulta de fóruns relacionados com o *software*, sobretudo para a construção a partir de um modelo 3D criado em AutoCAD num formato que permitiu somente a introdução como um objeto [60]. Para tal, o encadeamento de tarefas consistiu em:

1. O modelo de CAD 3D foi introduzido no seu formato original num template de massa métrica existente por padrão no Revit;
2. Foi criado um novo projeto, para o qual foi importado o modelo CAD a partir da aba da massa métrica onde este se encontrava, com a opção “Load Into Project”;
3. Foram convertidos componentes existentes no modelo que consiste num objeto único, isto é, com uma agregação total de todas as partes, através da seleção de elementos como paredes;
4. Foram criados novos objetos em sobreposição a elementos adjacentes do modelo de CAD ou realizando a ligação entre estes;
5. Foram criados dois telhados para a igreja visto que a da capela-mor não realiza uma ligação direta com a do salão principal;
6. O modelo previamente carregado que serviu de base para o desenvolvimento de um novo foi eliminado;
7. Com o objetivo de facilitar a visualização dos sensores foram eliminados alguns elementos como portas e uma parede lateral, do lado direto em vista frontal que corresponde a Este;

Para a introdução de sensores e com base num trabalho de dissertação elaborado por Sylvia Akro, para obtenção do grau de metre no Mestrado Europeu em Modelação da Informação da Construção, BIM A+, chegou-se à conclusão de que estes deveriam ser introduzidos sob a forma de uma família com propriedades coincidentes entre os objetos da família e os sensores na base

de dados que integrariam o modelo na aplicação [33]. Para esta correspondência será utilizado um identificador único para cada canal, isto é, uma chave que se limita a cada um dos canais e que provém do nome real do sensor. O processo para a criação e introdução dos sensores efetuou-se da seguinte forma:

1. criação de uma família designada "sensor" num modelo genérico de Revit com modelação de um pequeno objeto que a represente (Figura 3.7).
2. criação dos diferentes elementos representativos dos sensores como tipos, dentro da família "sensor" com propriedades de tipo e de instância que variam.
3. importação e anexação dos elementos no modelo, nos pontos de localização reais destes na Igreja.

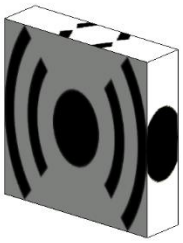


Figura 3.7 - Objeto sensor

Na Figura 3.8 é visível a forma como um objeto contém uma chave de identificação única no campo *"*SensorName *(*default*)"*, do grupo "identity data" dentro de um tipo da família (no caso toma-se como exemplo o sensor CL1.M3 correspondente a um clinómetro). No interior do grupo "Green Building Properties" encontra-se representada a unidade de medida do parâmetro avaliado, inserido manualmente como parâmetro tipo da família.

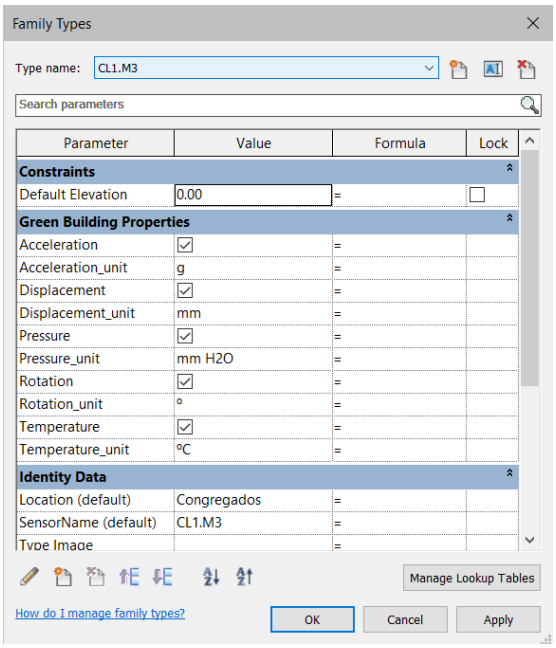


Figura 3.8 - Propriedades de um sensor tipo da família "sensor"

É aqui importante destacar aquela que é a diferença entre um parâmetro tipo e um parâmetro instância. O primeiro contém um conjunto de ocorrências e funciona como uma espécie de catálogo com múltiplos itens e permite modificar o valor de um parâmetro que se aplica a todos os elementos, isto é, as propriedades para todas as ocorrências não variam. O segundo permite modificar o valor separadamente para cada instância, diz respeito a um item do catálogo (Figura 3.9) [61].

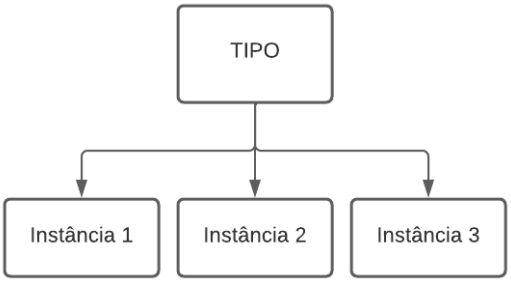


Figura 3.9 - Propriedades tipo vs. propriedades instância no Revit

A família de sensores é exportada para o projeto que contém o modelo da Igreja e estes são posicionados nas localizações reais com base em informação disponibilizada pela equipa encarregue da monitorização (Figura 3.10). A implementação dos objetos representativos dos sensores será relatada com maior detalhe após a discussão da metodologia da monitorização na qual são apresentados vários fatores fundamentais para este passo, no subcapítulo 3.3.3. Neste ponto, o modelo encontra-se finalizado e pronto para integrar uma aplicação web.



Figura 3.10 - Posicionamento de alguns dos sensores presentes no interior do modelo BIM

3.3. METODOLOGIA DE MONITORIZAÇÃO

A construção de uma nova linha de metro na cidade do Porto, a linha rosa, irá induzir durante a fase de construção e de serviço efeitos sobre o edificado da vizinhança, com ações resultantes sobretudo de grandes escavações e de vibrações das máquinas na fase de construção e da passagem do metro pela linha na fase de exploração. Sendo uma obra de larga extensão, é necessário analisar ao longo de todo o seu traçado que tipo de construção existe e que tipo de consequências podem ser provocadas pela obra. Para zonas determinadas como críticas, pode ser requisitada a monitorização, como é o caso de zonas com património histórico contidas na área de influência, grupo no qual é integrada a Igreja dos Congregados.

A linha rosa é formada por quatro estações e cerca de três quilómetros de via, 2.45 operacionais, ligando o São Bento e a Praça da Liberdade à Casa da Música. É parte inicial de uma circular interna que fará a ligação com os restantes eixos da rede, mais concretamente com as linhas azul, vermelha, verde, violeta e laranja. Serve polos de ensino, saúde, cultura e artes e prevê conclusão no final do ano de 2023, porém achados arqueológicos inesperados encontrados durante o período de escavação (Figura 3.11) podem atrasar o fecho da obra [62].



Figura 3.11 - Achados arqueológicos encontrados na fase de escavação

A zona de intervenção que mais se aproxima da Igreja dos Congregados dista da fachada frontal desta cerca de 75 metros e situa-se na interseção da rua dos Clérigos com a Praça da Liberdade (Figuras 3.12 e 3.13).

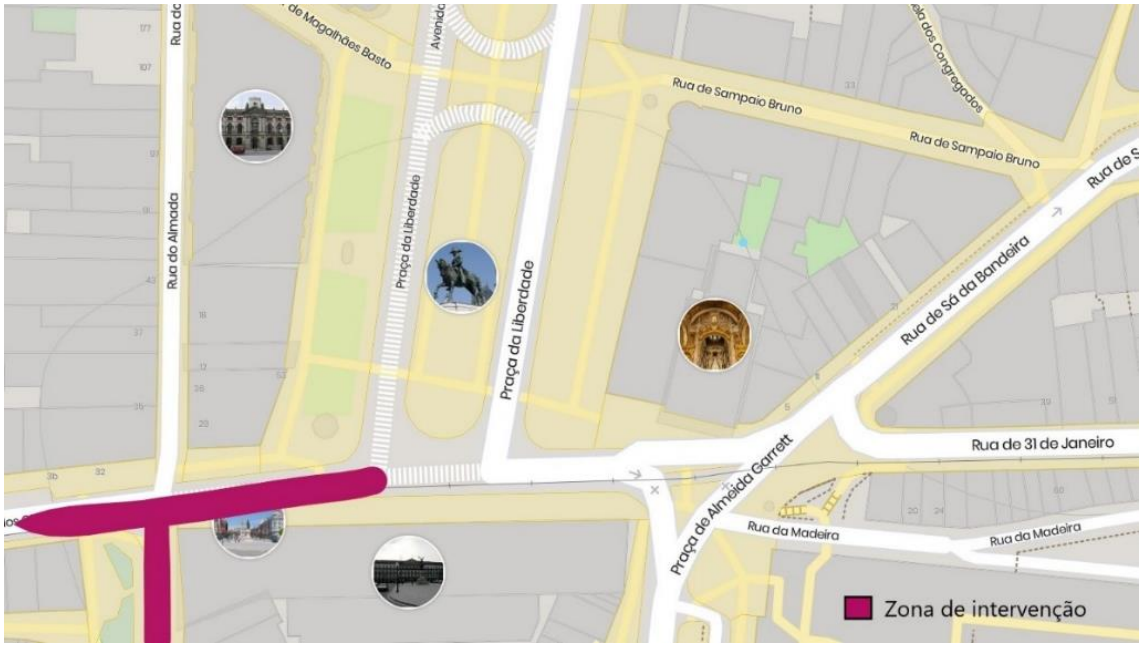


Figura 3.12 - Mapa representativo da distância entre a Igreja dos Congregados e a zona de intervenção para a construção de uma nova linha de metro. Fontes: [63], [64]



Figura 3.13 - Fotografia panorâmica representativa da distância entre a zona da escavação e a Igreja dos Congregados. Data: 01/07/2022

Na fase de desenvolvimento da dissertação, ocorria a escavação da zona da Praça da Liberdade para a criação numa primeira fase de uma estação subterrânea e numa segunda fase para a abertura de um túnel com ligação à estação seguinte, a do Hospital de Santo António (Figura 3.14). É importante, antes de apresentar o sistema de monitorização instalado, apontar os principais efeitos que podem ser introduzidos por estas etapas da construção da nova linha de metro no edifício do caso de estudo. A arquitetura do sistema, pensada pelo Professor António Arêde e os dados que serão lidos e analisados dependem naturalmente destes efeitos que deverão ser controlados e intervencionados caso limites estabelecidos pela interpretação estrutural sejam ultrapassados.



Figura 3.14 - Obras que decorrem na zona da praça da liberdade no momento do desenvolvimento da dissertação. Data: 09/06/2022

3.3.1. EFEITOS DE UMA ESCAVAÇÃO NA PROXIMIDADE DO OBJETO DE ESTUDO

A escavação para a construção de uma linha e estação de metro (Figura 3.15) provocará sempre alguns efeitos na sua vizinhança, no entanto estes serão mínimos se o projeto for devidamente cuidado. A instrumentação e acompanhamento das estruturas vizinhas permite recolher indicadores para aferir se tudo corre como planeado no projeto.

Para este caso de estudo é extremamente importante conhecer o comportamento estrutural do terreno onde é realizada a escavação através de um levantamento preliminar onde pode ser definida uma zona potencial de recalque de terras. A remoção de um enorme volume de terras induz alterações nas tensões iniciais instaladas e altera a posição do nível freático no terreno.

Com isto, as estruturas tornam-se sobretudo suscetíveis à ocorrência de danos estéticos, como fissuras e separações de juntas em paredes, tetos e pisos, mas também se verificam interferências em funcionalidades como é o caso do emperramento de portas e janelas e de infiltrações. Em situações mais extremas, pode ser atingida a ruína de uma estrutura ou subestrutura.



Figura 3.15 - Obras para a construção da estação da Praça da Liberdade. Fonte: [65]

3.3.2. SENSORIZAÇÃO

Para que a recolha de dados para análise seja possível, foi montado um sistema elétrico no interior da Igreja dos Congregados composto por múltiplos sensores e foram inicialmente recolhidos dados na base de dados da empresa LORD, MicroStrain Sensing Systems, que produziu os dois módulos de saída de dados por onde estes circulam. São cinco os tipos de sensores instalados e a Tabela 3.1 sintetiza alguma informação em relação aos mesmos.

