



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
DE PRODUÇÃO – PPGEF

---



# **Manutenção e Monitoramento Virtual do Patrimônio Edificado com Sistemas de Modelagem da Informação da Construção**

**OTÁVIO CÉSAR DE PAIVA VALADARES**

Manaus – Amazonas

2022

Otávio César de Paiva Valadares

**Manutenção e Monitoramento Virtual do Patrimônio  
Edificado com Sistemas de Modelagem da Informação da  
Construção**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu*, em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) como pré-requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Amazonas.

**Área de concentração:** Tecnologias Emergentes.

**Linha de Pesquisa:** Internet das Coisas.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz de Souza Pio

Manaus – Amazonas

2022

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

V136m Valadares, Otávio César de Paiva  
Manutenção e monitoramento virtual do patrimônio edificado com sistemas de modelagem da informação da construção / Otávio César de Paiva Valadares . 2022  
91 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: José Luiz de Souza Pio  
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) -  
Universidade Federal do Amazonas.

1. Building Information Modelling. 2. Internet das Coisas. 3. Manutenção Predial. 4. Sensores. 5. Gestão da Manutenção. I. Pio, José Luiz de Souza. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

Otávio César de Paiva Valadares

# **Manutenção e Monitoramento Virtual do Patrimônio Edificado com Sistemas de Modelagem da Informação da Construção**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu*, em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) como pré-requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Amazonas.

Aprovado em 28 de novembro de 2022

## **BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. José Luiz de Souza Pio**

Orientador e Presidente da Banca  
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

---

**Prof. Dr. Dércio Luiz Reis**

Universidade Federal do Amazonas - UFAM  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Produção

---

**Prof. Dr. Gustavo Cunha da Silva Neto**

Universidade Federal do Amazonas - UFAM  
Professor Convidado

Manaus – Amazonas

2022

*Este trabalho é dedicado aos trabalhadores da indústria  
que doam suas vidas à labuta diária, e que, num futuro não muito distante,  
serão confrontados pela drástica mudança proporcionada pela chegada da Indústria 4.0.*

# Agradecimentos

Inicialmente agradeço a Deus, pela existência e luz de sabedoria;

Agradecimento inicial à Superintendência da Zona Franca de Manaus - SUFRAMA, que propôs a transformação através da formação e capacitação dos seus profissionais frente a nova revolução que se inicia;

À Universidade Federal do Amazonas - UFAM, a *Alma Mater* que forneceu estrutura e oportunidade;

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção - PPGEP, que organizou e estruturou um corpo acadêmico que proporcionou um curso de excelência;

Ao Professor Doutor José Luiz de Souza Pio, pela disponibilidade, orientação e pela grande amizade adquirida durante a jornada;

À minha família, em particular meus pais que sempre me incentivaram aos estudos de modo continuado e pela formação cidadã;

À minha esposa Amanda Valadares e filha Eva que sempre entenderam o tempo dividido entre os estudos e vida familiar, mostrando que o estudo transforma e muda, através do exemplo;

Aos amigos e colegas de trabalho que sempre dividiram o talento profissional e carga de serviços, que possibilitou o desenvolvimento da pesquisa dentro da instituição e na problemática do cotidiano;

Aos Professores Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, Professora Samantha Pinheiro, Professora Liliane Brito de Melo, que através da orientação dada nos programas de iniciação científica inspiraram a continuidade dos estudos.

Agradeço a todos os professores do PPGEP e servidores que contribuíram para a realização deste trabalho. Obrigado pela dedicação e tempo despendido em auxílio para realização da pesquisa.

*“Em algum lugar de mim está um sensor de curiosidade.  
Eu quero saber o que há na próxima colina. Você sabe, as pessoas  
podem viver mais tempo sem comida do que sem informação.  
Sem informações, você ficaria louco.”  
(Arthur C. Clarke, Escritor)*

# Resumo

Globalmente os sistemas de Modelagem de Informação das Construções (em inglês, *Building Information Modeling - BIM*) tem se tornado uma tendência dominante na implementação sistemática de projetos de engenharia, otimizando o gerenciamento das informações ao longo do ciclo de vida da edificação ou instalação. Nessa mesma direção, o conceito de Internet das Coisas (em inglês, *Internet of Things - IoT*) também tem sido peça chave na eficiência e na integração com outras tecnologias, com destaque para o desenvolvimento da conectividade de dispositivos, principalmente em sensores e atuadores. Essas tecnologias, quando integradas, permitem a coleta de informações, favorecendo a manutenção, o controle de edificações e seus equipamentos, principalmente quando aplicados no campo da automação e na construção de modelos virtuais que facilitam para o usuário a interpretação do que está acontecendo em tempo real. Possibilitando ainda, através dos dados obtidos de sensores e atuadores a tomada de decisões com maior precisão, podendo ainda indicar o momento mais apropriado para a realização de manutenções. Nesse sentido o presente trabalho busca a descrição e o desenvolvimento de um modelo de manutenção e controle predial, baseado na integração de dados de uma rede de sensores em um sistema BIM, possibilitando o gerenciamento, controle e manutenção virtual em um prédio existente, possibilitando a redução de custos com a manutenção e aumento de vida útil de suas instalações e equipamentos.

**Palavras-chave:** Building Information Modelling, Internet das Coisas (IoT), Manutenção Predial, Sensores, Gestão da Manutenção.

# Abstract

Globally, Building Information Modeling systems have become a dominant trend in the systematic implementation of engineering projects, optimizing information management throughout the lifecycle of the building or facility. In this same direction, the concept of Internet of Things has also been a key part of efficiency and integration with other technologies, with emphasis on the development of device connectivity, especially in sensors and actuators. These technologies, when integrated, allow the collection of information favoring the maintenance and control of buildings and their equipment, especially when applied in the field of automation and in the construction of virtual models that make it easier for the user to interpret what is happening in real time. It also enables, through the data obtained from sensors and actuators, decision making with greater precision, and can also indicate the most appropriate time to carry out maintenance. In this sense, the present work seeks to describe a building maintenance and control model, based on the integration of data from a sensor network in a BIM system, enabling the management, control and virtual maintenance in an existing building, enabling the reduction of maintenance costs and the increase of the useful life of its installations and equipments.

**Keywords:** Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT), Building Maintenance, Sensors, Facility Management, Maintenance Management.

# Lista de ilustrações

Figura 1	–	Repositório das informações BIM no ciclo de vida da edificação. . . . .	26
Figura 2	–	Modelo de Maturidade Bew-Richards. . . . .	29
Figura 3	–	Transformação de dados BIM em banco de dados relacional usando novo esquema de dados. . . . .	32
Figura 4	–	Estrutura híbrida utilizando semântica web e banco de dados relacional. . . . .	33
Figura 5	–	Estrutura da integração de BIM e rede de sensores para o desempenho de um edifício. . . . .	34
Figura 6	–	Referência da placa microcontrolador ESP32-WROOM-32. . . . .	39
Figura 7	–	Referência de pinos I/O da placa ESP32-WROOM-32. . . . .	39
Figura 8	–	Tipos de topologia de rede. . . . .	40
Figura 9	–	Arquitetura de rede Wi-Fi tradicional. . . . .	41
Figura 10	–	Arquitetura de rede ESP-Wi-Fi-MESH. . . . .	41
Figura 11	–	Módulo acelerômetro e giroscópio - sensor de vibração. . . . .	42
Figura 12	–	Vistas do sensor de temperatura e umidade DHT-11. . . . .	43
Figura 13	–	Vistas do sensor transformado de corrente SCT-013. . . . .	44
Figura 14	–	Diagrama de circuitos transformador de corrente SCT-013-000. . . . .	44
Figura 15	–	Modelagem inicial da integração BIM-IoT. . . . .	49
Figura 16	–	Modelagem metodológica conceitual da integração BIM-IoT. . . . .	51
Figura 17	–	Instalações da SUFRAMA em CAD e BIM. . . . .	54
Figura 18	–	Vista aérea da SUFRAMA. . . . .	56
Figura 19	–	Vista superior da cobertura do prédio da SUFRAMA. . . . .	57
Figura 20	–	Módulo microcontrolador ESP32-WROOM-DEV. . . . .	58
Figura 21	–	Módulo sensor de temperatura e umidade. . . . .	58
Figura 22	–	Modulo sensor de vibração e acelerômetro. . . . .	59
Figura 23	–	Módulo sensor de corrente elétrica YHDC SCT-013-000 . . . . .	59
Figura 24	–	Placa eletrônica para leitura do sensor transformador de corrente elétrica SCT-013-000 . . . . .	60
Figura 25	–	Estrutura da aplicação - instalação de software. . . . .	60
Figura 26	–	Estrutura de aplicação dos sensores. . . . .	61
Figura 27	–	Caixa de abrigo dos sensores e MCU. . . . .	62
Figura 28	–	Abrigo do sensor de temperatura em PVC - vista frontal . . . . .	62
Figura 29	–	Visualização da modelagem BIM em <i>Revit</i> . . . . .	63
Figura 30	–	Estrutura de utilização do servidor em nuvem para IoT/AWS e Forge. . . . .	64
Figura 31	–	Estrutura simplificada do modelo. . . . .	64
Figura 32	–	Apresentação Gráfica das Leituras de temperatura do sensor. . . . .	65
Figura 33	–	Apresentação Gráfica do modelo BIM. . . . .	66
Figura 34	–	Análise de sinais e espectros motores dos ventiladores do VRF. . . . .	67
Figura 35	–	Monitoramento da alimentação de corrente elétrica de uma unidade externa de VRF. . . . .	68

Figura 36 – Estrutura de integração BIM-IoT com utilização de sensores. . . . .	70
Figura 37 – Camada e Ambiente físicos. . . . .	70
Figura 38 – Camada web - Tratamento e análise dos dados. . . . .	71
Figura 39 – Camada web - Ambiente de visualização. . . . .	72
Figura 40 – Camada web - Ambiente de decisório e supervisão. . . . .	72
Figura 41 – Virtualização BIM. . . . .	73
Figura 42 – Ambiente de visualização de dados dos sensores. . . . .	73
Figura 43 – Dados gerados pela plataforma AWS. . . . .	74

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela comparativa dos microcontroladores do mercado . . . . .	38
Tabela 2 – Parâmetros do sensor transformador de corrente não invasivo . . . . .	44
Tabela 3 – Especificações Técnicas das Unidades Externas dos Equipamentos VRF	66
Tabela 4 – Tabela de preços para a manutenção preventiva e corretiva dos compressores do tipo parafuso do <i>Chiller</i> da sede da SUFRAMA do Contrato nº 22/2021 de Manutenção Predial . . . . .	75
Tabela 5 – Tabela de preços para a manutenção preventiva com substituição de rolamentos dos compressores do tipo parafuso do <i>Chiller</i> da sede da SUFRAMA do Contrato nº 22/2021 de Manutenção Predial . . . . .	76

# Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
AECO	Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação
AIM	Asset Information Model - Modelo de Informação de Ativos
AI	Artificial Intelligence - Inteligência Artificial
AIoT	Artificial Intelligence of Things - Inteligência Artificial das Coisas
AM	Asset Management - Gerenciamento de Ativos
ap.	<i>apud</i>
API	Application Programming Interface - Interface de Programação de Aplicativo
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
AWS	Amazon Web Service
BAS	Building Automation System - Sistema de Automação da Construção
BASC	Building Automation System and Control - Sistema e Controle de Automação da Construção
BCF	Building Collaboration Format - Formato de Colaboração BIM
BIM	Building Information Modeling - Modelagem da Informação na Construção
BLE	Bluetooth Low Energy - Bluetooth de Baixo Consumo Energético
CC/AC	Corrente Alternada / Alternating Current
CAD	Computer-aided Design - Projeto Assistido por Computador
CADD	Computer-aided Design and Drafting - Projeto e Desenho Assistido por Computador
CAFM	Computer-aided Facility Management - Gerenciamento de Instalações Assistido por Computador

CC/DC	Corrente Contínua / Direct Current
CM	Corrective Maintenance - Manutenção Corretiva
CMMS	Computerized Maintenance Management System - Sistema Computadorizado de Gerenciamento da Manutenção
COBie	Construction Operations Building Information Exchange - Intercâmbio de Informações de Operações da Construção de Edifícios
DB	Data Base - Banco de Dados
DL	Deep Learning - Aprendizado Profundo
DT	Digital Twins - Gêmeos Digitais
DMG	Decision-Making Grid - Matriz de decisão
ERP	Enterprise Resource Planning - Sistema Integrado de Gestão Empresarial
FaaS	Function as a Service - Função como Serviço
FFT	Fast Fourier Transform - Transformada Rápida de Fourier
FM	Facility Management - Gestão de Instalações
FMECA	Failure Mode Effects and Criticality Analysis - Efeitos do Modo de Falha e Análise Crítica
FMM	Facilities Maintenance Management - Gestão de Manutenção de Instalações
FMS	Facilities Management Systems - Sistemas Gestão de Instalações
GIS	Geographic Information System - Sistema de Informação Geográfica
GUI	Graphical User Interface - Interface Gráfica de Usuário
GUID	Global Unique Identifier - Identificador Único Global
GPIO	General Purpose Input/Output - Portas Programáveis de Entrada e Saída de Dados
HCI	Human-Computer Interaction - Interação Computador-Humano
HVAC	Heating, Refrigerating and Air Conditioning - Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado
I/O	Input and Output - Entrada e Saída

I2C	Inter-Integrated Circuit I <sup>2</sup> C- Circuito Inter-integrado
IaaS	Infrastructure as a Service - Infraestrutura como Serviço
ibid.	<i>ibidem</i> , que significa: no mesmo local, empregado quando o texto extraído é do mesmo autor e obra citadas anteriormente
id.	<i>idem</i> , que significa: o mesmo
IDE	Integrated Development Environment - Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IFC	Industry Foundation Classes - Classes Fundamentais da Industria
IIoT	Industrial IoT - Industrial IoT
IMU	Inertial Measurement Unit - Unidade de Medida Inercial
IoT	Internet of Things - Internet das Coisas
IP	Internet Protocol - Protocolo de Internet
IPv6	Internet Protocol version 6- Protocolo de Internet versão 6
ISA	Instruction Set Architecture - Arquitetura de Conjuntos de Instruções
IT	Information Technology - Tecnologia da Informação
JSON	JavaScript Object Notation - Notação de Objeto JavaScript
LAN	Local Area Network - Rede Local
loc. cit.	<i>loco citato</i> , que significa: na obra citada; utilizada quando se quer indicar que a citação foi extraída da mesma obra referida anteriormente, mas entre esta última e a nova citação houve outras referencias de obras e autores diferentes
LOD	Level of Detail - Nível de Detalhe
M2M	Machine to Machine - Máquina a Máquina
MAC	Media Access Control - Controle de Acesso de Mídia
MCU	Microcontroller Unit - Unidade Microcontroladora
MEP	Mechanical, Electrical and Plumbing - Mecânica, Elétrica e Hidráulica
ML	Machine Learning - Aprendizado de Máquina

MQTT	Message Queuing Telemetry Transport - Transporte de Telemetria de Enfileiramento de Mensagens
MR	Mappers and Reducers - Mapeamento e Redução
MTBR	Mean Time Between Failures - Tempo Médio Entre Falhas
MVD	Model View Definition - Modelo de Definição Visual
MPU	Motion Processing Unit - Unidade de Processo de Movimento
NIBS	National Institute of Building Sciences - Instituto Nacional de Ciências da Construção
NoSQL	Not Only SQL - Banco de Dados Não Relacional
NTP	Network Time Protocol - Protocolo de Tempo da Rede
op. cit.	<i>opus citatum</i> , que significa: na obra citada
O&M	Operations and Maintenance - Operação e Manutenção
OEE	Overall Equipment Effectiveness - Eficiência Geral do Equipamento
p.	página ou páginas
PaaS	Platform as a Service - Plataforma como Serviço
PDCA	Plan, Do, Check, Act - Planejar, Fazer, Verificar, Agir
PLM	Product Lifecycle Management - Gerenciamento do ciclo de vida do produto
PM	Preventive Maintenance - Manutenção Preventiva
PdM	Predictive Maintenance - Manutenção Preditiva
ppm	partículas por milhão
RCM	Reliability Centered Maintenance - Manutenção Centrada em Confiabilidade
RDF	Resource Description Framework - Estrutura de Descrição de Recursos
RH	Recursos Humanos
RFID	Radio Frequency Identifications - Identificação por Rádio Frequência
RSL	Revisão Sistemática da Literatura

RSSI	Received Signal Strength Indicator - Indicação da intensidade do sinal recebido
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
SaaS	Software as a Service - Software como Serviço
sic.	Expressão usada para assinalar erros ou afirmações inusitadas do original
SOA	Service-Oriented-Architecture - Serviço Orientada pela Arquitetura
SoC	System on Chip - Sistema em Chip
SPARQL	Query Language and Protocol - Protocolo e Linguagem de Consulta
SQL	Structured Query Language - Linguagem de Consulta Estruturada
SUFRAMA	Superintendência da Zona Franca de Manaus
TCP	Transmission Control Protocol - Protocolo de Controle de Transmissão
UI	User Interface - Interface de Usuário
UX	User Experience - Experiência do Usuário
v.	volume ou volumes
v.o.	Ver original
VR	Virtual Reality - Realidade Virtual
WLAN	Wireless Local Area Network - Rede Local Sem-fio

# Lista de símbolos

$\Omega$	ohms
$^{\circ}\text{C}$	graus célsius
A	amperes
B	bytes
bps	bites por segundo
cm	centímetros
G	giga
h	horas
Hz	hertz
K	quilo
Kg	quilograma
M	mega
m	metros
min	minutos
mm	milímetros
s	segundos
V	volts
W	watt

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>24</b>
1.1.1	Objetivo Geral	24
1.1.2	Objetivos Específicos	24
<b>1.2</b>	<b>Estrutura da Dissertação</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b><i>Building Information Modeling - BIM</i></b>	<b>25</b>
2.1.1	Maturidade BIM	26
2.1.1.1	Níveis de Maturidade BIM	27
2.1.2	BIM na Manutenção Predial	28
<b>2.2</b>	<b>Interoperabilidade de dados utilizando entre as plataformas BIM e IoT</b>	<b>30</b>
<b>2.3</b>	<b>Monitoramento de sistemas por meio de sensores</b>	<b>32</b>
2.3.1	<i>Serverless Computing</i>	35
2.3.2	Controle e Análise Preditiva baseada em IoT	36
2.3.2.1	Análise Preditiva	36
2.3.2.2	Controle Vibracional	37
2.3.2.3	Monitoramento da Corrente Elétrica	37
<b>2.4</b>	<b>Dispositivos e Componentes</b>	<b>37</b>
2.4.1	Módulo ESP32	37
2.4.1.1	Estrutura de rede ESP-WIFI-Mesh	40
2.4.2	Módulo Acelerômetro e Giroscópio MPU-6050	41
2.4.3	Módulo de sensor de temperatura e umidade DHT-11	42
2.4.4	Módulo de sensor de corrente não invasivo SCT-013	43
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Estrutura de análise de dados</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Integração entre sensores e modelos arquitetônicos utilizando modelagem BIM no suporte de decisões</b>	<b>46</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Desenvolvimento do modelo</b>	<b>50</b>
4.1.1	Dispositivos utilizados	52
4.1.1.1	Sensor de temperatura	52
4.1.1.2	Sensor de aceleração	53

4.1.1.3	Sensor de corrente elétrica . . . . .	53
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTOS E RESULTADOS . . . . .</b>	<b>54</b>
<b>5.1</b>	<b>Procedimentos experimentais . . . . .</b>	<b>54</b>
<b>5.2</b>	<b>Setup Experimental . . . . .</b>	<b>55</b>
5.2.1	Ambiente Físico . . . . .	55
5.2.1.1	Caracterização da edificação . . . . .	56
5.2.2	Sensores e Microcontroladores . . . . .	57
5.2.2.1	Modulo MCU ESP32 . . . . .	57
5.2.2.1.1	Modulo sensor de temperatura e umidade . . . . .	57
5.2.2.1.2	Modulo sensor de vibração - acelerômetro e giroscópio . . . . .	57
5.2.2.1.3	Modulo sensor de corrente elétrica . . . . .	58
5.2.3	Montagem dos dispositivos . . . . .	60
5.2.4	Tratamento e Análise das Informações . . . . .	61
5.2.5	Modelagem da Edificação . . . . .	62
5.2.6	Ambiente Digital . . . . .	63
<b>5.3</b>	<b>Experimentos Realizados . . . . .</b>	<b>65</b>
5.3.1	Experimento 1 - Temperatura e umidade . . . . .	65
5.3.2	Experimento 2 - Vibração . . . . .	66
5.3.3	Experimento 3 - Corrente Elétrica . . . . .	67
<b>5.4</b>	<b>Resultados . . . . .</b>	<b>68</b>
5.4.1	Modelo de integração BIM-IoT com utilização de sensores . . . . .	68
5.4.2	Camada física . . . . .	70
5.4.3	Camada de tratamento e análise dos dados . . . . .	71
5.4.4	Ambiente de visualização BIM-IoT . . . . .	71
5.4.4.1	Visualização BIM . . . . .	71
5.4.5	Ambiente decisório e supervisão . . . . .	72
5.4.6	Observações Experimentais . . . . .	74
<b>5.5</b>	<b>Análise Custos e Implementação . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>5.6</b>	<b>Desafios e Oportunidades . . . . .</b>	<b>77</b>
5.6.1	Considerações quanto a qualificação dos profissionais: desafios e oportunidades	77
5.6.2	Escalabilidade do sistema . . . . .	77
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>6.1</b>	<b>Contribuições da Pesquisa . . . . .</b>	<b>80</b>
6.1.1	Estrutura BIM-IoT . . . . .	80
6.1.2	Conectividade física e digital . . . . .	80
6.1.3	Colaboração para divulgação da Estratégia Nacional de Disseminação Building Information Modeling - BIM BR . . . . .	80
6.1.4	Potencial para trabalhos futuros . . . . .	80

6.1.4.1	Integração BIM e IoT para a manutenção preditiva . . . . .	80
6.1.4.2	Escalabilidade do modelo . . . . .	81
6.1.4.3	Novas tecnologias disruptivas . . . . .	81
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>83</b>

# 1 Introdução

Com a rápido aumento do poder computacional e a digitalização de processos, em parte resultante das transformações da Indústria 4.0, e com o amplo uso da conectividade, trazido pela Quarta Revolução Industrial, atividades como a manutenção predial e a gestão de ativos tem passado por processos cada vez mais desafiadores, envolvendo desde adaptações tecnológicas até a otimização de sistemas, requisitando gradualmente uma maior integração entre as mais variadas plataformas e os diversos setores que as compõe, possibilitando uma melhor gestão e controle dos serviços.