Tabela 3.1 - Tipos de sensores presentes no sistema de monitorização

Tipo de sensor	Quantidade	Medição	Unidade	Especificações
Sensores de nível	5	Medem variações de pressão hidrostática. Permitem compreender se existe movimento do local onde é instalado.	Mm H2O	Fornecedor: KELLER Modelo: PR-41-X
Sensores de deslocamento	6	Medem deslocamentos e variações de juntas e fissuras.	mm	Fornecedor: Soil Instruments / Variohm Modelo: J6-2-25

Clinómetros	4	Medem rotações em torno de dois eixos ortogonais horizontais.	º	Fornecedor: Soil Instruments Modelo: TLT6-BSM-3
Sensores de temperatura	4	Detetam variações de temperatura.	ºC	Fornecedor: Status Instruments Modelo: SEM203/P
Sensores de vibração tipo acelerómetro	1	Medem a aceleração e permitem inferir a velocidade derivada.	G	Fornecedor: MicroStrain-Lord Modelo: G-Link.200-OEM.8G

3.3.2.1. Sensores de nível

São compostos por uma célula cerâmica que realiza a medição de níveis baixos de pressão e transmitem o sinal elétrico analogicamente. É montado um sistema hidráulico que permite a medição da pressão proporcional à densidade da coluna de água nos respetivos pontos e obtém-se o desnível entre pontos relativamente a um de referência no qual não é esperada a variação de nível. Aqui constitui-se aquele que designamos por sensor de referência. Integrado, este sensor possui um sensor de temperatura e um microprocessador que assume de forma automática a compensação de efeitos térmicos. O modelo é apresentado na Figura 3.16.



Figura 3.16 - Sensor de Nível

3.3.2.2. Sensores de deslocamento

O sensor de deslocamento ou fissurómetro é um transdutor de deslocamentos. É fixado no local que se pretende monitorizar para que sejam retirados dados relativamente a variações da distância entre dois pontos de fixação, medidas no movimento de uma haste metálica no interior do corpo do sensor. Este movimento altera o valor da resistência do potenciómetro gerando uma variação da tensão que permite criar uma correlação com a variação da distância. Esta variação poderá resultar da abertura ou do fecho de uma fissura ou junta. O campo de medida para o sensor utilizado é de 25mm e foi calibrado para que o seu valor zero, de offset, se encontrasse a cerca de 8mm. Desta forma, o campo de medida subdivide-se em 2, um primeiro com 8mm para mediação de variações negativas, isto é, de compressão com fecho de juntas ou fissuras e um segundo com 17mm para mediação de variações positivas, isto é, de tração com abertura de juntas ou fissuras.

O efeito de dilatação térmica linear na haste de metal deve ser descontado na variação total, realizando-se um simples cálculo de variação de comprimento provocado pelo efeito temperatura:

$$\Delta l = \alpha * \Delta T * L$$

sendo Δl a variação de comprimento, α o coeficiente de dilatação térmica do material, ΔT a variação de temperatura e L o comprimento total da haste.

O modelo é apresentado na Figura 3.17.



Figura 3.17 - Fissurómetro

3.3.2.3. Clinómetros

Cada clinómetro é um transdutor de acelerações que permite retirar rotações em torno de dois eixos horizontais ortogonais no corpo onde se encontra instalado. É realizada uma compensação automática num microprocessador devido ao efeito da temperatura. O modelo é apresentado na Figura 3.18.



Figura 3.18 - Clinómetro

3.3.2.4. Sensores de temperatura

São do tipo *Resistance Temperature Detector* o que significa que são compostos por uma sonda, neste caso do tipo Pt100 sendo que o "Pt" se refere ao material platina e o valor "100" ao valor da resistência a 0ºC. A variação da resistência correlaciona-se com a da temperatura e indica o valor desta. O transmissor de temperatura realiza a conversão. Os modelos são apresentados na Figura 3.19.



Figura 3.19 - Transmissor de temperatura e sonda Pt100

3.3.2.5. Acelerómetro

Foi adotado um sensor triaxial para medição de acelerações com alta resolução e baixo ruído. Encontra-se alocado numa placa de aquisição, registo, condicionamento e transmissão de dados por wireless. Para a garantia de continuidade na monitorização, sem interrupções, a escolha para a medição deste parâmetro recaiu sobre um sensor que requer alimentação elétrica externa ao invés de um exclusivamente alimentado por uma bateria interna, ainda que esta permita a análise durante um longo período de tempo pelo baixo consumo de energia. É autónomo e transmite diretamente a informação ao sistema agregador sem necessidade de envolver outro dispositivo.

Como se restringe a dados de acelerações e grandezas derivadas, na arquitetura do sistema de monitorização este sensor constitui um nó. Contém 3 canais segundo 3 direções ortogonais. As grandezas dinâmicas derivadas consistem nas seguintes:

- RMS – Raiz quadrada da média dos quadrados de uma janela de dados
- Fator de crista – Rácio entre o máximo absoluto da janela e o RMS
- Pico a pico – Diferença entre picos, máximo e mínimo, dos dados da janela
- Velocidade – Calculada através do RMS dos integrais de funções polinomiais aproximadas a cada conjunto de dados

O modelo é apresentado na Figura 3.20.



Figura 3.20 - Nó acelerómetro

Os sinais destes cinco tipos de sensores são diretamente ligados por cabo a módulos de aquisição e registo de dados, aos quais frequentemente chamamos nós.

3.3.2.6.Módulo de aquisição e registo de dados

Os módulos recebem dados de sensores sob a forma de uma tensão elétrica e transmitem-nos a um módulo agregador, o módulo de saída ou *gateway*, via wireless.

O modelo que foi utilizado é designado V-Link-200, do fornecedor MicroStrain-Lord e conta com quatro canais de simples entrada e baixa tensão. Internamente possui eletrónica responsável pela aquisição, filtragem, registo condicionamento, e transmissão de dados e inclui um conversor analógico digital com resolução de 18 bits, visto que todos os dados adquiridos são analógicos. Possui bateria interna, mas também permite alimentação externa. A configuração do módulo pode ser realizada de forma remota e admite várias configurações para a amostragem dos dados, com taxas que podem atingir os 8 kHz. O limite de sensores analógicos genéricos de tensão que podem estar conectados com o módulo é de 8. O modelo é apresentado na Figura 3.21.



Figura 3.21 - Módulo de aquisição e registo de dados

3.3.2.7.Módulo de agregação de dados de saída (*Gateway*)

Todos os dados recolhidos são transmitidos para este módulo de agregação e saída. Existe uma única *gateway* na instalação, com o modelo WSDA-2000 e fornecedor MicroStrain-Lord. Funciona com base num processador interno e num sistema Linux e permite configurar e recolher os dados armazenados nos múltiplos módulos de aquisição (nós). Desempenha ainda a função de transmissão dos dados para um computador local ligado diretamente ou para uma base de dados, através da *Internet*, quer por amostragem em tempo real, quer por recolha de dados armazenados nos nós. Sincroniza os sensores fornecendo uma referência temporal contínua para todo o sistema. O modelo é apresentado na Figura 3.22.



Figura 3.22 - Módulo de saída (*gateway*)

3.3.2.8.Router de transmissão remota de dados

Estabelece uma rede *ethernet* local e é-lhe ligado por cabo o módulo de saída de dados apresentado no ponto 3.3.2.7. O modelo do Router é o Rut240 do fornecedor Teltonika Networks. Possibilita a comunicação com o exterior através de uma rede móvel fornecida por um cartão SIM inserido no Router, para ligação à *internet*, que o torna acessível sem fios via Wi-Fi.

A utilização de um software suportado pelo dispositivo, como o WireGard, permite estabelecer uma rede privada virtual que garante comunicação segura via Internet e que abre acesso direto à *gateway* num computador externo remoto. Assim, toda a configuração e gestão da rede de monitorização pode ser realizada à distância. O modelo é apresentado na Figura 3.23.



Figura 3.23 - Router de transmissão remota

3.3.3.ASPETOS GERAIS E ORGANIZAÇÃO

Os dispositivos foram agrupados na arquitetura montada pela equipa do Professor António Arêde em três zonas, duas com sensores e uma com equipamento de recolha e transmissão (Figura 3.24):

- Zona 0 que corresponde à área da abside
- Zona 1 que compreende a área entre a fachada principal a Sul e as colunas do coro alto
- Zona G, no púlpito da parede lateral Este

A zona 0 possui somente um nível 0, do rés do chão. Na zona 1, são 3 os níveis existentes (Figura 3.25):

- Nível 0 que corresponde ao rés do chão
- Nível 1 que corresponde à altura do coro alto
- Nível 2 que corresponde ao varandim interior

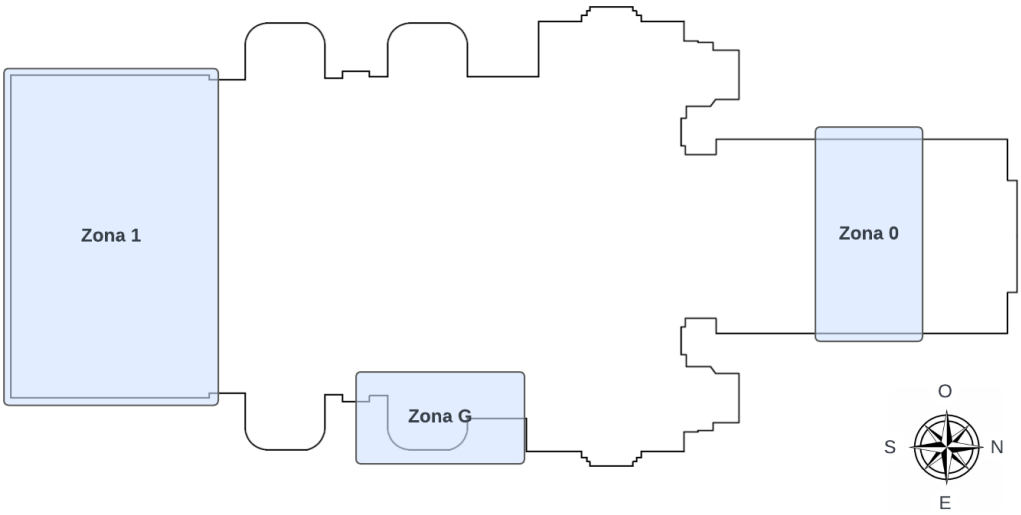


Figura 3.24 - Zonas definidas para a arquitetura de monitorização

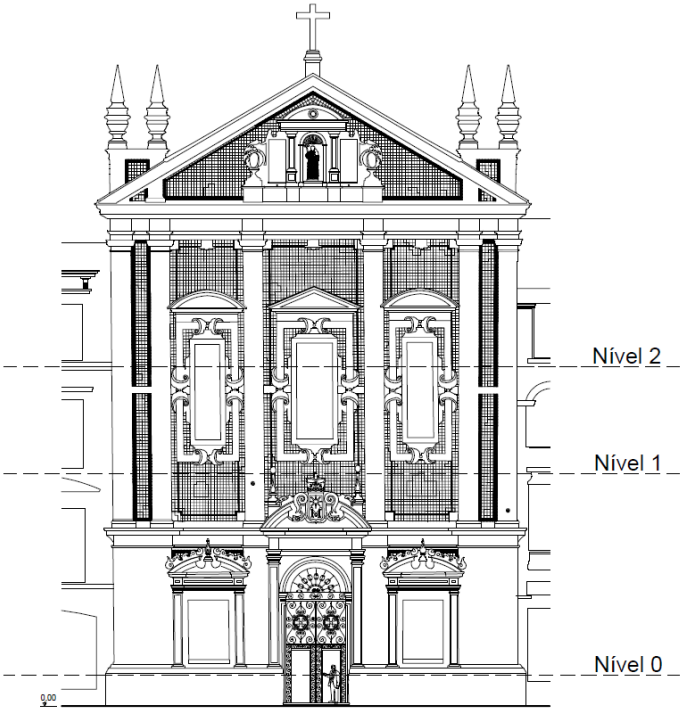


Figura 3.25 - Disposição dos níveis em altura de instalação dos sensores

São 28 os canais ativos gerados pela colocação de 20 sensores na Igreja dos Congregados. Cada sensor estabelece ligação com um nó e contém uma chave de identificação única que designamos por ID, e para cada ID podem ser vários os canais existentes, isto é, um sensor com uma determinada identificação pode efetuar mais do que uma medição encaminhando a informação por diferentes canais. Tomemos o exemplo de um clinómetro que retira valores do parâmetro rotação em duas direções distintas. Será gerado um canal 1 e um canal 2 com cada uma das direções. Ambos, ID's e canais, irão constituir mais tarde etiquetas, isto é, atributos que permitem realizar a filtragem da informação pretendida na base de dados.