Embora esses avanços tenham facilitado uma maior estruturação dos processos, surgiu também a necessidade de integração em tempo real entre os sistemas prediais e o meio físico, de forma que melhor se viabilize o gerenciamento de recursos e a manutenção preditiva. No setor público, seus edifícios ainda carecem de estruturas funcionais e de metodologias capazes de propor uma maior eficiência e rapidez na tomada de decisão, tornando esse avanço ainda mais distante (BRUNET et al., 2019).

Nesse cenário, de avanço tecnológico e de novos desafios, é que aparecem também outras tecnologias técnicas, como é o caso da Modelagem de Informação das Construções (em inglês, *Building Information Modeling - BIM*), onde processos e projetos que antes adotavam meios físicos de armazenamento e de fluxo, passam agora para modelos virtuais, possibilitando um aumentando significativo da quantidade de informações, saindo do esquema de trabalho individual e em grupo, para a adoção do trabalho colaborativo, resultando em um maior controle e interpretação das informações, ainda na fase de projetos. Além disso, a adoção do BIM possibilita a realização projetos mais precisos, quando comparados com seus predecessores, sendo uma ferramenta significativa para os dias atuais, considerando os recursos cada vez mais enxutos disponibilizados atualmente, bem como os preços cada vez mais competitivos (COSTIN; EASTMAN, 2019).

Entretanto, o BIM se configura em uma aplicação mais complexa, não se limitando a fluxos de trabalho e informações de projetos. Correspondendo a uma modelagem e gerenciamento de informações que acompanha toda a vida de uma construção, da concepção, passando pela manutenção dos seus sistemas e ativos, até sua demolição. Associado a esta nova tecnologia surgem também novos conceitos, como alternativas que contribuem para melhora dos processos, os Gêmeos Digitais, em inglês, *Digital Twins - DT*, tem representado no meio virtual as características geométricas, tridimensionais, bem como a representação discreta, correspondente a detalhes, informações e atributos semelhantes aos encontrados dessas mesmas edificações no meio físico, surgindo como solução para uma compreensão digital da construção como também entrega à manutenção e a gestão de ativos dados mais

reais e dinâmicos (XU et al., 2018).

Ainda no campo de avanço tecnológico, não é só a construção que se desenvolvido e experimentado a quarta revolução, com os avanços da análise de dados e da capacidade de processamento, observado o rápido crescimento tecnológico em soluções relacionadas a conectividade e dispositivos IoT, Internet das Coisas (em inglês, *Internet of Things - IoT*), com a utilização de sensores que permitem o monitoramento remoto de informações, trazendo novas maneiras de conectar o mundo físico ao mundo digital (SCHWAB, 2016). Assim, observa-se que esse tema, apesar de muito explorado, possui também enorme potencial e importância, tendo em vista variadas contribuições que ainda podem ser geradas para o desenvolvimento de outras novas tecnologias que incentivem aprimoramento, além das alternativas anteriores e já consagradas, outras soluções com abordagens radicalmente novas (HU et al., 2018).

A utilização de sensores e atuadores, há muito tempo vem tornado o gerenciamento da manutenção mais eficiente, evitando desgastes prematuros de peças e paradas por panes, colaborado na automação de processos existentes. Além disso, tem possibilitado a coleta de informações em ambientes e equipamentos, dos mais diversos, e em tempo real, sem a necessidade de deslocamento, reduzindo os riscos para a operação. Paralelamente, esse monitoramento mais facilitado, tem permitindo também, considerando o grande volume de dados gerados, novas perspectivas a partir dos interpretados, favorecem melhores análise técnicas, tomada de decisão e automação de rotinas, tornando os mais diversos processos cada vez mais eficientes.

A partir disso, a pesquisa se empenha para que utilizando a plataforma BIM em conjunto aos sensores IoT, encontrar e identificar soluções área da engenharia, principalmente as relacionadas ao campo da manutenção predial, de modo que se aprimorem ainda mais os níveis de gestão da manutenção e de ativos. Do mesmo modo, se verifica também a utilização e coleta de dados, obtidos em campo, para que possibilitem, não só na administração pública como também na iniciativa privada, uma melhor utilização e aproveitamento de recursos humanos e materiais nos equipamentos e no patrimônio empregados na realização das atividades de manutenção.

Assim, a partir do monitoramento da edificação e dos seus ativos, verificou-se que é possível identificar e rastrear defeitos de modo mais sistemático, bem como, otimizar o funcionamento dos equipamentos objetivando reduzir as suas falhas e paradas. Desse modo, o monitoramento de ambientes e equipamentos, associado a utilização de sensores, se mostra fundamental e importante para as atividades de manutenção predial, uma vez que permite a realização de manutenções menos onerosas quando comparadas às realizadas após o aparecimento de defeitos mais críticos (TATIYA, 2020; SUSANTO et al., 2020; HILAL; MAQSOOD; ABDEKHODAE, 2019; XU et al., 2018).

Em outros termos, busca-se a integração entre duas plataformas que já permeiam

o campo da engenharia, mais especificamente o da manutenção predial, que é o BIM e a utilização de sensores, sendo este último ligado diretamente ao conceito de Internet das Coisas, possibilitando a comunicação entre o meio físico e o digital (HAUGHIAN, 2018, p. 4). Possibilitando também a representação dos dados obtidos de forma orientada à plataforma BIM, focando na gestão da manutenção predial, a fim de monitorar ambientes e equipamentos nela inseridos.

A integração e a interoperabilidade BIM-IoT é apresentada em diversos estudos (GAO et al., 2021; DESOGUS et al., 2021; YU et al., 2021; ALTOHAMI et al., 2021; MORETTI et al., 2020; TANG et al., 2019a; CARNEIRO et al., 2019; PARISE et al., 2019; WONG; GE; HE, 2018; MACHADO; RUSCHEL, 2018b; NGUYEN, 2016), embora os trabalhos remetam ao assunto, pouco se aborda sobre a como é feita a coleta de dados, a construção e aplicação dos sensores, o tipo de rede utilizada, como os dados são coletados e sua integração ao BIM, bem como apresentar estudos relacionados ao emprego em uma edificação existente e seus impactos na manutenção predial e na tomada de decisões.

Nesse contexto, a problemática da dissertação pode ser sintetizado na seguinte pergunta: *Como manter e controlar o patrimônio edificado com base na coleta de dados, facilitando a tomada de decisão para a manutenção das edificações?*

Nesse sentido, para se manter as instalações prediais, deve-se priorizar o monitoramento dos seus ambientes e dos seus ativos. Tendo como aspecto mais importante, no campo da manutenção predial e das instalações, quando se busca uma maior eficiência nos serviços, a coleta de dados, bem como, a construção de séries históricas, de forma que se construa uma base de conhecimento madura o suficiente para entender comportamentos e transformá-los em informação, que por sua vez estabeleçam a tomada de decisões no campo da manutenção, tendo como base a necessidade de individualizada de cada ambiente, equipamento ou usuário.

Em geral, as manutenções acontecem predominantemente de modo reativo, muitas vezes como resultados de panes e paradas não programadas, dificultando o planejamento e a gestão, bem como, aumentando o desperdício de recursos materiais e humanos na sua correção, solicitando uma maior disponibilidade de capital humano para o atendimento de atividades que poderiam ser otimizadas a partir de um sistema de monitoramento com alertas e alarmes.

Como contribuição o trabalho traz o desenvolvimento de um modelo para a manutenção preditiva utilizando a integração BIM e IoT beneficiando a tomada de decisão por parte da gestão da manutenção, possibilitando a otimização de recursos, e como efeito colateral, a médio e longo prazo, se traduz na confecção de séries históricas e na consolidação de conhecimento e legado para melhor gestão dos ativos. Relata-se também o constante e crescente contingenciamento dos recursos disponibilizados pelos cofres públicos, sendo necessário a otimização dos projetos e ações mais enxutas (BRASIL, 2022).

Em suma, o presente estudo tem como escopo principal levantar questionamentos sobre como as informações BIM e dados obtidos de sensores podem ser integradas de forma que facilitem a visualização por parte do usuário, bem como, permitam alimentar um sistema para a aplicações de tomada de decisões em manutenção para diagnosticar preventivamente falhas e reduzir paradas em equipamentos e instalações prediais.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Criar um modelo monitoramento virtual, com integração BIM-IoT em ambientes e equipamentos que estejam inseridos em uma edificação pública existente.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

1. Identificar os modelos de monitoramento virtual e manutenção de uma edificação.
2. Caracterizar o modelo de interoperabilidade, baseado na integração de dados de uma rede de sensores e a estrutura BIM.
3. Desenvolver dispositivos para a coleta e monitoramento de dados em campo, com sensores e microcontroladores para receber dados do ambiente, temperatura, vibração etc, para transmissão em rede em plataformas específicas.
4. Avaliar o modelo em ambiente operacional, através de ensaios, para a manutenção de uma edificação.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, incluindo este primeiro. No Capítulo Dois é feita uma revisão bibliográfica sobre a estrutura e sistemática da Modelagem de Informação da Construção (BIM), bem como, a utilização de sensores associados ao conceito de Internet das Coisas - IoT e a interoperabilidade desses sistemas no campo da manutenção predial. No Capítulo Três são apresentados trabalhos relacionados ao assunto e suas aplicações. No Capítulo Quatro, encontra-se a estratégia metodológica relacionada com o desenvolvimento a estrutura *BIM-IoT*, com os materiais empregados e a proposta para um modelo monitoramento e controle ligada à Web (*Web-based*). No Capítulo Cinco são apresentados os experimentos e os resultados alcançados, sua correlação com outros estudos e as limitações encontradas. Na última parte, o Capítulo Seis apresenta as conclusões da pesquisa, descrevendo as atividades desenvolvidas e as decorrências do referido trabalho.

## 2 Revisão Bibliográfica

Equipamentos e edificações ao longo da sua vida útil necessitam de manutenção para a garantia da sua funcionalidade, sendo necessário o desembolso de custos com a sua manutenção, a fim de evitar paradas e panes em momentos indesejados, como também a garantia de segurança e conforto ao usuário. Para isso se busca a análise *in loco* a fim de encontrar diversas pistas que relacionem sinais de sensores e medidas ao desgaste aceitável, em patamar antes da quebra ou para prematura. No sentido de facilitar essa atividade, a fim de melhor rastrear e alertar quando e onde ocorrem essas alterações é que se dispõem ferramentas e tecnologias, que, quando empregadas e em cooperação, permitem resultados diretos e indiretos favoráveis à segurança e a economicidade na manutenção, de forma mais simples, justificável e precisa.

### 2.1 *Building Information Modeling - BIM*

Comparado com as tecnologias e ferramentas comumente usadas em projetos 2D e 3D, que utilizam o conceito de Desenho Assistido por Computador, *Computer Aided Design* (CAD), a Modelagem de Informações de Construção, *Building Information Modeling* (BIM) tem ganhado espaço e propõe a integração da representação gráfica com as informações associadas às entidades que constroem o modelo, permitindo a realização de projetos maiores, mais complexos e confiáveis (HE; YAN; YE, 2020).

Complementando o conceito tridimensional, passando a considerar variáveis como tempo, preço e performance, que na engenharia representam respectivamente o cronograma, o custo na obra e a sustentabilidade, são adicionadas mais dimensões ao projeto, permitindo que o BIM traga consigo esse novo conjunto de expressões multidimensionais, acompanhando todo o ciclo de vida da edificação (DANIOTTI et al., 2020).

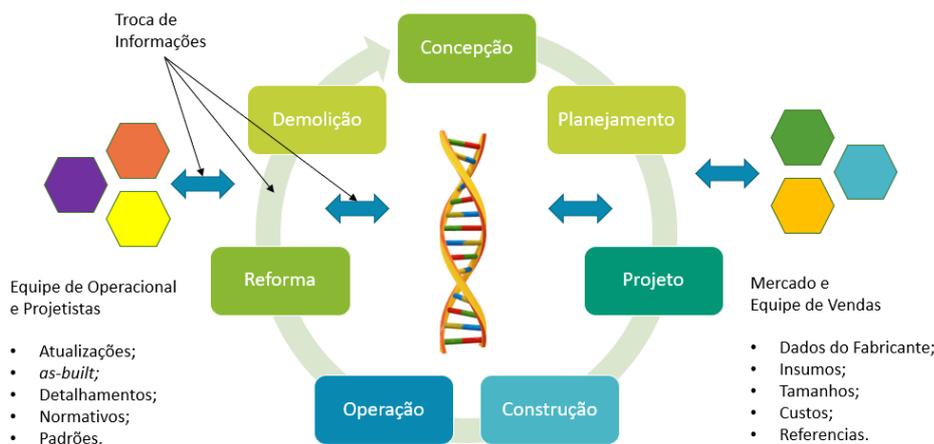
Em vista disso, o BIM passou a representar virtualmente edificações, inclusive suas instalações físicas e ativos, contendo informações que facilitavam o entendimento das particularidades do projeto. Desse modo, a precisão dos modelos virtuais foi se aproximando cada vez mais dos modelos reais, e ainda, da situação observada em campo. As especificações técnicas de uma peça, seja geometria da edificação ou os demais dados obtidos, passaram a ser atribuídos a entidades, inseridas no modelo de representação no BIM, o que permitiu resolver problemas no ambiente virtual que só seriam solucionados no ambiente físico ou durante a fase de execução, o que antes poderia gerar em maiores riscos e em custos não previstos de recursos (SEPASGOZAR et al., 2021).

Além disso, as representações contidas em projetos BIM possibilitaram que o mesmo

projeto compartilhasse as mesmas informações, mesmo quando fossem separadas para as diversas partes envolvidas na sua elaboração, facilitando a colaboração das informações ainda durante a fase de projeto e até a sua conclusão (DANIOTTI et al., 2020).

Fazendo alusão a um modelo que está em constante evolução, uma vez que permite o a edição e o compartilhamento de informações entre as diversas áreas e disciplinas da arquitetura, engenharia e construção (AEC) durante as diversas fases do projeto, a Figura 1 apresenta o repositório das informações BIM ao longo do ciclo de vida de uma instalação, representando as informações do BIM em forma de hélice, passando pela fase de construção até a manutenção, acompanhando a vida útil da instalação ou edificação, além constante compartilhamento de informações, tanto durante a vida da construção, quanto entre a equipe de projeto, a equipe de vendas e o mercado, que podem ainda trazer mais informações para a estrutura de dados fazendo do BIM a espinha dorsal de informações da construção (NIBS, 2007).

Figura 1 – Repositório das informações BIM no ciclo de vida da edificação.



Fonte: Adaptado de NIBS (2007).

Nesse modelo todas as partes envolvidas no processo tem acesso à estrutura de dados, ou o projeto, que é único, sendo armazenado preferencialmente em um repositório que centraliza as informações, permitindo total interação entre as disciplinas e os envolvidos em diversas etapas, possibilitando o gerenciamento das informações e a minimização de conflitos.

### 2.1.1 Maturidade BIM

No Brasil foi instituído o Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020, que estabeleceu a utilização do *Building Information Modelling* na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública

federal no Âmbito da Estratégia Nacional de Disseminação do *Building Information Modelling* - Estratégia BIM BR, instituída anteriormente pelo Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019. Contudo, é válida a proposta do referido decreto para acelerar a implantação do BIM na esfera pública federal, entretanto, o fato de existir o peso de lei não é suficiente para que se garanta sua eficácia e efetividade.

Por outro lado, para que se consiga desenvolver o BIM se faz necessário a cultura de constante capacitação do pessoal técnico para implementá-lo, bem como adaptá-lo à gestão pública. Segundo o Huang, Ninić e Zhang (2021) e BIM Industry Working Group (2011), o BIM, para ser implementado, necessita principalmente de treinamentos e domínio de ferramentas e da construção de metodologias e normas para a sua utilização, independentemente do tamanho do projeto ou desafio. Assim, apesar das facilidade que o BIM propõe, ele não deve ser visto como uma aplicação ou solução por meio de software, mas, como um processo, no qual os dados e as informações trafegam pela cadeia de suprimentos ao longo da vida da edificação ou empreendimento, cabendo seu constante aprimoramento e desenvolvimento (BORHANI; DOSSICK, 2020).

No caso de prédios, instalações ou de empreendimentos já existentes, a utilização de modelos BIM mostra-se mais complexa, uma vez que necessita de metodologias e processos adequados para a geração quando comparados a uma edificação que foi originada dentro do conceito BIM. Sendo necessário considerar a transformação da informação, muitas vezes coletada em campo, a partir da elaboração do "as-built", uma vez que alguns prédios existentes já não possuem documentação existente ou precisa o suficiente para a modelagem em BIM (DESOGUS et al., 2021).

Assim, é importante entender o atual estado de maturidade da edificação ou da instalação que adotará a Modelagem de Informação da Construção (BIM), que por sua vez definirá o rumo e o nível de desenvolvimento de tecnologias mais sofisticadas neste campo (EDIRISINGHE et al., 2017). Nesse sentido, muitos órgãos governamentais tem tomado medidas pró-ativas para implantar o BIM em suas organizações e nas novas contratações de obras e serviços de engenharia, incentivando a evolução do nível de maturidade em suas frentes técnicas (BRASIL, 2020).

#### 2.1.1.1 Níveis de Maturidade BIM

O uso do BIM traz consigo a utilização de um conjunto de componentes e ferramentas, contendo condições e informações que contribuem para a evolução do nível de complexidade do projeto e dos detalhes em suas etapas, a depender do nível de maturidade BIM da instituição que está a frente dos projetos esse potencia pode ser aproveitado em sua melhor performance.

A análise do nível de maturidade BIM de uma organização se inicial no Desenho e Projeto Assistido por Computador, *Computer Aided Draft and Design* (CADD) até

o seu ultimo estágio, o qual permite o uso integrado a outras tecnologias e o trabalho colaborativo.

Inicialmente, no nível zero de maturidade está localizada a atividade em CAD (*Computer Aided Draft*), onde o principal documento da edificação ainda é físico. Já o primeiro nível é representado pelos arquivos de computador ou digitais, porém os modelos ainda não trazem consigo quaisquer informações, bem como, ainda não podem operar com outros sistemas, contendo somente representações geométricas. Assim, os programas no primeiro nível são uma mistura de modelagem tridimensional e bidimensional, que podem ser utilizados para criação de conceitos e preparação de documentos de forma limitada (NGUYEN, 2016).

O segundo nível de maturidade BIM, por sua vez, passa a desenvolver uma interação entre as partes e disciplinas envolvidas no projeto, onde elas passam a dividir o mesmo formato de arquivo para trocar informações. Assim, o ocorre nessa fase é a interconexão entre os desenhos e partes do projeto, havendo um controle do ambiente tridimensional, sendo que este ainda não é centralizado.

Por conseguinte, o terceiro nível no modelo de maturidade representa a integração e do ambiente tridimensional ao virtual, onde acontece a compatibilização de todas as áreas técnicas ou disciplinas interessadas, com as informações desenvolvidas, assim o modelo desenvolvido converge para um único e comum modelo para o trabalho colaborativo. Assim, a coordenação das atividades passa a ser baseada em padrões e normas, com regras desenvolvidas especificamente para o ambiente e tecnologia BIM (KUMAR, 2015) possibilitando uma maior consistência de informações e colaboração em todas as fases do projeto.

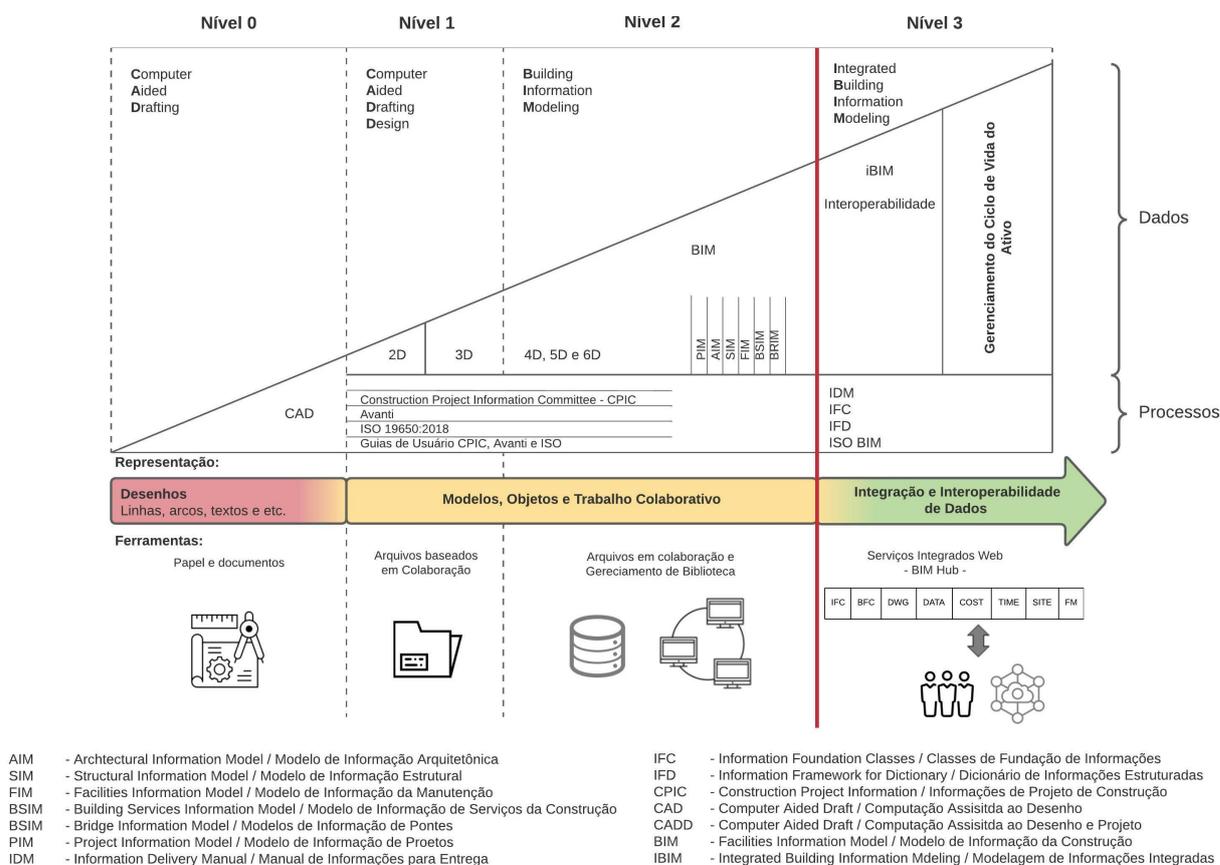
### 2.1.2 BIM na Manutenção Predial

A princípio, para entender a real importância da Gestão da Manutenção, em inglês, *Facility Management* (FM), é preciso também entender os custos associados da atividade, bem como as decisões e seus efeitos ao longo da vida útil da edificação ou empreendimento.