Para a interpretação dos valores provenientes do sistema de monitorização é necessário o conhecimento e compreensão de algumas opções tomadas na instalação:

- Para os fissurómetros foi adotada para o sentido positivo a abertura de fissuras que se traduz pelo afastamento entre pontos de medição;
- Os clinómetros e o acelerómetro possuindo um sistema de eixos local foram dispostos de forma a estabelecer correspondência com o sistema de eixos global. Os clinómetros são bidirecionais e indicam rotações para fora do plano da parede (correspondente a uma rotação em trono de y) e no próprio plano (correspondente a uma rotação em torno de x). O acelerómetro é triaxial e possui os eixos 1, 2 e 3 que correspondem respetivamente aos eixos globais y, z e x;

A equipa de trabalho encarregue pela monitorização adotou uma nomenclatura para nomear os sensores que inclui o tipo de sensor, o número do sensor e o módulo ao qual estabelece ligação: "Tipo_nº.Mi". O tipo pode corresponder a um SN (sensor de nível), a um FS (sensor de deslocamento), a um CL (clinómetro), a um T (sensor de temperatura) ou a um VB (sensor de vibração). São cinco os módulos de aquisição de dados representados pelo "M" aos quais é estabelecida ligação, variando assim o "i" entre 1 e 5. Encontram-se alojados em três caixas para que sejam o menos evasivos no local. Um sensor de nível utilizado para compensação dos efeitos térmicos na leitura dos restantes é designado SN_Ref. A Tabela 3.2 faz a correspondência entre cada canal ou subcanal dos sensores e os respetivos nomes que derivam da nomenclatura adotada.

Tabela 3.2 - Especificações do conjunto de sensores instalados na Igreja dos Congregados

Sensor ID	Canal	Subcanal	Nome	Parâmetro	Unidade
63243	Ch1		T_01	Temperatura	ºC
	Ch2		T_02	Temperatura	ºC
	Ch3		T_03	Temperatura	ºC
	Ch5		SN_Ref	Deslocamento	mm
	Ch6		SN_01	Deslocamento	mm
	Ch7		SN_02	Deslocamento	mm
	Ch8		SN_04	Deslocamento	mm
63244	Ch1		T_04	Temperatura	ºC
	Ch5		FS_01	Deslocamento	mm
	Ch6		FS_2A	Deslocamento	mm
	Ch8		SN_03	Nível	mm H2O
63246	Ch5		CL_1A	Rotação	º
	Ch6		CL_1B	Rotação	º
	Ch7		CL_3A	Rotação	º
	Ch8		CL_3B	Rotação	º
63247	Ch5		FS_2B	Deslocamento	mm

	Ch6		FS_2C	Deslocamento	mm
	Ch7		FS_03	Deslocamento	mm
	Ch8		FS_04	Deslocamento	mm
63248	Ch5		CL_2A	Rotação	º
	Ch6		CL_2B	Rotação	º
	Ch7		CL_4A	Rotação	º
	Ch8		CL_4B	Rotação	º
26832	Ch1	wform	VB2Y_w	Aceleração	g
		rms	VB2Y_r	Aceleração	g
		ptp	VB2Y_p	Aceleração	g
		mm/s	VB2Y_v	Velocidade derivada	mm/s
		crest	VB2Y_c	Aceleração	g
	Ch2	wform	VB2Z_w	Aceleração	g
		rms	VB2Z_r	Aceleração	g
		ptp	VB2Z_p	Aceleração	g
		mm/s	VB2Z_v	Velocidade derivada	mm/s
		crest	VB2Z_c	Aceleração	g
	Ch3	wform	VB2X_w	Aceleração	g
		rms	VB2X_r	Aceleração	g
		ptp	VB2X_p	Aceleração	g
		mm/s	VB2X_v	Velocidade derivada	mm/s
		crest	VB2X_c	Aceleração	g

3.3.4. Representação do sistema de monitorização no modelo BIM

Para a colocação destes dispositivos num modelo tridimensional, processo descrito no subcapítulo 3.2.3, foi estabelecido um referencial a partir do qual são obtidas as coordenadas dos sensores nos alçados disponibilizados pela equipa encarregue pelo trabalho de monitorização da igreja. A partir destas coordenadas e utilizando o mesmo referencial no modelo, são transpostas as localizações para a colocação dos sensores sob a forma de objetos pertencentes à família que os representa. Para tal, foram tomados os mesmos eixos que a equipa de trabalho encarregue pela monitorização tomara, com o eixo x coincidente com o eixo de simetria longitudinal da Igreja, tendo sentido positivo a Norte e com o eixo y a 1m da porta de entrada com sentido positivo a Oeste. O eixo z coincide com o desenvolvimento em altura da Igreja (Figura 3.26).

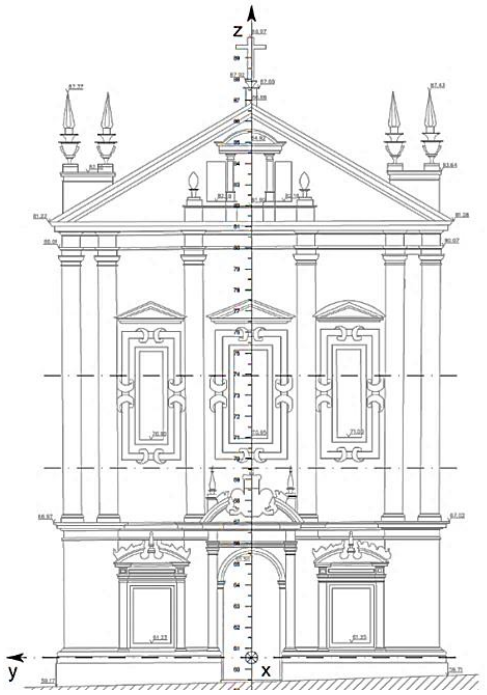


Figura 3.26 - Referencial adotado para a Igreja dos Congregados

A Figura 3.27 ilustra a disposição dos sensores na face interior da parede de fachada frontal da igreja, contidos na zona 1 e dispostos ao longo dos três níveis. A tipologia dos sensores colocados mais à esquerda é exatamente igual à dos sensores colocados mais à direita.

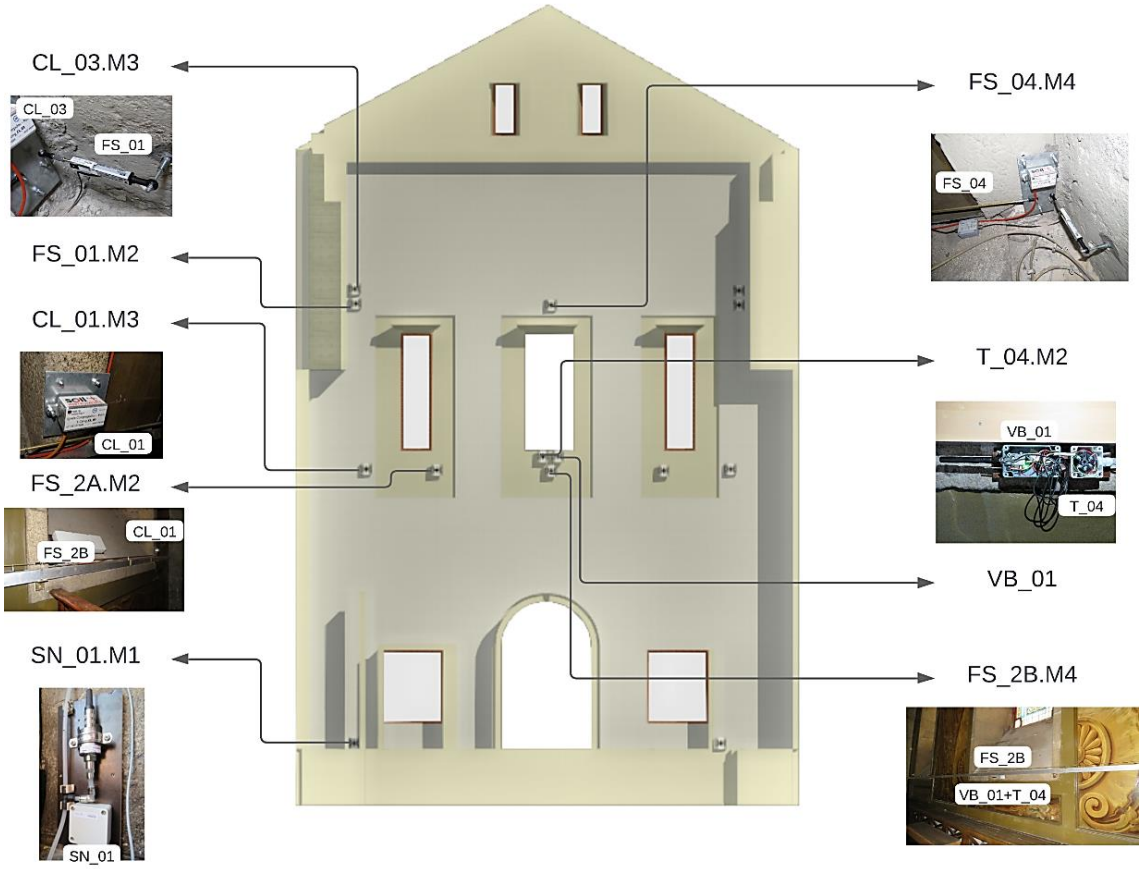


Figura 3.27 - Face interior da parede de fachada frontal com sensores dispostos

Os restantes sensores estão dispostos no nível 0 e nas zonas 0 e 1, com determinado afastamento em relação à fachada frontal. Estando todos no mesmo nível podem facilmente ser visualizados num corte em planta, representado na Figura 3.28.

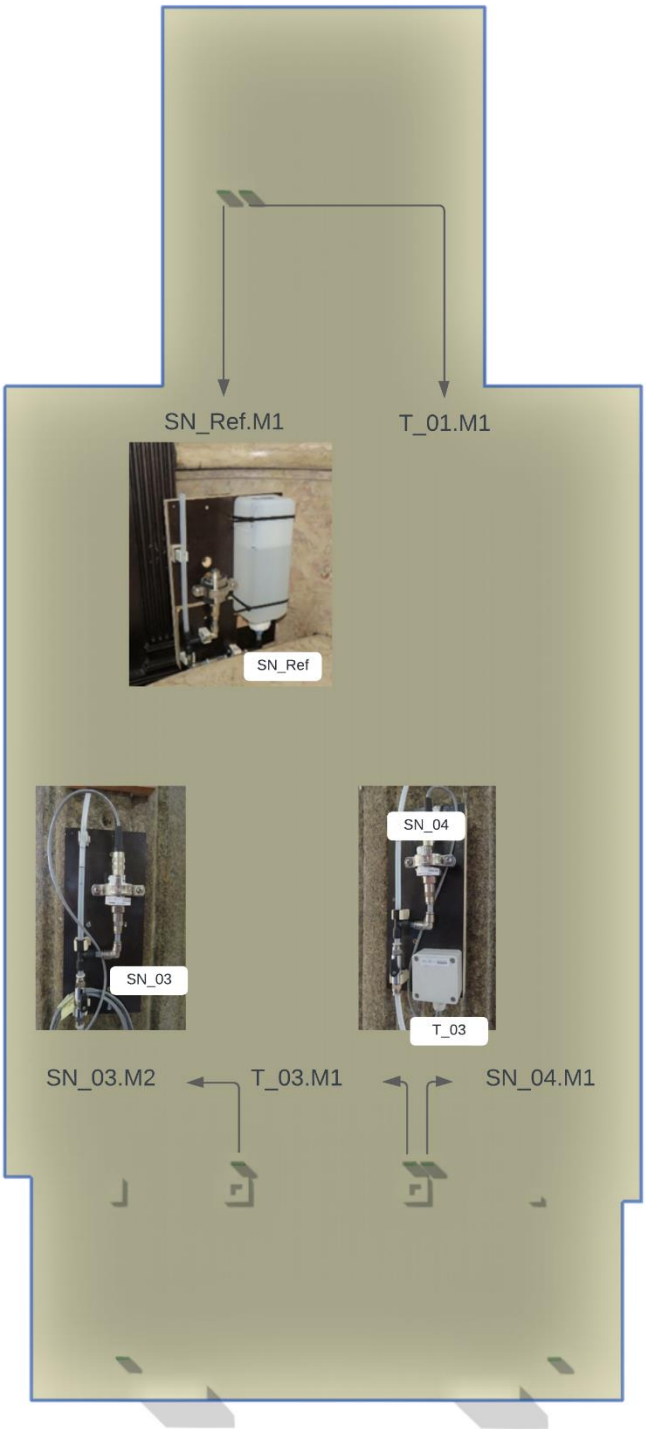


Figura 3.28 - Disposição de sensores em planta no nível 0

A atribuição das propriedades de cada sensor a cada objeto, que inclui a identificação que é fundamental para a distinção e para a correspondência à fonte de dados na fase de integração, é realizada através da seleção do tipo dentro da família sensor. Os tipos foram criados na fase de desenvolvimento do modelo BIM para que nesta fase de introdução dos elementos do sistema de monitorização o processo fosse facilmente executado. A listagem dos vários identificadores pode ser visualizada na Figura 3.29.

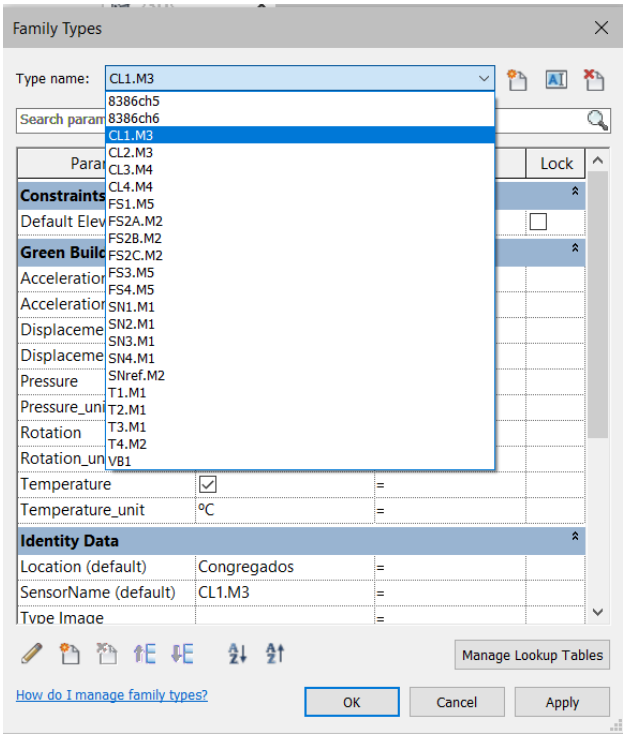


Figura 3.29 - Listagem dos diferentes tipos da família sensor criados

4
IMPLEMENTAÇÃO DE UM *DIGITAL TWIN*

4.1. AQUISIÇÃO, ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS

4.1.1. CONSIDERAÇÕES E PROCEDIMENTOS INICIAS

A ligação dos dados recolhidos pelo sistema de monitorização ao modelo tridimensional, cuja criação foi relatada no capítulo anterior, implica o armazenamento destes numa base de dados para que possam posteriormente e recorrendo a uma API estabelecer um canal de comunicação síncrono com os objetos representativos dos sensores. A escolha da base de dados a adotar recaiu sobre a InfluxDB.

Para que a informação a disponibilizar no DT possa ser verificada e validada, para que os dados possam ser facilmente observados numa fase na qual o *digital twin* é desenvolvido, pela facilidade com que pode ser montado e pela utilidade que apresenta é elaborado um quadro com um conjunto de painéis que apresentam os parâmetros monitorizados de forma gráfica, personalizável e intuitiva. Foi adotada a aplicação Grafana para este recurso. Este é um método mais habitual num projeto para monitorização de estruturas e exige um menor esforço.

Para controlar o processo a realizar sobre os dados, é importante numa fase inicial compreender como funciona cada uma das etapas que incluem:

- a ligação aos dados disponíveis nos módulos de saída e/ou em *clouds*, dependendo do fabricante dos módulos, que pode ser realizada a partir dum algoritmo e duma VPN que lhes confiram acesso;
- a receção e armazenamento na base de dados através do upload das séries, que pode ser realizado a partir de um outro algoritmo;
- o processamento que pode ser realizado de diversas formas e em diversos momentos, isto é, no momento de upload para a base de dados ou num momento seguinte modificando os parâmetros no interior da própria ou até criando uma divisão de dados processados a partir dos originalmente carregados;

Para tal, é utilizado um dos canais de comunicação de um dos sensores que serve de exemplo e que permite estabilizar o procedimento para a obtenção de informação fiável, limpa e pronta a integrar um DT. Porém, o domínio das ferramentas utilizadas é necessário num momento no qual os dados adquiridos na Igreja dos Congregados não estão ainda operacionais ou estabilizados, necessitando de calibração e filtragem. Para a base de dados, são então utilizados dados de exemplo disponibilizados pela própria aplicação numa primeira fase [66] e recorrendo a uma API designada" telegraf" que recolhe dados dos componentes do computador em execução numa segunda fase [67]. Esta segunda opção prende-se somente com o facto de se tratar de uma recolha de dados em tempo real, o que não se verifica com os dados de exemplo do primeiro caso nem com outras bases de exemplo disponíveis online na qual a frequência de recolha é muito baixa ou

deixou de existir a partir de determinado momento. Um pequeno esquema ilustrado na Figura 4.1 representa a sequência destes procedimentos para o domínio do InfluxDB e em paralelo para o domínio do Grafana. A informação nesta plataforma utilizada para visualização de painéis gráficos é organizada conforme a disposição dos dados provenientes do InfluxDB visto que a aplicação utiliza a mesma linguagem da fonte de dados, obtendo os mesmos valores medidos e permitindo manipular a forma como são disponibilizados de uma forma mais preponderante.

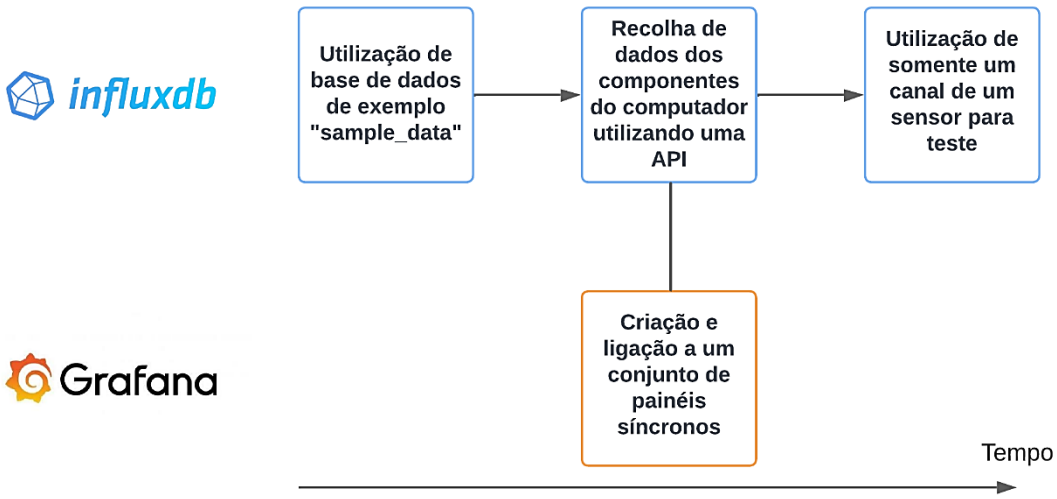


Figura 4.1 - Sequência de procedimentos para domínio das aplicações InfluxDB e Grafana

Para a recolha de informação foram visualizados vídeos, foram pesquisados guias e foram utilizados os manuais disponíveis online das aplicações [68], [69].

Seguem-se com maior detalhe e de forma individualizada para cada uma das aplicações todos estes processos descritos.

4.1.1.1.Influxdb

O carregamento de alguns dados nesta base de dados foi previamente realizado para teste de um algoritmo elaborado em Python (Figura 4.2) e que consiste num conjunto de blocos que realizam:

- O acesso à Sensorcloud, base de dados própria da empresa responsável pela produção dos sensores instalados;
- O acesso ao InfluxDB, com conta alocada num servidor da Faculdade da Engenharia da Universidade do Porto, utilizando um *token*;
- A passagem de dados entre ambas as plataformas;

```
15      # Sensor and channel definition
16      gateway_id = 'W020000000126466'
17      sensor_name = '50834'
18      channels = ['ch1']
19      building = 'congregados'
20      measurement_type = 'acceleration'
21
22      s = Sensor(gateway_id, sensor_name, building, channels, measurement_type)
23      #s._get_latest_sensorcloud_timestamp('ch1')
24      #s._get_latest_influxdb_timestamp('ch1')
25      s.update_influxdb('ch1')
```

Figura 4.2 - Parte do bloco " main " em Python para passagem de dados entre bases de dados

A Sensorcloud tem um limite de descarregamento de dados, imposto pela marca, que é facilmente atingido tendo em conta a frequência necessária para a recolha sobretudo de parâmetros como o da aceleração cujo nó nesta fase não se encontrava ainda operacional. Foi selecionado somente um canal para o teste dos processos a realizar mais tarde para todos os valores medidos e comunicados e dentro da base de dados foram atribuídos aos dados a medida "Congregados", o campo "*acceleration*", a etiqueta "50834" correspondente ao nó ou sensor e o "ch1" correspondente ao canal. Eventuais erros não comprometeriam nunca a recolha de informação visto que esta se mantém descarregada e inalterada no Sensorcloud. Porém este limite imposto na descarga poderia vir a exigir uma nova abordagem mais tarde.

Os dados resultantes do processamento do algoritmo correspondiam a um período de novembro de 2021 e provinham de um dos sensores instalados na Igreja dos Congregados, porém não tendo sido realizada ainda por esta altura a calibração e sendo a janela temporal tão curta serviram apenas para a testagem do algoritmo.

Foi então para aprendizagem do funcionamento da aplicação utilizado o "Air Sensor Sample Data" disponível entre vários exemplos de dados disponibilizados pela própria ferramenta online na documentação do InfluxDB em https://docs.influxdata.com/influxdb/cloud/reference/sample-data/, porém a injeção destes torna-os estáticos na janela temporal que possuem originalmente e o interesse passa por dominar séries de dados síncronos recolhidos no sistema de monitorização instalado [70].

A terceira opção recaiu então na instalação de um plugin que consiste num agente coletor e emissor de dados designado Telegraf (Figura 4.3) que estabeleceu uma ligação com os componentes do computador onde estava instalado retirando dados e enviando-os para um "bucket" da base de dados. A partir destes dados poderiam ser construídos painéis gráficos na aplicação Grafana como demonstrado no subcapítulo seguinte, 4.1.1.2.

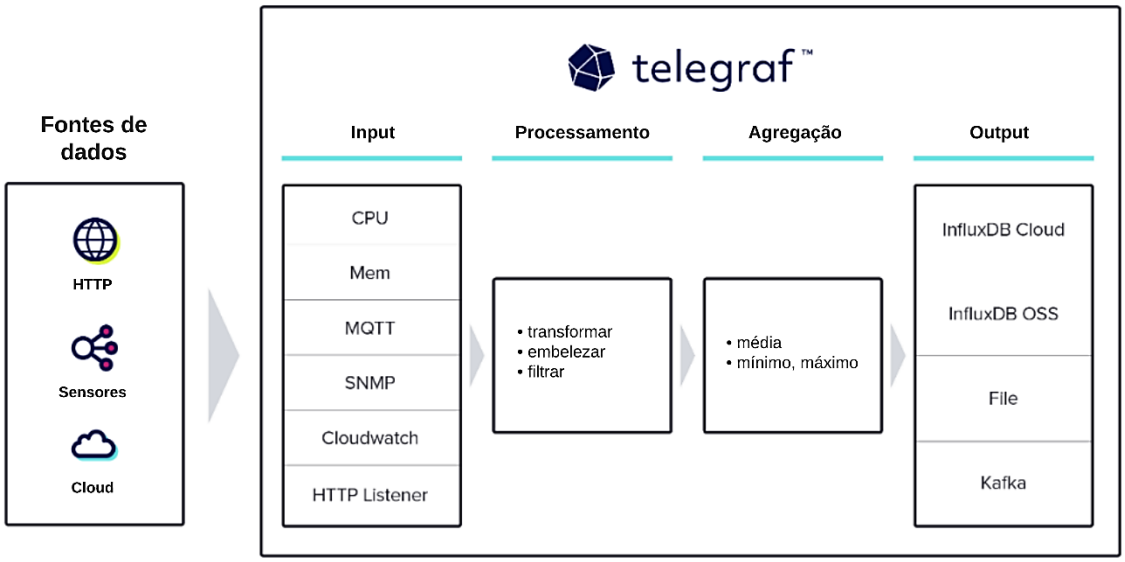


Figura 4.3 - Mecanismo de funcionamento do plugin Telegraf. Fonte: [71]

Controlados todos os processos, calibrados e estabilizados os dados oriundos do sistema de monitorização instalado na igreja, foi possível iniciar o procedimento para os dados que se pretendem integrar num *digital twin*. O primeiro passo consiste em testar novamente a injeção dos novos dados para somente um canal, utilizando o algoritmo anteriormente criado pelo professor Miguel Castro que fornece uma boa base, mas que necessita de algumas reformulações. Estas reformulações fazem parte dos procedimentos posteriores.