Para maximizar o retorno do investimento de capital nas instalações, edificações e empreendimentos, o investidor ou dono deve atuar no sentido de prolongar a sua vida útil (WEEKS; LEITE, 2021). Contudo deve-se compreender a atividade de manutenção e o monitoramento e controle dos dados obtidos, com vista à aprimorar suas decisões no presente, bem como seu impacto orçamentário e em futuras decisões.

Em seu estudo Wong, Ge e He (2018, p. 7) aponta que os Sistemas de Gestão da Manutenção, em inglês *Facilities Management Services* (FMS), podem ser integrados com a modelagem BIM, por meio de plataformas específicas, possibilitando a gestão da manutenção maior conhecimento sobre os sistemas e da edificação, por meio de coletas de

Figura 2 – Modelo de Maturidade Bew-Richards.



Fonte: Adaptado de [BIM Industry Working Group \(2011\)](#).

dados da manutenção. Porém, ainda se necessitam de sistemas e dados mais simples e que melhor conversem entre si, a fim de garantir a informação entre as partes e a validação dessas informações ([HILAL; MAQSOOD; ABDEKHODAE, 2019](#)).

Assim, o BIM, no campo da manutenção passa a representar um sistema que centraliza os dados e informações, aumentando a performance administrativa, cortando caminho entre as diversas áreas de interesse, permitindo uma operação mais eficiente na manutenção, e conseqüentemente um trabalho mais colaborativo, onde através da análise de dados obtidos em campo e ao longo do tempo, as mais diversas formas manutenções preditivas podem ser iniciadas, reduzindo o tempo de parada e conseqüentemente a diminuição dos custos de reparo na atividade de manutenção ([TATIYA, 2020, p. 2](#)).

No entanto, se por um lado, a implementação do BIM em edificações e instalações existentes já é uma tarefa difícil e complicada do ponto de vista operacional, quando comparado com um projeto que adota o BIM desde seu início. Por outro, se observa, que apesar das vantagens a difusão do BIM na manutenção predial ainda possui muitas barreiras, principalmente, no campo da interoperabilidade ([OZTURK, 2020](#)).

Porém, já existem tecnologias que permitem a aquisição de dados, gerando um *as-built* tridimensional do que está em campo, ou no meio físico. Tais tecnologias expressão em dados a geometria de objetos, bem como a captura de imagem e utilização de lasers para coleta de nuvens de pontos (ALTOHAMI et al., 2021, p. 17).

Além disso, diversos estudos tem demonstrado plataformas digitais para armazenamento de dados, como forma troca de informações e interoperabilidade de dados, utilizando até mesmo dados de sensores, coletados em campo, associados a modelos BIM, armazenados em plataformas de rede descentralizadas (LU et al., 2020)

## 2.2 Interoperabilidade de dados utilizando entre as plataformas BIM e IoT

Compreender a fundo o conceito da metodologia BIM é entender que ele não se trata apenas de uma tecnologia ou ferramenta que auxilia o projetista, mas sim das informações resultantes da integração entre indivíduos, processos e sistemas que envolvem ferramentas e tecnologias.

Uma característica em comum nas inovações tecnológicas atuais, é a integração e a capacidade de disseminação da digitalização e da tecnologia da informação (SCHWAB, 2016). Nesse sentido, dada a enorme quantidade de informações produzidas pelos diversos sistemas, nota-se que muitos desses estão inter-relacionados quanto a sua natureza, o que indiretamente, tem potencial para novos avanços e novas descobertas.

Por sua vez, para possibilitar a integração do BIM com outros sistemas, faz-se necessário a priorização de padrões de código aberto, como o COBiE (*Construction Operation Building information Exchange*) e IFC (*Industry Foundation Classes*), que por sua vez atuam na troca de informações com outras plataformas, possibilitando a operação integrada e colaborativa da produção de projetos (CHEN et al., 2018, p. 16).

Não muito distante, Shen, Hao e Xue (2012) já vinham propondo a utilização de modelos e serviços hospedados na internet, também chamados, em inglês, como *Web based-services*, que a primeira vista contrariaram a ideia de interoperabilidade, porém com as diversas inovações tecnológicas, e de protocolos com modelos de comportamento mais dinâmicos é que foi possível a sua aplicação, permitindo a geração e a integração de dados nos diversos níveis de complexidade em um sistema hospedado na rede.

Assim, seguindo o mesmo conceito, (ALTOHAMI et al., 2021) verificou modelos e metodologias existentes que possibilitassem as integrações BIM-IoT, observando em seu estudo, que, para a implementação dessa integração, o fator mais importante é dado pela Arquitetura Orientada a Serviços, em inglês, *Service Oriented Architecture*, que se caracteriza dentre várias funções, na combinação de softwares e outros serviços, que quando

associados possibilitam outras diferentes funcionalidades.

Com efeito disso, a utilização de informações COBiE e IFC, ficou mais fácil para a integração com outros sistemas, em particular com sistemas de gestão da manutenção (FM), contribuindo com a troca de informações e com a visualização no cenário BIM (GAO; PISHDAD-BOZORGI, 2019). Nesse sentido, a proposta da utilização de códigos abertos foi a interoperabilidade entre os sistemas e a troca de informações de maneira mais confiável, uma vez que permitem a troca de dados, tanto gráficos como não gráficos, no ambiente BIM. Além disso, ao manter a mesma linguagem é ainda possível manter a rastreabilidade de dados, aspecto muito importante na gestão de ativos e em Sistemas Computadorizados de Gestão da Manutenção, em inglês *Computerized Maintenance Management System (CMMS)* e Sistemas de Gestão da Manutenção, em inglês *Facilities Management Services (FMS)* (MOTAMEDI; HAMMAD; ASEN, 2014).

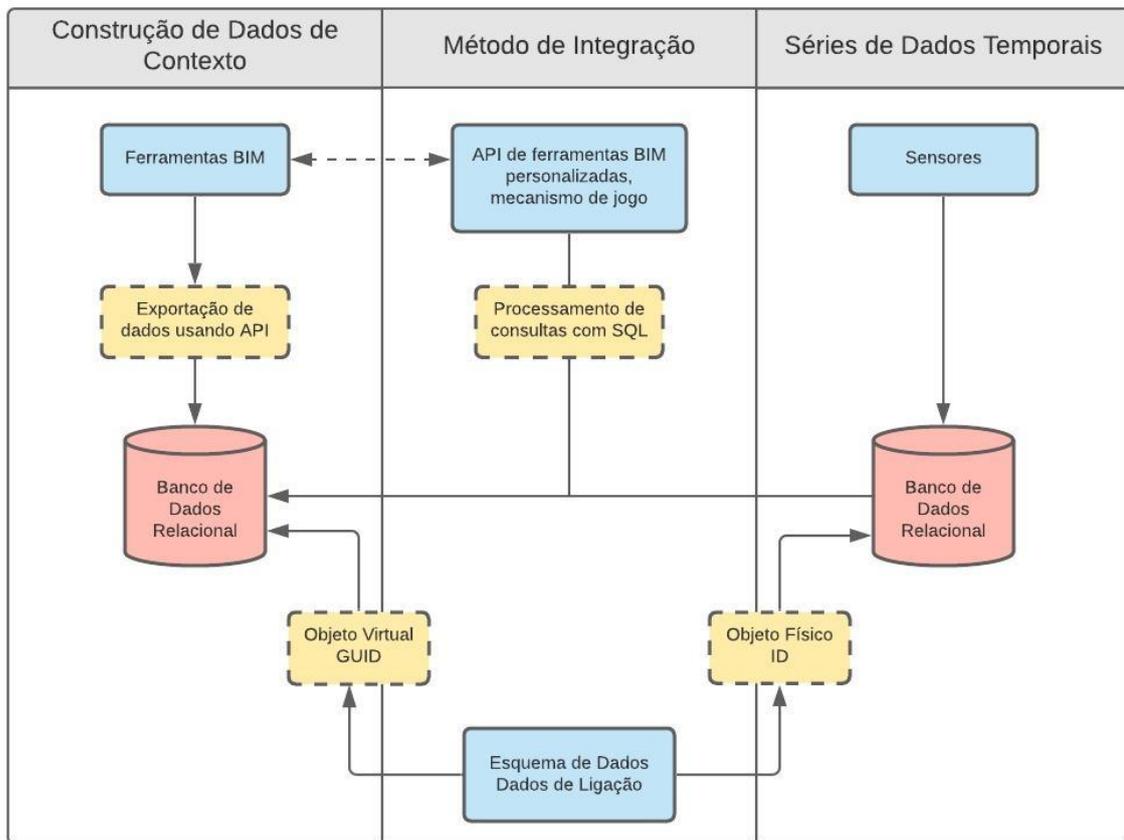
Desse modo, considerando a utilização da plataforma BIM como ferramenta para a representação virtual do meio físico, juntamente com a utilização de outras tecnologias, é possível a mineração dos dados a partir de uma plataforma virtual existente. E integrando ferramentas e tecnologias capazes de coletar e analisar esses dados, sejam eles de dentro do sistema, ambiente virtual, ou de fora, como sensores e atuadores, é possível também convergir para um novo sistema, integrando dados, informações e outros recursos, que através de inteligência artificial, permite uma melhor gestão de recursos e a tomada de decisões mais assertivas *Data-driven* (MENG et al., 2020).

Contudo, quando se refere à manutenção predial é essencial a obtenção de dados e séries históricas para registro. Nesse sentido, as tecnologias de IoT e o BIM passam a adquirir papel principal, onde o desafio passa a ser a integração das informações dentro da mesma estrutura (ALTOHAMI et al., 2021, p. 16). Assim, para que ocorra essa integração é necessário a utilização de uma estrutura unificada para que se construa a efetividade dentro de um sistema. Objetivando estudar essa integração Tang et al. (2019a, p. 133) aponta uma estrutura na Figura 3 em que ocorre a transformação dos dados BIM para dados consultáveis.

Observa-se que a vantagem da estrutura apresentada na Figura 3 está na extração de dados por diferentes tipos meios. Tais dados seriam obtidos por sensores e dados da edificação ou instalação, facilitando a visualização dos sensores em um modelo virtual para a interpretação dos dados. Porém, a estrutura se provou limitada para utilização de aplicações em tempo real, tendo em vista a necessidade de tempo para a transformação e armazenamento dos dados de IFC para BIM.

Em seguida Tang et al. (2019a) propõe uma aproximação híbrida, na qual há a utilização da semântica *web* associada à um banco de dados relacional (Figura 4). A abordagem, segundo o autor, responde de forma muito promissora, uma vez que se ajusta a diversas plataformas, sem conversões de grandes quantidades de dados, interligando-as,

Figura 3 – Transformação de dados BIM em banco de dados relacional usando novo esquema de dados.