4.1.1.2.Grafana

Para a visualização dos dados, adotou-se a aplicação Grafana que permite estabelecer uma conexão com uma base de dados em Influxdb de forma direta adicionando-a no separador "fontes de dados" com o URL e dados de acesso à conta. Foi desenvolvida uma *dashboard* com um conjunto de informações injetadas pelo Telegraf na base de dados Influxdb relativas a componentes de um computador. O processo estava relativamente dominado e tornar-se-ia relativamente simples assim que fosse possível realizá-lo com os dados dos sensores instalados na Igreja dos Congregados.

4.1.2. ALGORITMO PARA AQUISIÇÃO E DEPOSIÇÃO DE DADOS

Numa fase mais adiantada do trabalho é definida uma diferente forma de seleção dos sensores sobre os quais efetuar a recolha e registo de dados. Previamente estes eram inseridos no próprio algoritmo Python (Figura 4.2) que realizava a leitura do sensor ID e canal escolhidos e digitados fazendo-os coincidir no pedido efetuado à Sensorcloud na forma de um *query*. Contudo, não é propriamente simples e intuitivo para alguém que não o criador do algoritmo alterar a seleção de sensores e canais para os quais são realizadas as operações. Adotou-se uma solução que consiste em realizar a leitura para a seleção num ficheiro à parte, uma folha de cálculo Excel, utilizando para o efeito a biblioteca *pandas* de python que permite realizar a manipulação e análise de dados recorrendo à organização destes em tabelas que são designadas *dataframes* (Figura 4.4).

	Time	63243:ch1	...	63243:ch7	63243:ch8
0	2022-05-08 18:52:00.000000	20.885376	...	-0.321381	-7.303551
1	2022-05-08 18:52:01.000000	20.965630	...	-0.212875	-7.363770
2	2022-05-08 18:52:02.000000	20.908012	...	-0.228516	-7.334152
3	2022-05-08 18:52:03.000000	20.947105	...	-0.305740	-7.244324
4	2022-05-08 18:52:04.000000	20.920357	...	-0.152267	-7.278877
...	...	...	...	...	...
78717	2022-05-09 16:33:07.000000	21.079826	...	1.187943	-7.719147
78718	2022-05-09 16:33:08.000000	20.983116	...	1.127335	-7.752708

Figura 4.4 - Exemplo de um dataframe obtido com a biblioteca *pandas*

Entre as vantagens associadas à facilidade com que se efetua este novo procedimento estão aquelas relacionadas com a forma como podem ser criadas etiquetas para a filtragem de dados, isto é, podem ser criadas colunas adicionais no ficheiro anexo Excel para resposta a condições adicionadas no algoritmo. Com a biblioteca *pandas* podem ainda ser realizadas operações e manipulações do *dataframe* que provém da folha de cálculo anexa. Foram inicialmente testadas algumas ID's de sensores com uma folha de cálculo simples e utilizada apenas para teste e o código Python foi alterado (Figura 4.5) para que fizesse a leitura neste ficheiro anexo (Figura 4.6). A escrita sobre a base de dados Influx passou a depender de uma coluna adicionada, designada "status", com uma correspondência para cada canal, de cada sensor, na qual era adicionado o valor 1 ou "void" consoante a opção de recolher e registar ou não recolher nem registar, respetivamente, o canal específico. A qualquer momento é assim possível a qualquer utilizador realizar alterações na lista de dispositivos que pretende que se mantenham no processo de aquisição e envio de dados, retirando, adicionando, desativando ou ativando linhas correspondentes a canais com medição de um parâmetro único.

```
6   import pandas as pd
7
8   # Read Excel file with sensors database and store as a Pandas dataframe
9   excel_file = 'Sensors_Properties.xlsx'
10  df_sensors = pd.read_excel(excel_file)
```

Figura 4.4 - Código Python para leitura de ficheiro Excel anexo

	A	B	C	D
1	**Sensor ID**	**Channel**	**Status**	**Measurement**
2	63243	ch1	1	Temperature
3	63243	ch2	1	Temperature
4	63243	ch3	1	Temperature
5	63243	ch4	void	
6	63243	ch5	1	Level
7	63243	ch6	1	Level
8	63243	ch7	1	Level
9	63243	ch8	1	Level
10	63244	ch1	1	Temperature
11	63244	ch2	void	
12	63244	ch3	void	
13	63244	ch4	void	
14	63244	ch5	1	Displacement
15	63244	ch6	1	Displacement
16	63244	ch7	void	
17	63244	ch8	1	Level
18	63246	ch1	void	
19	63246	ch2	void	
20	63246	ch3	void	
21	63246	ch4	void	
22	63246	ch5	1	Rotation
23	63246	ch6	1	Rotation
24	63246	ch7	1	Rotation
25	63246	ch8	1	Rotation

Figura 4.5 - Excel em fase de teste para leitura e seleção de canais a partir de um algoritmo

Para além desta nova forma de selecionar os canais com informação a inserir na base de dados Influxdb, é necessário alterar o local onde a leitura é realizada visto que a determinado momento a Sensorcloud atinge o limite de capacidade para armazenamento de dados. A leitura passa a ser executada de forma direta na *gateway* instalada na Igreja dos Congregados, isto é, na própria interface que permite disponibilizar os dados em tempo real, antes que estes sejam enviados para a *cloud* da própria marca dos sensores, designada Sensorconnect. O acesso e leitura no Sensorconnect revelou-se relativamente complicado visto que exigiu a importação de uma biblioteca desenvolvida pela MicroStrain – MSCL (MicroStrain Comunnication Library) criada para comunicação com dispositivos da marca e uma ligação virtual via VPN ao servidor da *gateway*. Foi necessária a consulta da documentação e de um guia de arranque da biblioteca [27], [28] para que blocos de código relacionados com a plataforma fossem construídos. A linguagem de programação é específica e relativamente vaga. A importação desta biblioteca provocou erros de compatibilidade com a versão do Python em execução numa primeira fase, Python 3.10.5. e foi necessário executar o código com uma versão compatível, isto é, qualquer uma das versões 3.6. Este problema foi resolvido recorrendo à criação de um ambiente virtual, "venv", no qual foi instalada a versão do Python 3.6.13 de 32 bits. Este ambiente virtual foi criado utilizando um terminal da aplicação Anaconda, forma de distribuição *open source* da linguagem de programação Python que constitui uma plataforma poderosa com vários pacotes instalados automaticamente e um conjunto de pacotes adicionais opcionais [72], [73].

A ligação ao servidor foi garantida utilizando o *software* Wireguard, aplicativo gratuito e de código aberto utilizado para a implementação de técnicas de VPN (Rede Virtual Privada) na criação de ligações seguras de ponto a ponto em configurações roteadas ou de ponte [74].

O algoritmo final é constituído por 3 blocos de código e é acompanhado por uma folha de cálculo para leitura através da biblioteca pandas.

4.1.3. PROCESSAMENTO DE DADOS

O processamento de dados torna-se possível a partir do momento em que os dados estão operacionais e são viabilizados. Após calibração do sistema de sensores montado por parte da equipa de trabalho responsável pela monitorização, com obtenção de dois coeficientes de calibração que permitem traçar uma correlação entre o sinal medido no sensor em volt ou miliampere, posteriormente convertido para bit, e o parâmetro que se pretende medir, é necessária uma fase de pré-processamento na qual são retirados os *offsets* que permitem definir novos valores em função de uma nova referência obtida por exemplo com o método das médias móveis que representa o "valor zero". Após este primeiro tratamento de dados, que pode ser realizado na aquisição com um algoritmo que faz a leitura e manipulação dos valores descarregados ou com a introdução de um algoritmo no processador dos próprios sensores ou módulos, são conduzidas algumas operações de tratamento adicionais para a redução do ruído e filtragem dos dados. Técnicas de filtragem estão descritas no capítulo relativo ao estado da arte, subcapítulo 2.1.1.5.

A base de dados InfluxDB permite a utilização da linguagem flux com capacidade para processar os dados armazenados para posterior visualização com base, entre outros, no comando *movingAverage()* que calcula a média de valores não nulos utilizando um valor corrente e os n-1 valores anteriores disponíveis na coluna _values, correspondendo o n ao número de entradas de valores para o cálculo da média, e o *timeMovingAverage()* que ao invés de calcular a média com base num número de valores que antecedem o valor corrente, calcula com base num período de tempo que o antecede. Para o primeiro comando é especificado o parâmetro n e para o segundo comando é especificada a frequência com que são retornadas as médias e a janela correspondente ao período de tempo que dá entrada no cálculo. A opção de *downsampling* existente na plataforma Influx realiza a agregação de séries entre intervalos temporais e facilmente pode eliminar o ruído em sinais provenientes de sensores como os que realizam a medição de temperatura para a qual as variações ocorrem de uma forma gradual ao longo de períodos relativamente longos comparativamente com os intervalos que se adotam para a agregação. Valores anómalos no sinal que não se enquadram no conjunto de valores medidos são eliminados através da função *filter()* que introduz uma condição para a qual é definido um intervalo de valores admissíveis. Valores que não pertençam a este intervalo são eliminados. Todos estes comandos são digitados diretamente na linha de comandos da própria aplicação, no campo *script editor*.

4.1.4. *DASHBOARD* PARA VISUALIZAÇÃO DE DADOS E MECANISMO DE NOTIFICAÇÃO

A recolha de alguns dados com a medição de diferentes parâmetros no Influxdb permitiu criar finalmente uma *dashboard*, na plataforma Grafana, para visualização de forma gráfica dos valores medidos. O processo permitiu testar novamente a aplicação, mas desta vez com aqueles que são os dados com verdadeiro interesse para integração num *digital twin*. Uma interface na qual coexistam gráficos com informação pode ser facilmente acedida e compreendida por um utilizador comum. É importante retirar conclusões em relação à viabilidade de construir um DT em comparação com esta metodologia mais comum, apresentando as principais vantagens, desvantagens e formas como se podem ou não complementar.

Atrasos na obra a realizar para a criação de uma nova estação de metro não permitiram no decorrer da dissertação visualizar dados demonstrativos da influência da obra no comportamento estrutural da Igreja dos Congregados. Porém todas as restantes ações que afetam a estrutura podem ser observadas de forma gráfica. Painéis foram configurados para que comunicassem com os dados dos sensores disponíveis na base de dados e pequenas operações de processamento foram conduzidas para que se obtivessem valores de *offset* que permitiriam obter variações dos valores medidos em relação aos valores habituais e mais correntes, em fases estáveis, ao invés de valores em bruto que tornam mais difícil a interpretação. Para melhor compreensão destes conceitos e para ilustração do que foi possível obter com a aplicação Grafana ilustra-se na Figura 4.7 um *dashboard* composto por dois painéis relativos a sensores de nível e a sensores de temperatura pertencentes ao sistema de monitorização. No primeiro painel é possível compreender mesmo sem atender a uma interpretação estrutural forte que as variações de nível não se revelam críticas pelo facto de não se notarem grandes variações para a unidade de medida adotada. Porém, para que melhor se analisem as variações, de forma isolada, pode ser retirado um valor médio para um intervalo de tempo suficientemente representativo da tendência observável que se subtrai numa fase posterior àqueles que são os valores medidos. O valor médio é facilmente obtido recorrendo ao comando *timeMovingAverage()* no InfluxDB que realiza uma média móvel a partir da qual se fixa o intervalo de tempo adotado, resultando um único valor a utilizar na subtração. Estes valores estão representados por retas sob os gráficos de cada um de cinco sensores de nível. Para que se avalie a estabilidade do parâmetro medido é necessário atender a variações de temperatura no mesmo intervalo de tempo. O segundo painel demonstra que as variações de temperatura não possuem grande influência sobre a leitura realizada pelos sensores de nível.

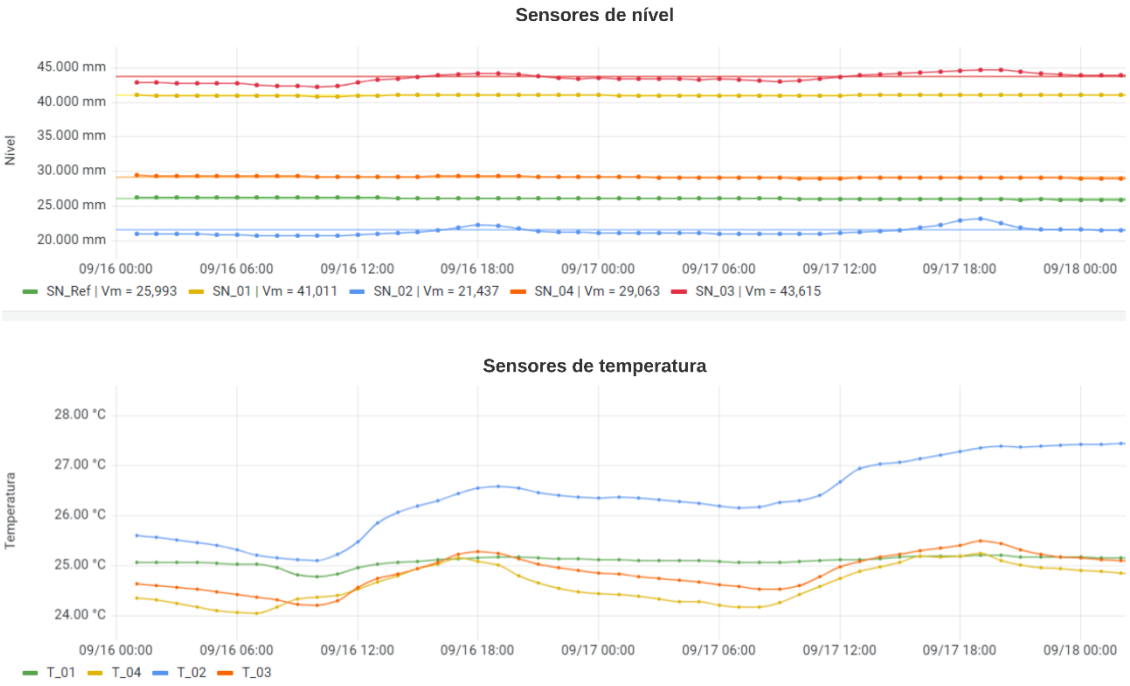


Figura 4.7 - Painéis para visualização de dados configurados na aplicação Grafana

É no Grafana também que se pode facilmente criar um mecanismo de alerta e notificação visto que a plataforma se mostra preparada para tal tornando-se simples o processo.

O mecanismo de alerta e notificação integrado no Grafana é desenvolvido da seguinte forma:

1. Em separador próprio é definido um critério de avaliação que determina quando é que um alerta dispara. Um critério de disparo é formado por um ou mais *queries* e expressões que selecionam os dados a avaliar, por condições que definem o limite que deve ser alcançado ou excedido, por uma frequência de avaliação e, opcionalmente, pela duração para a qual se pretende que a condição se mantenha.
2. No Telegram, plataforma escolhida entre as várias de opção para receção dos alertas, é criado um *bot* pesquisando o utilizador "BotfFather" e enviando uma mensagem com o texto e formato apresentados na Figura 4.8.

```
You
/newbot

BotFather
Alright, a new bot. How are we going to call it? Please choose a name for your bot.

You
TypeYourBotName

BotFather
Good. Now let's choose a username for your bot. It must end in `bot`. Like this, for example: TetrisBot or tetris_bot.

You
TypeYourBotNameBot

BotFather
Done! Congratulations on your new bot. You will find it at t.me/shelley_monitor_bot. You can now add a description,
about section and profile picture for your bot, see /help for a list of commands. By the way, when you've finished
creating your cool bot, ping our Bot Support if you want a better username for it. Just make sure the bot is fully
operational before you do this.

Use this token to access the HTTP API:
99...:AA.....TvF8
Keep your token secure and store it safely, it can be used by anyone to control your bot.
```

Figura 4.8 - Procedimento para criação de *bot* em Telegram encarregado da emissão de notificações a partir do Grafana [75]

3. No Grafana é adicionado um canal de notificação. Seleciona-se a opção "Telegram" em "Add notification chanel" e digita-se o *API token* e *chat ID* nos campos apropriados. É desta forma que se cria um canal de comunicação entre as duas plataformas. A notificação pode ser testada e a seleção é salva.
4. No campo de notificações em alertas pode agora ser selecionado o canal de notificação criado e pode ser escrita uma mensagem de padrão para o momento da emissão.

4.2. PROCEDIMENTO PARA A CRIAÇÃO DE UMA APLICAÇÃO

O processo para a obtenção de uma aplicação web capaz de exibir um *digital twin* fica finalizado com a criação da própria aplicação que incorpora a aquisição, armazenamento e processamento dos dados gerados pelos sensores instalados no objeto de estudo, a Igreja dos Congregados, representada visualmente através de um modelo 3D desenvolvido no Autodesk Revit. O resumo das várias etapas apresenta-se de seguida, na Figura 4.9.

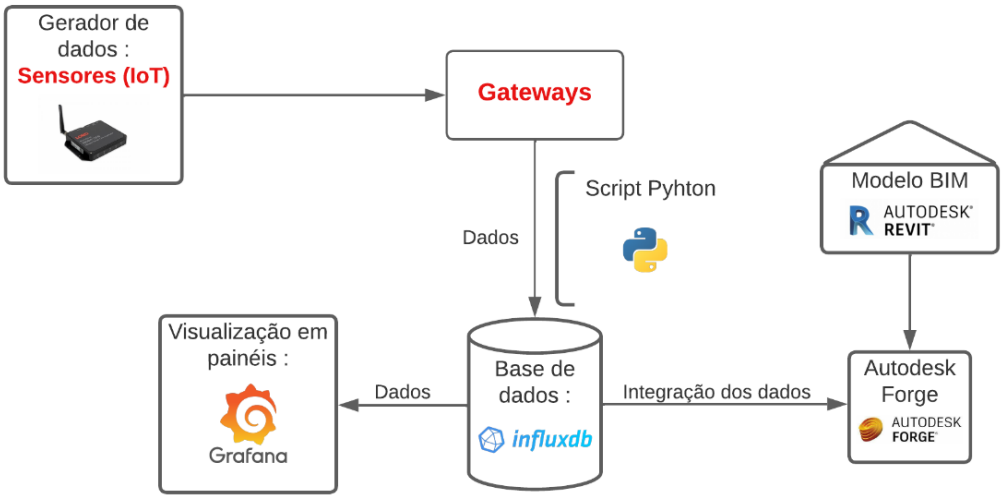


Figura 4.9 - Resumo das etapas percorridas ao longo da disssertação

Neste momento, é necessário criar um canal de comunicação com a base de dados existente no Influxdb, carregar o modelo numa plataforma web que possa facilmente ser acedida a partir da ligação a um servidor com múltiplos acessos e pensar e executar uma forma viável e intuitiva para que um utilizador possa visualizar informação sobre o modelo.

A extensão "*Data Visualization*" existente no Autodesk Forge permite a visualização de dados provenientes de sensores, de forma interativa, pela colocação de objetos inteligentes designados "sprites" que consistem em elementos bidimensionais sobrepostos ao modelo para a representação de sensores. Esta extensão surge com um conjunto de componentes que permitem facilitar e guiar o processo de criação de um *digital twin* e disponibiliza uma aplicação de referência que utiliza código JavaScript com uma biblioteca React, aberta, focada na criação de interfaces de usuário em páginas web. Utilizando a aplicação de referência, apresenta um guia para criadores que se revela fundamental para os processos desenvolvidos e descritos nesta fase da dissertação.

Estes são alguns dos motivos que justificam a opção por estes serviços ao invés de outros para o desenvolvimento de um *digital twin*. Apresenta um bom conjunto de informações úteis para o funcionamento de uma aplicação, para a correção de erros provenientes da manipulação da aplicação de referência para obtenção de uma ligada a um caso em estudo e apresenta ainda um bom conjunto de exemplos de aplicações desenvolvidas com a plataforma. Os serviços da Autodesk Forge têm lançado constantemente novos recursos que foram sendo acompanhados ao longo do tempo e é muito provável, até por se tratar de algo relativamente recente, que mais tarde o trajeto percorrido para o desenvolvimento de um *digital twin* se torne mais fácil, eficaz e completo.

O processo para a criação do DT foi desta forma avançando com o auxílio do guia e a partir da aplicação de referência disponibilizados pelo Autodesk Forge. O guia pode ser consultado em https://forge.autodesk.com/en/docs/dataviz/v1/developers_guide/introduction/ para uma leitura mais completa da abordagem tomada e que se apresenta de seguida aplicada ao caso de estudo da Igreja dos Congregados:

1. Inicialmente, foi efetuada a instalação da aplicação de referência. Para tal, foi criada uma conta no Autodesk Forge, conjunto de serviços cuja licença não é abrangida pelo conjunto de *software* disponibilizado pela faculdade. O Forge dispõe de um período de teste de 3

meses, de tal forma que a conta foi criada cerca de 3 meses antes do momento da apresentação da ferramenta final, para que esta pudesse ser visualizada em tempo real no momento da prova de conceito. A instalação da aplicação foi realizada através da linha de comandos e recorrendo a uma clonagem de um repositório existente no GitHub. Para este procedimento foi necessária adicionalmente a instalação do Node.js, *software* de código aberto, multiplataforma, que permite a execução de código JavaScript fora de um navegador web.

2. Após a instalação, a aplicação deve ser iniciada a partir do terminal e gera uma porta, 9000 por predefinição, para a qual o acesso pode ser realizado através de um navegador. Trata-se de um servidor local e depois de controlado todo o processo deverá passar para um servidor num ambiente remoto alocado na FEUP para que o acesso seja concedido a qualquer docente ou estudante que o pretenda. É ainda assim importante relembrar que a licença da conta Forge, essencial para existência do *digital twin*, terá somente a duração de 3 meses. A interface que surge na porta 9000 pode ser visualizada na Figura 4.10.

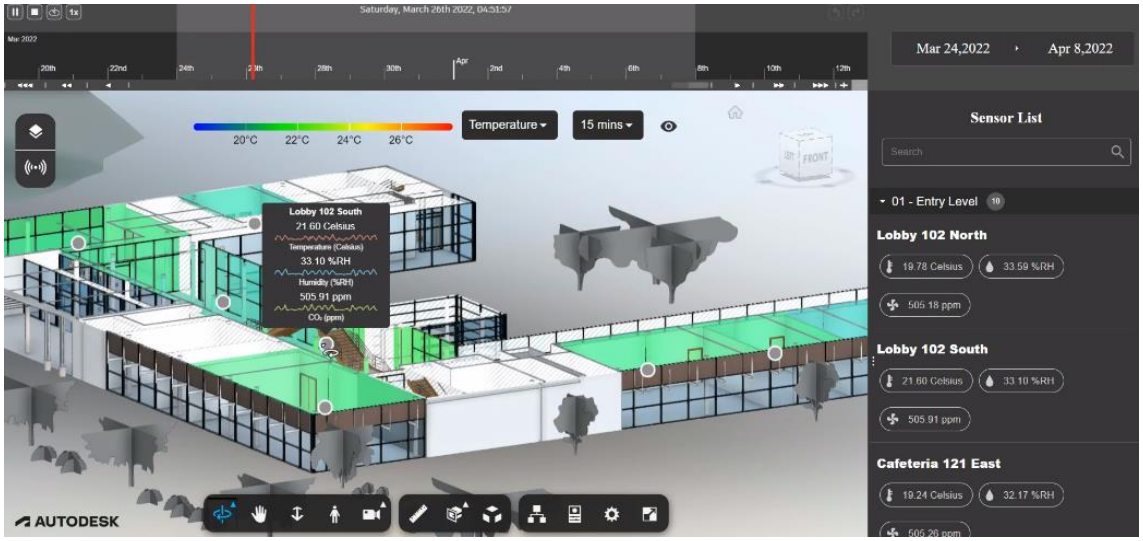


Figura 4.10 - Aplicação de referência dos serviços do Autodesk Forge, *Data visualization* no servidor local

3. A partir do momento em que está a aplicação estabilizada e a correr no servidor local, é possível substituir o modelo de exemplo designado "*Advanced Building*", padrão, por um modelo próprio importado a partir duma página web manipulada no interior da aplicação que permite realizar o *upload* diretamente a parir do *browser*, acedendo a localhost:9000/upload. Para que este passo funcione é necessário editar um ficheiro de template adicionando-lhe informação relativa à conta utilizada no Autodesk Forge, entre a qual o ID de cliente, uma chave da conta e um URL único. Este ficheiro é num terminal utilizado para carregar variáveis e criar um ambiente no qual passa a ser possível fazer upload do modelo exportado no formato IFC, sendo este traduzido automaticamente para um formato SVF. Inicialmente este processo foi conduzido utilizando um modelo de teste (Figura 4.11). Quando se garantiram as condições necessárias para assegurar que estas ferramentas estavam perfeitamente aptas para o desenvolvimento do *digital twin* e após criado um modelo definitivo representativo da Igreja dos Congregados, o processo foi novamente conduzido com este novo modelo (Figura 4.12).