Fonte: Tang et al. (2019a).

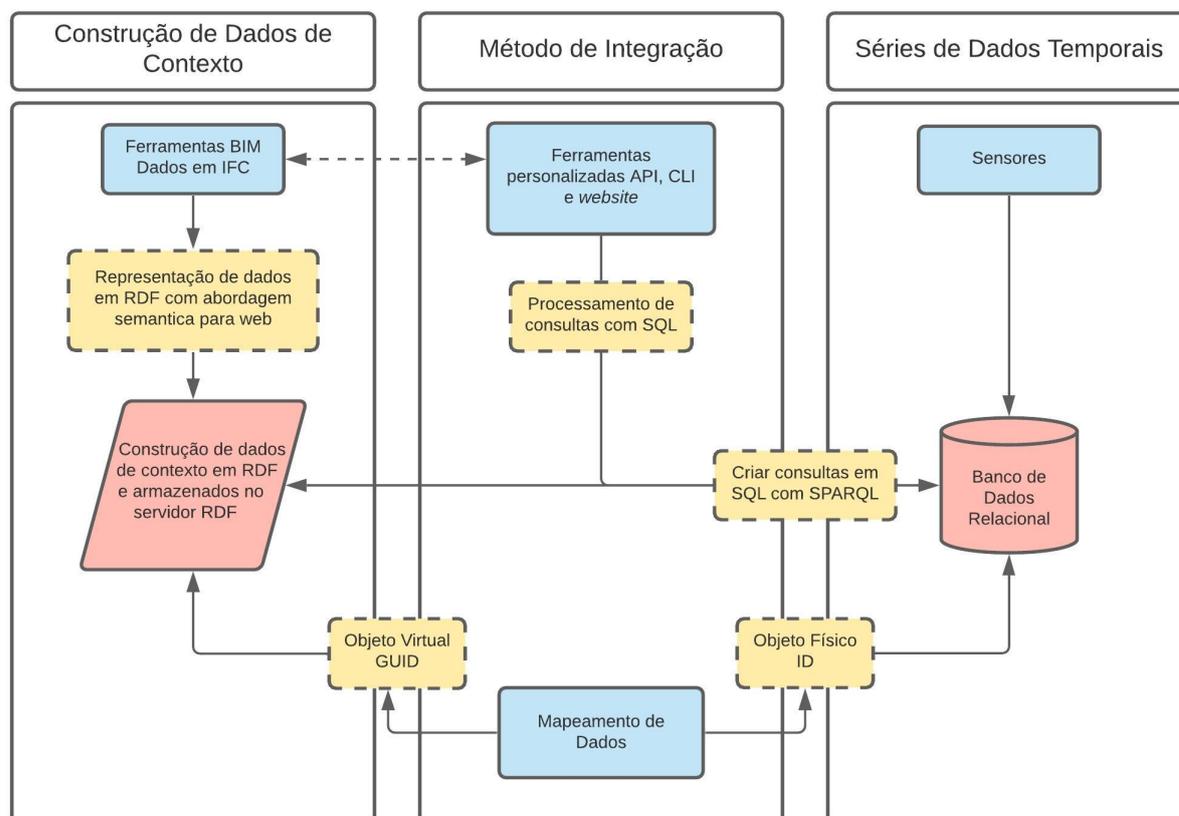
atingindo o conceito de interoperabilidade, no qual a estrutura conectada com a internet agrega os dados para uma possível visualização dos dados e das informações, reduzindo em muito a complexidade das transações e armazenamento das informações.

## 2.3 Monitoramento de sistemas por meio de sensores

Os sensores são meios de interpretar fenômenos por meio de dispositivos, sejam eles elétricos ou físicos (DIBLEY et al., 2012, p. 2). Eles funcionam como meios de integrar o mundo físico ao mundo digital, e são utilizados amplamente para a coletar informações de diversos tipos, como temperatura, umidade relativa do ar, luminosidade, presença, abertura de portas e janelas e etc.

Contudo as informações coletadas por vários sensores pode ser complexa e cruzada, sendo necessário meios para acessá-las e entendê-las. As formas para tornar esses dados mais compreensivos estão em softwares, que de maneira apropriada, convertem as informações

Figura 4 – Estrutura híbrida utilizando semântica web e banco de dados relacional.



Fonte: Tang et al. (2019b).

obtidas do meio físico em dados, que pode atender as mais diversas necessidades.

Entretanto um fato que afetar negativamente a utilização dos sensores é a dificuldade de integração entre os padrões de dados e os protocolos de comunicação (GAO et al., 2021), prejudicando integração com outras aplicações, principalmente no campo da manutenção predial, que em muitos casos utiliza o BIM para expressar o seu ambiente virtual e outros protocolos para a comunicação entre os sensores.

Assim, para evitar esse tipo de problema os protocolos de comunicação do tipo Sistemas de Automação da Construção (*Building Automation Systems - BAS*) tem ganhado espaço, facilitando a integração de sistemas de dados e da automação predial, proporcionado a otimização de processos no gerenciamento da manutenção, onde o real valor da integração de sistemas é percebido (BHUSARI; WATTS, 2015).

Tal sistemática, em síntese, busca permitir a visualização dos dados obtidos em campo através de alertas que resultam em registros vindos de um banco de dados, para em seguida serem representados de maneira mais elaborada.

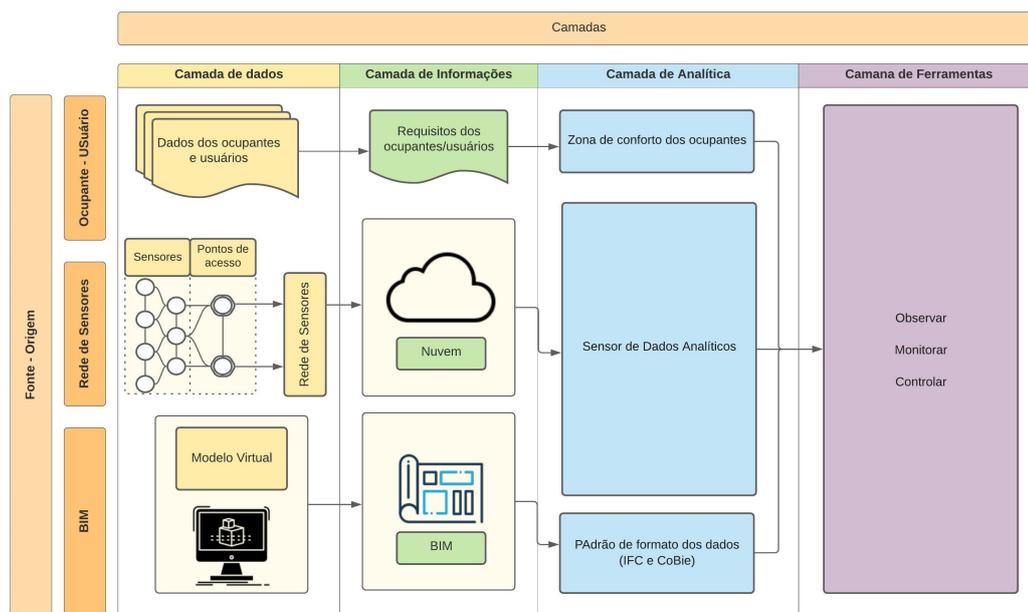
Assim, revela-se que o elo de ligação entre a plataforma BIM e IoT é dada a partir

de uma estrutura, onde os dois sistemas utilizem dados em comuns, para a visualização dos sensores e da edificação, facilitando a leitura das informações, como também a análise em tempo real das condições dos ambientes e equipamentos (LU et al., 2020).

O processo de monitoramento em tempo real com o BIM, pode ajudar a gestão da manutenção, integrando clientes, colaboradores e engenheiros para monitorar de modo mais eficiente suas instalações, podendo observar os dados de forma mais precisa através de sensores que capturam os dados (VALINEJADSHOUBI et al., 2021).

Em outra abordagem (Figura 5) Nguyen (2016, p. 70) propôs uma análise, com uma estrutura baseada em promover a performance da perspectiva do ocupante, onde existiriam quatro camadas. A camada de dados seria a fonte das informações, o ponto de partida, com dados obtidos de sensores, o modelo BIM ou a planta edificada, e os dados dos ocupantes.

Figura 5 – Estrutura da integração de BIM e rede de sensores para o desempenho de um edifício.



Fonte: Nguyen (2016, p. 70).

Por conseguinte, a camada de informações corresponderia em requisições e necessidades dos ocupantes, armazenamento em nuvem dos dados dos sensores, e do modelo digital BIM de uma edificação.

A camada analítica trata por ajustar os dados dos ocupantes de acordo com seu critério, além de fazer o tratamento de dados dos sensores, bem como, gerar os dados padrão IFC e COBie do modelo BIM, por conseguinte, a camada de ferramentas trata de unificar essas informações para visualização dos dados e demais informações para o controle e o monitoramento digital.

Dessa forma, os dados coletados por meio dos sensores, que corresponderiam a uma determinada camada na estrutura, bem como a modelagem virtual de uma instalação ou edificação, se traduziriam em dados que seriam apresentados de modo a auxiliar a análise técnica, tornando mais simples a gestão da manutenção e aumentando a satisfação do usuário, que é ator principal e o ocupante do ambiente, tendo como benefícios indiretos o maior controle e gestão dos ativos e a redução de custos.

Observando essa estrutura, Figura 5, nota-se que o conceito permite a coleta de uma vasta quantidade de dados, que se traduzem nas condições e no estado de um determinado ambiente, máquina ou equipamento. Bem como, permitem localizar os locais que necessitam de mais atenção e modelar os dados para visualiza-los e interpretá-los para a tomada de decisão. Além disso, atualmente tais tecnologias já possibilitam o gerenciamento em tempo real da informação, resultando em ações e análises mais rápidas.

Contudo, é importante notar que apesar das soluções, são gerados muitos dados, o que conseqüentemente resulta num maior volume de processamento, segundo (ALTOHAMI et al., 2021, p. 22) a parte mais importante na hibridização do sistema está na eliminação de dados duplicados que tenham origem na série de dados, cuja ponto inicial se dá nos sensores, bem como, na superação de diferenças de bases de dados e de plataforma. Considerando mais importante ainda, a conexão entre bancos de dados relacionais, que permitem a aproximação web com a origem dos dados.

### 2.3.1 *Serverless Computing*

Em sua obra, "A Quarta Revolução Industrial", Schwab (2016) já apontava crescente capacidade de armazenamento proporcionada por grandes servidores como *Amazon Web Services* (AWS), em muito, impulsionada pela demanda crescente dos usuários, cada vez mais ávidos por armazenamento. Contribuindo para esse cenário há também o desenvolvimento das novas tecnologias, e do aumento quantidade de dispositivos, que por sua vez vem produzindo uma enorme quantidade de dados, resultando em uma necessidade cada vez mais uma maior de armazenamento e processamento. E é por essa razão que esse tipo de serviço, em particular o de armazenamento encontra uma tendência para se tornar uma *commoditie* nos próximos anos (KAVIANI; KALININ; MAXIMILIEN, 2019).

Nesse sentido, a plataforma *Serverless Computing*, ou computação sem servidor, tem ganhado espaço, possibilitado a integração e a comunicação de vários componentes e dispositivos, servindo como armazenamento em nuvem de dados obtidos, como os sensores IoT, e também, disponibilizando soluções automáticas através de alertas inteligentes e gatilhos para execuções pré-programadas. Além disso, com os dados obtidos há ainda a possibilidade de construir conhecimento e informações que possibilitem o desenvolvimento de outras soluções mais complexas e dinâmicas, possibilitando o uso de ferramentas como o *Machine Learning* para análises preditivas a partir dos dados coletados (HAYAT et

al., 2019). Dentre as diversas vantagens dessa aplicação, as que mais se destacam na computação sem servidor, são:

- Eliminação do gerenciamento de uma infraestrutura física pelo cliente;
- Rapidez no desenvolvimento de soluções;
- Provedores de serviços hospedados em nuvem, que de modo automático, dimensionam a infraestrutura necessária para gerenciamento de códigos;
- Capacidade de processamento elevada, uma vez que possibilita ao servidor executar códigos em sua própria plataforma.

A denominação *serverless*, traduzido para o português, como *sem servidor*, se deve ao fato tarefas associadas ao provisionamento e ao gerenciamento de toda uma infraestrutura para processamento, que são invisíveis para o desenvolvedor. Assim, esse serviço possibilita aos desenvolvedores a integração de diferentes arranjos, utilizando serviços hospedados em nuvem e na rede local, sem precisar codificar essas interações ao longo do desenvolvimento, garantindo maior agilidade e confiabilidade para a criação de novos APIs e outras especificações (CASTRO et al., 2019).

## 2.3.2 Controle e Análise Preditiva baseada em IoT

### 2.3.2.1 Análise Preditiva

A presente subseção apresenta aplicações técnicas de análise e controle prático, com o objetivo de apresentar ações, com a utilização de sensores associados a conectividade e o envio de dados, sendo importantes para aplicações de manutenção corretiva, preventiva e preditiva, bem como, a tomada de decisões em diversos sistemas prediais e industriais.

Dependendo do ambiente e da área de aplicação, a análise preditiva tem encontrado diversas aplicações, dentre as que mais se destacam no campo da manutenção predial e de equipamentos e instalações, são as de análise e prevenção de falhas na manutenção. Funcionando como uma consequência da coleta de dados e informações em campo, que após processadas e estruturadas auxiliam na tomada de decisão, promovendo uma otimização no sistema, paradas inesperadas dos equipamentos e consequente redução de custos (MANNINO; DEJACO; RECECCONI, 2021).

Assim, a partir do desenvolvimento e utilização de dispositivos IoT, do uso de sensores, do monitoramento dos dados e de sistemas mais complexos que possibilitem a coleta e análise de informações da manutenção, tendo como foco os equipamentos e dos ambientes, a operação de manutenção passa a ter uma característica descentralizada, onde informações, dados e elementos técnicos passam a ser construídos no meio digital e em

tempo real, beneficiando diversas atividades, promovendo a interoperabilidade e utilização de sistemas mais otimizados (MACHADO; RUSCHEL, 2018a)

### 2.3.2.2 Controle Vibracional

No campo da análise das vibrações, fruto de processos industriais e prediais, utilizando as técnicas de controle adequadas, é possível monitorar em vibrações indesejadas nos equipamentos, durante seu funcionamento, fazendo toda a estrutura também vibrar ou ressoar, o que por sua vez tende a causar maiores desgastes prematuros, mais quebras e entre outras panes indesejadas, fazendo da atuação de monitoramento a possibilidade do desenvolvimento de soluções para reduções significativas dos níveis de vibração observados (SCHMITZ; SMITH, 2012).

Como proposta, Varanis, Silva e Mereles (2018) apresentam uma metodologia combinando vibrações mecânicas, o processamento de sinais com a utilização de sensores de baixo custo. Tendo como proposta inicial uma aplicação acadêmica, encontrando resultados satisfatórios para aplicações industriais.

A análise vibracional possibilita o monitoramento dos equipamentos, que através de mensurações, permite a conferência características que podem resultar em problemas mais complexos e impactantes na vida útil de um equipamento ou no seu conjunto (SUSANTO et al., 2020).

### 2.3.2.3 Monitoramento da Corrente Elétrica

Matsuo et al. (2021) propôs um sistema de monitoramento de consumo de energia elétrica. Para o experimento, o estudo aplicou sensores e placas microcontroladoras para estimar o consumo mensal de uma residência. Nesse contexto os dados seriam transmitidos para uma plataforma em nuvem para a apresentação dos dados.

Em outro aspecto, a análise também se mostra eficiente para o campo da manutenção de máquinas, onde o aumento detectado por sensores pode indicar uma série de falhas e desgastes associados. Podendo, com o uso de sensores a medição indireta, sendo traduzida como ações para prevenir em muitos casos a parada abrupta e a consequente falha de equipamentos (VILLA et al., 2022).

## 2.4 Dispositivos e Componentes

### 2.4.1 Módulo ESP32

A unidade microcontroladora (*Microcontroller Unit* - MCU) é a parte do sistema capaz de processar dados, tendo em seu interior os componentes necessários para o seu funcionamento. Possuindo diversos periféricos para transmissão, monitoramento e controle

das coisas. Além disso, possui como as principais características o pequeno tamanho e o baixo consumo energético, além de um custo reduzido quando comparado com unidades mais potentes em processamento, tornando a operação mais simples e a utilização mais fácil. A Tabela 1 apresenta, em aspecto comparativo, as características do MCU ESP32 aos outros módulos IoT comuns do mercado e placas de desenvolvimento similares:

Tabela 1 – Tabela comparativa dos microcontroladores disponíveis para operação e desenvolvimento IoT

Especificações	ESP32	Arduino UNO	Arduino MEGA 2560	Raspberry Pi Pico W
MCU	Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 600 DMIPS	AVR® 8-bit RISC	ATmega2560 RISC com até 16 MIPS	RP2040 ARM Cortex-M0 Dual Core
Alimentação Entrada Regulada (VIN)	2,2V ~3,3V DC 5 ~9V DC	5V DC 7 ~12V DC	5V DC 7 ~12V DC	1,8V ~5,5V DC 1,8 ~3,3V DC
Wi-Fi	Possui	Não possui	Não possui	Possui
Bluetooth	Possui	Não possui	Não possui	Possui
Frequência de Operação	160 MHz	16 MHz	16 MHz	133 MHz
SRAM	512 kB	2 kB	4 kB	264 kB
Flash	acima 16 MB	32 kB	256 kB	2 MB
GPIO	36	23	54	30
Hardware/ Software PWM	1/16 Canais	1/6 Canais	1/14 Canais	1/16 Canais
SPI/I2C/I2S/ UART	4/2/2/2	1/1/0/1	1/1/0/4	2/2/2/2
ADC	12 bit	10 bit	12 bit	3x12 bit
CAN	1	Nenhum	Nenhum	1
Ethernet MAC	1	1	1	1
Sensor ao toque capacitivo	Possui	Possui	Possui	Não possui
Sensor de temperatura	Possui	Possui	Possui	Possui
Temperatura de Trabalho	-40°C a 85°C	-40°C a 85°C	-40°C a 85°C	-40°C a 85°C
Preço 1 Loja Smart Projects	R\$ 71,70	R\$ 87,50	R\$ 105,18	-
Preço 2 Loja Curto Circuito	R\$ 53,00	R\$ 87,30	R\$ 198,60	R\$ 199,90
Preço 3 Loja SARAVATI	R\$ 64,90	R\$ 81,90	R\$ 174,90	R\$ 199,90
Preço 4 Loja Aprender para Vencer	R\$ 48,99	R\$ 70,00	R\$ 148,98	R\$ 101,90
Custo médio	R\$ 59,65	R\$ 81,68	R\$ 156,92	R\$ 125,43

Fonte: Autoria própria.

Em situações de uso de sistemas embarcados que utilizam sensores e atuadores, o modelo SoC (Sistema em um chip, em inglês, *System on a Chip*) oferecido pela *Espressif* tem se mostrado bastante versátil. E muito se deve por oferecer na mesma solução, além dos dispositivos de processamento, os periféricos de comunicação, bem como, diversas entradas de alimentação e interface simples (TOSCHKE et al., 2022). Nesse sentido se observa que o MCU ESP32 traz consigo diversos dispositivos que possibilitam sua fácil operação e emprego.

Nessa temática, o chip ESP32 se mostra como a opção mais completa e com

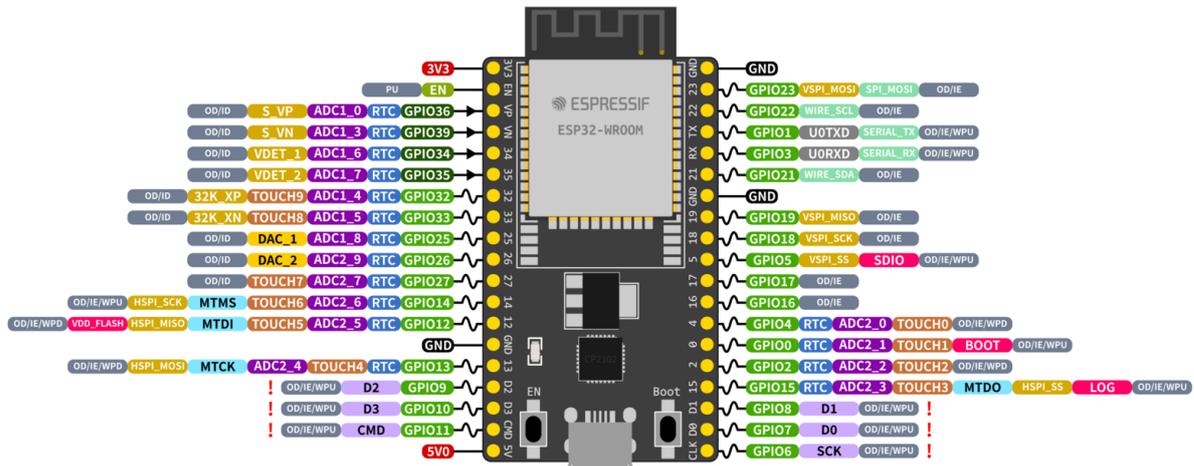
melhor custo benefício quando se trata de conectividade e processamento. O MCU ESP32 hoje é produzido pela empresa *Espressif Systems*, e que de acordo com ela, é uma multinacional pública, com a produção de semicondutores sem fábrica, fundada em 2008, com escritórios na China, República Tcheca, Índia, Cingapura e Brasil, sendo responsável pelo desenvolvimento de chips, módulos e placas ([ESPRESSIF, 2022](#)).

Figura 6 – Referência da placa microcontrolador ESP32-WROOM-32.



Fonte: [Espressif \(2022\)](#).

Figura 7 – Referência de pinos I/O da placa ESP32-WROOM-32.



Fonte: [Espressif \(2022\)](#).

Para implementação de programas (*upload do firmware*) se faz necessário a aplicação de plataforma específica, fazendo o uso de Ambientes de Desenvolvimento Integrado (em inglês, *Integrated Development Environment - IDE*), escrito em linguagem C/C++.