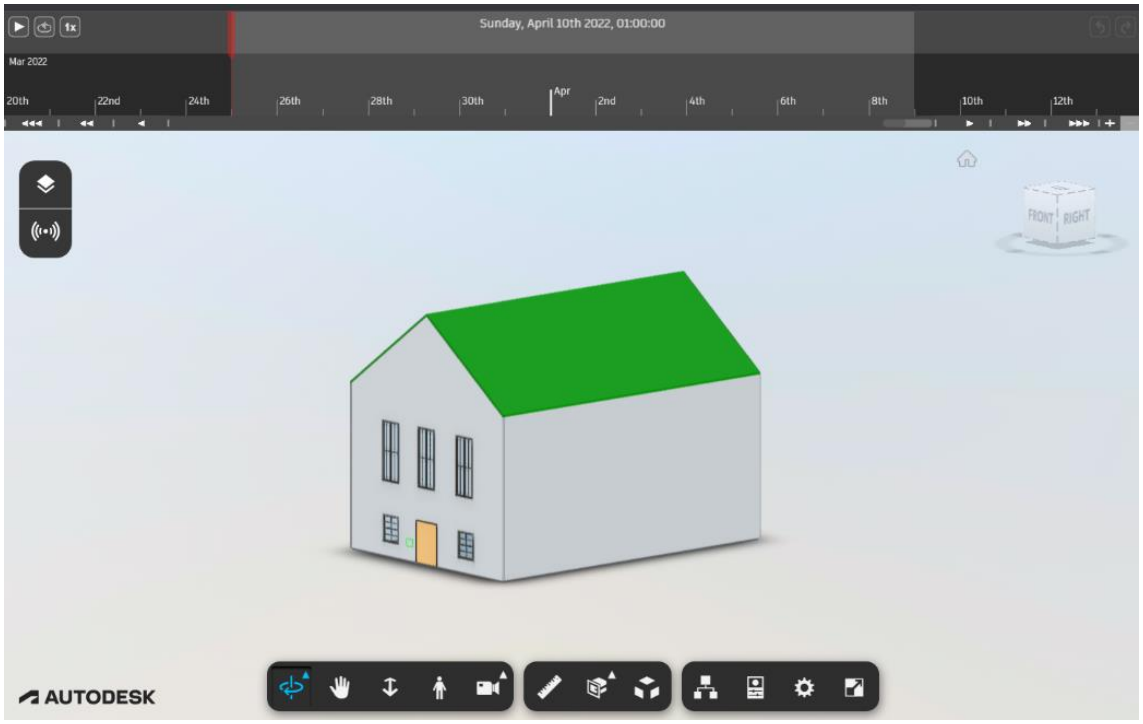


Figura 4.11 - Modelo de teste importado na aplicação



Figura 4.12 - Modelo definitivo importado na aplicação

Para além da página para upload de modelos está disponível uma página em http://localhost:9000/playground , quando o servidor local está em execução no terminal, que permite inserir posições para os sensores (*sprites*) de forma temporária, manual e visual, clicando num ponto do modelo presente na janela da visualização. É possível exportar uma lista com código JavaScript com a descrição de todos os pontos inseridos e para os quais é adquirida

informação relativa à posição em termos de coordenadas cartesianas e na forma de um dbID que funciona como um código que agrega num só valor o conjunto das coordenadas cartesianas. Clicando sobre os objetos representativos de sensores no modelo é com este recurso possível obter as coordenadas que são importantes para a edição dos ficheiros de JavaScript que compõe a aplicação e que a permitem reconfigurar de forma que nesses pontos surjam "sprites" a partir dos quais é disponibilizada uma janela para visualização de dados.

4.2.1.1.Integração dos dados

A integração dos dados provenientes do sistema de monitorização exige alguns conhecimentos de programação em JavaScript visto que a extensão da ferramenta adotada para a disponibilização do *digital twin* é formada por scripts editáveis e compostos nesta linguagem de programação a partir dos quais são realizadas as modificações que permitem realizar a passagem de uma aplicação de referência para uma aplicação própria.

Toda a programação realizada tem como objetivo constituir dois adaptadores, um adaptador para a gateway designado *influxdbdatagateway* e um adaptador para a base de dados designado i*nfluxdbdataadapter*. Estes adaptadores formam classes em JavaScript, isto é, grupos de objetos que partilham as mesmas propriedades e que se estabelecem como um modelo de padrão para cada objeto criado.

O *influxdbdatagateway* faz a aquisição dos dados na base de dados influxDB e retorna-os através de uma listagem de dispositivos que correspondem aos sensores instalados e de um modelo de agregação dos valores medidos. A listagem é acompanhada de uma descrição que inclui o tipo de dispositivo, a identificação (id) e o nome e o modelo de agregação efetua o pedido dos valores para determinado período de tempo e para determinada resolução.

O i*nfluxdbdataadapter* converte os dados encaminhados pelo *influxdbdatagateway* para o formato normalizado do destino. Carrega na plataforma a listagem de dispositivos e valores medidos.

Após a criação dos adaptadores, estes são registados e ativados na aplicação de uma forma que permite que sejam solicitados quando esta se processa.

5
CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de um *digital twin* no contexto da monitorização de estruturas visa substituir métodos tradicionais de monitorização conferindo ao processo maior eficiência, facilidade e fiabilidade. O facto de esta ferramenta não estar ainda implementada para este tipo de abordagem exige um estudo cuidado para que um caminho para a implementação possa ser idealizado. É importante compreender de que forma podem evoluir os procedimentos adotados nesta dissertação e é importante constituir uma base para que outros possam tomar conhecimento do domínio e prestar um contributo para o desenvolvimento dos *digital twins* neste campo.

De uma forma geral, para que estudemos a viabilidade para o desenvolvimento de um *digital twin* teremos necessariamente de associar sempre um caso de estudo, objetivos e determinadas condições iniciais. Estas três componentes são fundamentais e ainda que se relacionem devem inicialmente ser avaliadas de forma individualizada.

O caso de estudo abordado nesta dissertação estará neste momento sobretudo dependente daqueles que são os objetivos, que podem ser agrupados e divididos em dois principais e gerais ligados a duas componentes completamente diferentes, o da criação de uma aplicação que permita tornar o processo de monitorização da Igreja dos Congregados mais fácil, intuitivo e eficaz e que de facto acrescente algo relativamente a outros métodos de monitorização mais habituais em projetos desta tipologia e o da aprendizagem e sistematização de uma abordagem com os vários procedimentos necessários para a criação de uma ferramenta de apoio à monitorização e não só, que se irá certamente implementar em diversos processos existentes no mundo da engenharia civil mais cedo ou mais tarde.

Relativamente ao primeiro objetivo o desenvolvimento da aplicação não é suficientemente benéfico tendo em conta o esforço necessário com os recursos atuais e o facto de uma abordagem mais comum e simples como a da elaboração de um conjunto de painéis gráficos para visualização ser perfeitamente suficiente para a monitorização. Para tal contribuem também as condições iniciais que não permitiram dispensar a criação de um modelo BIM representativo da igreja. São muitos os projetos em que este passo é necessário para outras tarefas e desta forma modelos são criados com outros propósitos e acabam por consequentemente facilitar e acelerar as tarefas associadas somente ao digital twin. Apesar de tudo, com as plantas fornecidas pela equipa de trabalho responsável pela monitorização da igreja o tempo necessário para o desenvolvimento do modelo foi encurtado e não teve o impacto que poderia ter em termos de carga de trabalho caso estas não existissem ou não fossem fornecidas. Por outro lado, o trabalho realizado com os dados

teria de ser realizado de qualquer forma, independentemente de ser criado ou não um *digital twin* e este acaba por não ser nunca dispensável. Acaba por contribuir assim para que faça sentido desenvolver o *digital twin*. Mas o que aqui se revela é que estas condições iniciais podem por si só tornar viável ou não o desenvolvimento da ferramenta.

Num projeto para o qual tenham necessariamente de existir dados e para o qual existe um modelo tridimensional torna-se mais benéfico criar um *digital twin* visto que o trabalho a realizar se reduz à integração dos dados no modelo e à produção de um mecanismo de visualização. Caso não exista um modelo tridimensional criado, dependerá muito das exigências e dos objetivos a atingir pela equipa envolvida no projeto em articulação com o cliente.

Fatores externos a um projeto podem também exercer alguma influência sobre as condições iniciais. Um exemplo facilmente demonstrativo desta realidade é o da aprovação de 5,55 milhões de euros do Plano de Recuperação e Resiliência, por parte da Coesão Territorial, para a criação de um mapa do território continental de Portugal 3D até ao ano de 2024, recorrendo à tecnologia LiDAR. Esta tecnologia permite gerar modelos tridimensionais e é utilizada entre outros, em carros autónomos. A possibilidade de utilizar um edifício mapeado por esta tecnologia e neste contexto pode evitar a necessidade de criação de um modelo para efeitos de monitorização, tornando-se o processo menos moroso.

Cada caso de estudo deve ser avaliado de forma individual e com base na experiência e conhecimento dos intervenientes que terão de medir de alguma forma o retorno em função do esforço necessário para o trabalho.

No âmbito da sistematização de processos e da aprendizagem de uma tecnologia altamente emergente, segundo objetivo, é claramente benéfico reunir este tipo de conhecimento sobretudo tratando-se de um caso de estudo real que permite adquirir noções mais concretas e que possui um nível de sensibilidade e de responsabilidade superior. O trabalho que aqui é realizado permite compreender o ponto em que se encontram os *digital twins* na aplicação a casos práticos relacionados com o comportamento estrutural de edifícios e permite traçar um caminho para que estes evoluam e se tornem mais facilmente alcançáveis e eficientes. Neste aspeto, atravessamos uma fase na qual se aposta muito em provas de conceito e na qual se esperam desenvolvimentos que automatizem e agreguem procedimentos para a disponibilização destas ferramentas. Casos práticos em execução não são facilmente encontrados no contexto estudado, o que se relaciona também com o facto de não ser viável em detrimento de métodos tradicionais de monitorização.

Um dos maiores obstáculos atuais revelado neste processo que pode facilmente ser extrapolado a trabalhos semelhantes prende-se com o facto de envolver várias especialidades que obrigam a uma distribuição de tarefas por uma equipa de trabalho composta por especialistas na área da programação e na área da engenharia civil, acima de tudo. Um engenheiro civil sobretudo quando recém-formado e no contexto nacional dificilmente possui o conhecimento necessário para os procedimentos relacionados com o trabalho sobre os dados, que envolvem programação de um nível relativamente avançado perante as possibilidades de desenvolvimento de *digital twins* existentes no mercado atual. As exigências nos mais diversos projetos e a necessidade de engenheiros possuírem competências cada vez mais transversais poderá mais tarde e eventualmente alterar este paradigma. A formação deve ser atualizada e deve contemplar conhecimentos relacionados com novas tecnologias que permitem realizar trabalhos de formas mais competentes em períodos iguais ou inferiores. Por outro lado, um programador terá certamente dificuldade em aspetos relacionados com a interpretação estrutural dos dados. É ainda necessário algum elemento ou equipa responsável por orquestrar e montar um sistema de monitorização composto por sensores relativamente aos quais é necessário conhecimento

adicional e aprofundado. Toda esta dinâmica necessária pode facilmente contribuir para uma diminuição da eficiência nas operações a conduzir e para o surgimento de erros e problemas.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

É impossível prever em que estado estarão os *digital twins* cinco anos após o desenvolvimento desta dissertação. Apresentam potencial para um enorme conjunto de casos de aplicação e a sua evolução estará sempre associada à evolução destes casos. Procurarão corresponder às exigências presentes na indústria e terão de apresentar a flexibilidade necessária para acompanhar um incremento natural das mesmas à medida que o tempo avança e que o leque de coisas que se tornam possíveis aumenta.

É neste seguimento relativamente complicado compreender que tipo de trabalho poderia ser realizado no âmbito do desenvolvimento de um *digital twin* num momento mais avançado. As próprias aplicações que permitem a criação da ferramenta encontram-se em desenvolvimento e surgirão certamente novas que poderão vir a tornar o *digital twin* mais poderoso e o processo para a sua criação completamente diferente daquele que aqui foi adotado. O *Project Dasher* da Autodesk revela-se aliás um exemplo perfeitamente representativo desta realidade visto que se encontra em fase de desenvolvimento, porém poderia ser utilizado num momento em que estivesse finalizado e disponível ao invés dos serviços do Autodesk Forge, tornando uma parte relevante dos processos descritos totalmente diferentes ainda que se mantivessem os mesmos objetivos. Seria interessante criar uma metodologia que sistematizasse a criação de *digital twins* de uma forma programada para que se tornasse mais facilmente viável aplicar a metodologia a outros casos de estudo, porém, e por todos estes motivos, é ainda relativamente cedo para que se pense em algo assim e é difícil prever se em algum momento fará sentido pensar.

Relativamente à ferramenta obtida, ainda que os objetivos estejam cumpridos, é possível ir mais além. O desenvolvimento de uma aplicação desta tipologia nunca se considera verdadeiramente finalizado, tomando as condicionantes que neste caso se prendem com o tempo e com a capacidade do criador e procurando corresponder da melhor forma àquilo a que se propõe. Para o *digital twin* criado, são várias as possibilidades para a melhoria da ferramenta proporcionando ao utilizador uma melhor experiência na visualização de dados:

- Programação de um mecanismo de alerta a incluir na própria aplicação. Este mecanismo é criado na plataforma de visualização de painéis Grafana, ainda que durante a fase de dissertação não tenha sido possível observar a influência da obra que faria acionar a notificação, onde o processo é guiado pela própria aplicação que apresenta este recurso, porém o ideal é que a definição dos valores limite para os parâmetros medidos disparem uma notificação sobre o modelo tridimensional que é visualizado online, destacando o sensor onde o alerta ocorre;
- Os sensores e correspondentes parâmetros medidos podem ser associados a componentes do modelo de forma a que exibam mapas de calor relativos aos valores medidos em cada momento. Uma legenda de cores estaria associada ao nível de preocupação com determinado valor e seria necessário um painel para escolha dos sensores para os quais se pretende ativar este recurso visto que são vários os componentes do modelo e estrutura associados a várias medições gerando-se um problema de incompatibilidade de mapas;
- Ambicioso e muito exigente, o *digital twin* pode ser ligado a um programa de análise estrutural para que realize cálculo estrutural e forneça respetivos resultados em intervalos que permitam a execução do processo. O cálculo implica a passagem dos parâmetros medidos, com agregação de valores para intervalos que permitam obter valores únicos,

confiáveis e representativos das medições para o programa de cálculo onde são inseridos num novo modelo puramente estrutural, onde é realizado o cálculo e a partir do qual são enviados os resultados para a plataforma web que tratará de os disponibilizar também;

- Com os resultados do cálculo estrutural podem ser realizadas alterações ao modelo tridimensional para que este exponha a influência que sobretudo a obra para criação de uma estação de metro e abertura de uma nova linha induzem sobre a Igreja dos Congregados de uma forma intuitiva para o utilizador, na forma de deformadas por exemplo;

Naturalmente, também o próprio modelo BIM criado e carregado na plataforma pode ser melhorado até um ponto em que represente perfeitamente a Igreja dos Congregados. Para tal seria necessário recorrer a tecnologia de *laser scanning* e a fotogrametria.

Todos estes pontos apresentados podem constituir facilmente alvos para uma nova dissertação de mestrado numa faculdade de engenharia ou para um projeto de investigação ainda que a incerteza associada à utilização destas tecnologias apresente sempre um obstáculo a ter em conta.

Para finalizar, fica uma questão. Quanto tempo será necessário até que também nós humanos tenhamos um *digital twin* que nos permita evitar e resolver problemas ou que nos torne mais eficientes?

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] https://www.pwc.pt/pt/temas-actuais/industria-40.html (acedido Jul. 18, 2022).

[2] https://www.linkedin.com/pulse/industry-40-quarta-revolu%C3%A7%C3%A3o-industrial-cristiano-behringer-ferrari/?originalSubdomain=pt (acedido Jul. 29, 2022).

[3] https://www.compete2020.gov.pt/destaques/detalhe/Industria_4ponto0 (acedido Jul. 29, 2022).

[4] https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/technologies/industry-4-0 (acedido Mai. 05, 2022).

[5] https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/ (acedido Mai. 03, 2022).

[6] https://acontecendoaqui.com.br/marketing/artigo-industria-40-revolucao-inevitavel/ (acedido Mai. 03, 2022).

[7] https://v2com.com/2022/04/22/iot-sensores-inteligentes/ (acedido Jul. 07, 2022).

[8] Ala-Laurinaho Riku, «*Sensor Data Transmission from a Physical Twin to a Digital Twin*». Dissertação de Mestrado, Aalto University, 2019.

[9] https://medium.com/iotforall/iot-101-what-is-a-gateway-be066763b98d (acedido Jul. 07, 2022).

[10] https://www.kenwayconsulting.com/blog/data-is-the-new-oil/ (acedido Set. 07, 2022).

[11] https://en.wikipedia.org/wiki/Data (acedido Set. 07, 2022).

[12] https://blog.betrybe.com/tecnologia/processamento-de-dados/ (acedido Set. 08, 2022).

[13] https://www.adinstruments.com/tips/data-quality (acedido Set. 09, 2022).

[14] https://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9dia_m%C3%B3vel (acedido Set. 15, 2022).

[15] https://azure.microsoft.com/pt-pt/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-the-cloud/ (acedido Jul. 11, 2022).

[16] https://www.iapmei.pt/Paginas/Industria-4-0.aspx (acedido Ago. 18, 2022).

[17] https://business-it.pt/2022/04/29/idc-futurescape-investimento-em-transformacao-digital-vai-crescer-em-media-145-em-portugal/ (acedido Set. 22, 2022).

[18] https://portugaldigital.gov.pt/indicadores/como-portugal-compara-com-a-ue/ (acedido Ago. 18, 2022).

[19] https://www.tekla.com/br/recursos/artigos/o-que-%C3%A9-bim (acedido Jun. 29, 2022).

[20] Cardoso Andreia, Maia Bruno, Santos Diogo, Neves João, e Martins Margarida, «*BIM: O que é?*», 2012.

[21] https://pt.wikipedia.org/wiki/BIM (acedido Mar. 04, 2022).

[22] https://biblus.accasoftware.com/ptb/o-que-e-um-modelo-ifc-que-relacao-tem-entre-bim-e-ifc/ (acedido Abr. 23, 2022).

[23] Narciso Miguel, «*Contributo para a normalização BIM em Portugal*». Dissertação de Mestrado, Técnico de Lisboa, 2016.

[24] https://utilizandobim.com/blog/o-que-e-lod-bim/ (acedido Jul. 06, 2022).

[25] https://sdseduca.com.br/o-que-e-lod-e-qual-sua-importancia-para-os-projetistas-bim/ (acedido Jul. 06, 2022).

[26] https://www.iso.org/standard/68078.html (acedido Set. 23, 2022).

[27] https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/recording-heritage/ (acedido Set. 23, 2022).

[28] H. Løfaldli, «*Digital Twin Solution for Structural Health Monitoring of Stadia Structures*». Dissertação de Mestrado, Norwegian University of Science and Technology, 2018.

[29] https://visao.sapo.pt/exameinformatica/tutoriais/o-que-e/2020-05-13-compreender-o-futuro-o-que-sao-gemeos-digitais/ (acedido Ago. 21, 2022).

[30] https://www.bimexperts.com.br/post/digital-twins-building-information-modeling-bim (acedido Jun. 27, 2022).

[31] Z. Chevallier, B. Finance, e B. Cohen Boulakia, «*A Reference Architecture for Smart Building Digital Twin*», 2020.

[32] https://researchleap.com/digital-transformation-product-management-process-conception-digital-twin-impacts-different-stages/ (acedido Set. 23, 2022).

[33] S. Akro, «Visualizing Monitoring Data through BIM». Dissertação de Mestrado, Politecnico di Milano 2021.

[34] https://www.buildingsmart.org/take-bim-processes-to-the-next-level-with-digital-twins/ (acedido Mar. 06, 2022).

[35] https://tributech.io/blog/the-4-types-of-digital-twins (acedido Fev. 28, 2022).

[36] https://www.iberdrola.com/inovacao/gemeos-digitais (acedido Ago. 19, 2022).

[37] https://www.arcweb.com/blog/infrastructure-digital-twins-future-proofing-focus-year-infrastructure-conference (acedido Ago. 19, 2022).

[38] https://www.linkedin.com/pulse/o-que-%C3%A9-digital-twins-e-com-utilizar-na-gest%C3%A3o-de-ativos-rotondo/?trk=pulse-article&originalSubdomain=pt (acedido Ago. 19, 2022).

[39] https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-02-20-gartner-survey-reveals-digital-twins-are-entering-mai (acedido Ago. 21, 2022).

[40] https://venturebeat.com/business/how-singapore-created-the-first-country-scale-digital-twin/ (acedido Ago. 21, 2022).

[41] https://www.computerworld.com.pt/2022/07/01/gemeo-digital-e-centro-de-controlo-virtual-vao-melhorar-seguranca-rodoviaria-em-autoestrada-espanhola/ (acedido Ago. 22, 2022).

[42] https://www.palamir.com/news/5-real-world-examples-of-digital-twins (acedido Ago. 22, 2022).

[43] P. N. Martins, G. Pereira, L. Sanhudo, e A. A. Costa, «Digital Twin para a gestão inteligente de edifícios: o caso do Smart Office do Built Colab», em *4º Congresso Português de Building Information Modelling vol. 1 - ptBIM*, UMinho Editora, 2022, pp. 494–505. doi: 10.21814/uminho.ed.32.42.

[44] M. Deng, C. C. Menassa, e V. R. Kamat, «From BIM to Digital Twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry», *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 26, pp. 58–83, 2021, doi: 10.36680/J.ITCON.2021.005.

[45] https://pt.wikipedia.org/wiki/Banco_de_dados (acedido Jul. 12, 2022).

[46] https://blog.betrybe.com/tecnologia/bancos-de-dados/ (acedido Jul. 12, 2022).

[47] https://doc.dataiku.com/dss/7.0/ (acedido Jul. 12, 2022).

[48] https://rockcontent.com/br/blog/query/ (acedido Jul. 12, 2022).

[49] https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.8/concepts/key_concepts/ (acedido Jul. 12, 2022).

[50] https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.8/concepts/glossary/#measurement (acedido Mar. 08, 2022).

[51] G. Desogus, E. Quaquero, G. Rubiu, G. Gatto, e C. Perra, «Bim and iot sensors integration: A framework for consumption and indoor conditions data monitoring of existing buildings», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, n. 8, Abr. 2021, doi: 10.3390/su13084496.

[52] C. S. Araújo, A. Clara, e M. Smera Batista, «Integração de modelos físicos com modelos BIM utilizando IoT e Forge», 2019.

[53] R. Bray e T. Kelly, «Autodesk Tandem TM (Project Constructwin) Delivering the Value of BIM to Owners with a Digital Twin».

[54] https://aecmag.com/digital-twin/autodesk-tandem-digital-twins-in-the-cloud/ (acedido Abr. 21, 2022).

[55] https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Lessons-Project-Dasher-Building-Digital-Twin-Using-Forge-2021 (acedido Abr. 20, 2022).

[56] https://docplayer.com.br/95025041-Bim-aplicado-a-edificios-historicos-hbim.html (acedido Abr. 15, 2022).

[57] https://strelkamag.com/en/article/bim-to-the-rescue-of-heritage-sites (acedido Abr. 15, 2022).

[58] https://www.scaleyourapp.com/what-is-grafana-why-use-it-everything-you-should-know-about-it/ (acedido Jul. 13, 2022).

[59] https://www.igrejacongregados.com/?cat=historia (acedido Abr. 27, 2022).

[60] https://forums.autodesk.com/t5/revit-architecture-forum/import-3d-autocad-model-into-revit/td-p/4438915 (acedido Abr. 24, 2022).

[61] https://fmsystems.com/blog/revit-tips-part-3-the-difference-between-revit-type-and-instance-parameters/ (acedido Abr. 25, 2022).

[62] https://www.metrodoporto.pt/pages/636 (acedido Mai. 29, 2022).

[63] https://mapcarta.com/pt/35959878 (acedido Abr. 27, 2022).

[64] https://novaslinhas.metrodoporto.pt/zonas_de_intervencao/praca-da-liberdade-largos-dos-loios-clerigos-e-almada/ (acedido Mai. 29, 2022).

[65] https://viva-porto.pt/metro-do-porto-obras-das-linhas-rosa-e-amarela-avancam-a-bom-ritmo/ (acedido Ago. 01, 2022).

[66] https://docs.influxdata.com/influxdb/v2.2/reference/sample-data/ (acedido Mar. 11, 2022).

[67] https://docs.influxdata.com/telegraf/v1.22/ (acedido Mar. 07, 2022).

[68] https://grafana.com/docs/grafana/latest/ (acedido Mar. 15, 2022).

[69] https://docs.influxdata.com/influxdb/v2.2/ (acedido Mar. 07, 2022).

[70] https://docs.influxdata.com/influxdb/v2.4/reference/sample-data/ (acedido Set. 02, 2022).

[71] https://www.influxdata.com/time-series-platform/telegraf/ (acedido Set. 02, 2022).

[72] https://www.anaconda.com/ (acedido Mai. 02, 2022).

[73] https://www.voitto.com.br/blog/artigo/anaconda-python-ide (acedido Mai. 02, 2022).

[74] https://pt.wikipedia.org/wiki/WireGuard (acedido Mai. 16, 2022).

[75] https://gist.github.com/ilap/cb6d512694c3e4f2427f85e4caec8ad7 (acedido Jun. 23, 2022).