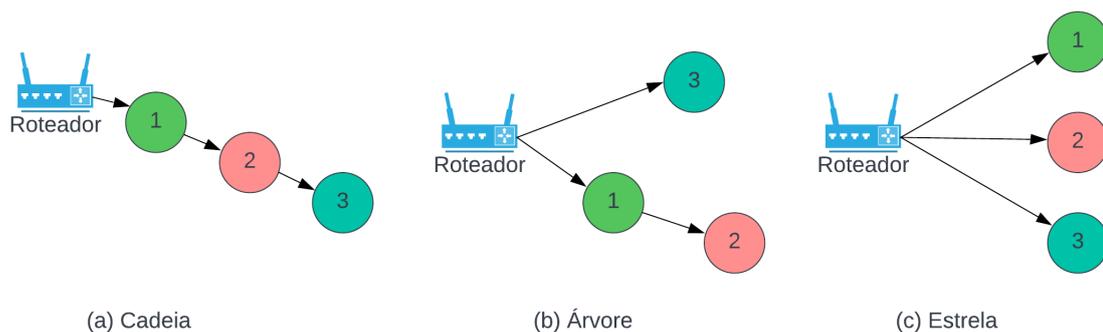
### 2.4.1.1 Estrutura de rede ESP-WIFI-Mesh

Quando se analisa uma estrutura existe sua forma, tamanho e disposição no espaço influenciam diretamente no alcance de transmissão de dados dos sensores até o roteador, é nesse sentido que a escolha da topologia da rede possibilita a otimização dos sensores como solução com menor nível de interferência para o caso. Nesse sentido, a utilização de uma solução que traga consigo algoritmos instalados no chip do microcontrolador para otimização da topologia da rede conta (DAHMANE et al., 2020).

Como é o caso do MCU ESP-32 que possui, de acordo com seu fabricante, protocolos de rede Wi-Fi e *Bluetooth Low Energy*, como também o *Wi-Fi-Mesh*, que se trata de uma arquitetura própria de otimização de rede, cuja topologia permite a conectividade de 25 até 1000 dispositivos conectados na mesma rede. Sendo que topologia em árvore, um híbrido entre a topologia estrela e a do tipo barramento, permite o número máximo de 25 dispositivos. Enquanto que a topologia de corrente permite, ainda, segundo o fabricante, o número máximo de 1000 nós (ESPRESSIF, 2022).

Onde, de modo mais representativo, as topologias mais comuns podem ser caracterizadas de acordo com a sua distribuição e tipo, como a do tipo cadeia, que apresenta uma distribuição linear ao longo das redes para o compartilhamento das informações, o do tipo árvore, que se divide em ramificações para a o seu funcionamento, e por fim a topologia em tipo estrela apresentando nós mais divididos e em diversas direções, conforme Figura 8.

Figura 8 – Tipos de topologia de rede.

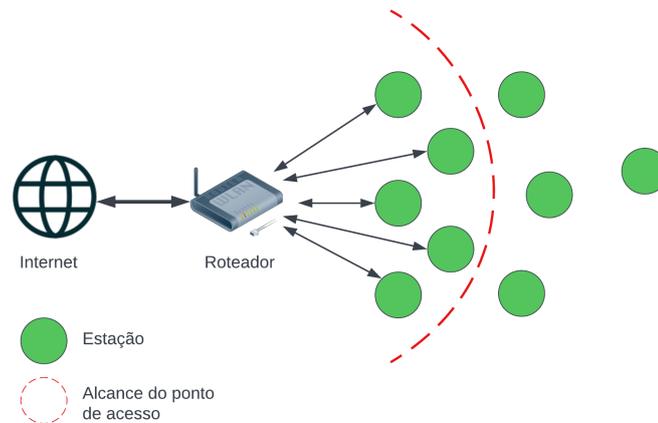


Fonte: Lin e Cheung (2020).

Vale destacar que o tamanho da rede, em número de nós, dependem do número máximo de camadas (*layers*) da rede, bem como do número máximo de conexões *downstream* que cada nó poderá ter, quando em funcionamento pleno.

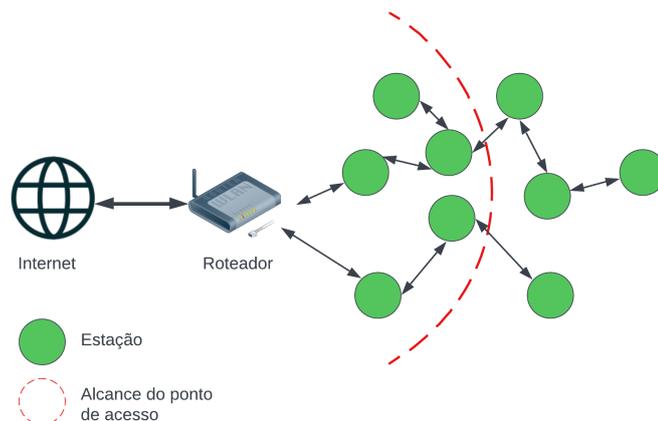
Ressalta-se que a rede *ESP-WIFI-MESH* é um protocolo desenvolvido tendo como base a rede Wi-Fi, e que além de permitir um grande número de dispositivos conectados, permite também a auto-organização dinâmica da rede e ou seu auto-reparo para os casos

Figura 9 – Arquitetura de rede Wi-Fi tradicional.



Fonte: Adaptado de [Espressif \(2022\)](#).

Figura 10 – Arquitetura de rede ESP-Wi-Fi-MESH.



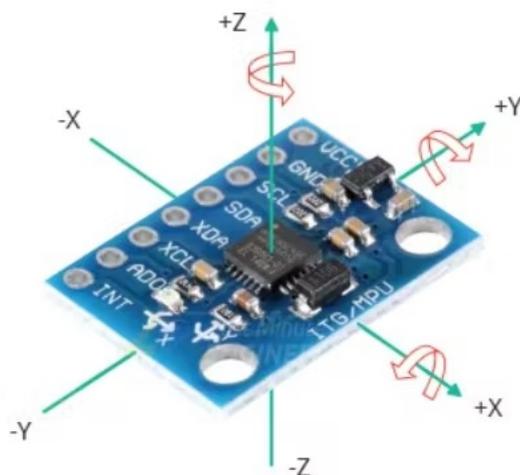
Fonte: Adaptado de [Espressif \(2022\)](#).

em que a rede tenha que se manter autônoma e operando de modo constante ([MARWAN; WIKLOM, 2021](#)).

#### 2.4.2 Módulo Acelerômetro e Giroscópio MPU-6050

O módulo MPU6050, consiste em um elemento MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*, em português se traduz como, Sistema Microeletromecânico), tendo embutido três-eixos para medições de aceleração, e outros três-eixos para medições giroscópicas. Podendo ser graduado em quatro escalas de aceleração (2/4/8/16g) e de giroscópio (250/500/1000/2000 graus) ([InvenSense Inc., 2013](#)).

Figura 11 – Módulo acelerômetro e giroscópio - sensor de vibração.



Fonte: [InvenSense Inc. \(2013\)](#).

Acelerômetros são dispositivos que possibilitam medir Para medir a aceleração, do mesmo modo, giroscópios são dispositivos capazes de calcular a velocidade angular tangencial e conseqüentemente a aceleração tangencial de objetos. Tais dispositivos tem a utilização difundida, principalmente na detecção de quedas e colisões, como também em reconhecimento de gestos (citação), com a sua utilização, muitas vezes, associada ao uso de algoritmos de previsibilidade baseado na coleta de dados em tempo real. Além disso, a utilização destes dispositivos para análise de vibrações, em equipamentos prediais tem se difundido cada vez mais, em grande parte, resultante da limitação humana em processar e monitorar vibrações em equipamentos de modo preciso, ou ainda detectar variações imperceptíveis para o campo sensorial humano, como também no custo operacional envolvido no dispêndio de recurso humano para a atividade ([VARANIS; SILVA; MERELES, 2018](#)).

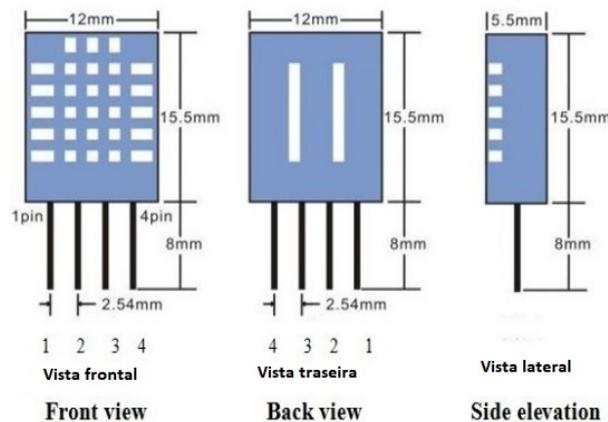
Sua aplicação é frequentemente acompanhada de análises computacionais e do emprego de algoritmos, uma vez que a partir de dados coletados, que formam uma série temporal, é possível construir um modelo com vias a aprimorar a predição de eventos. No campo da engenharia e da manutenção predial seu emprego associado a coleta de dados de motores, com desenvolvimento de padrões de predição, fazendo com que se obtenha maior eficiência na substituição de peças, reduzindo paradas e acidentes indesejados além de otimizar a vida útil do sistema ([ISMAIL; DZIYAUDDIN; SAMAD, 2014](#))

### 2.4.3 Módulo de sensor de temperatura e umidade DHT-11

O módulo sensor de temperatura DHT11 é um componente utilizado, como o próprio nome revela, para a coleta de medidas de temperatura e umidade do ambiente

(NATEPHRA; MOTAMEDI, 2019). Devido a sua confiabilidade e estabilidade este sensor tem se tornado popular em sistemas embarcados, podendo fazer leituras de zero a cinquenta graus Celsius e umidade do ar variando entre vinte a noventa por cento (WURFEL, 2018).

Figura 12 – Vistas do sensor de temperatura e umidade DHT-11.



Fonte: Wurfel (2018).

#### 2.4.4 Módulo de sensor de corrente não invasivo SCT-013

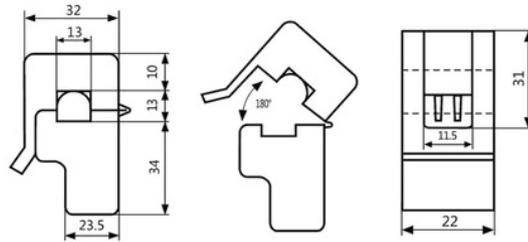
O presente dispositivo trata de um transformador de corrente, fabricado pela empresa YHDC - YaoHuadechang Electronic Co.Ltd, produzindo em Beijing, China, com a denominação mais simplificada de sensor de corrente alternada (AC/CA) não invasivo, com corrente elétrica máxima de 100 amperes. Sendo muito utilizado no monitoramento de consumo energético (MATSUO et al., 2021).

Como proteção interna, o dispositivo (Figura 13) é composto de um diodo Zener, ou diodo regulador de tensão, que limita a voltagem de saída no caso de desconexão acidental de cargas e limitar a tensão nos enrolamentos a um valor seguro quando energizado. Não se destinando, porém, a proteção do sistema, podendo em casos extremos danificar os demais dispositivos quando conectados a este. Tendo como parâmetros elétricos os dados da Tabela 2.

Como as medições lidas pelo MCU são na ordem de 5V, em escala com os valores da rede, e considerando também que as leituras se dão por ondas senoidais, se faz necessário a instalação de circuitos com filtros de entrada, em placas eletrônicas ou dispositivos pré-fabricados, que possibilitam uma leitura mais precisa da rede, através da corrente elétrica que passa pelo equipamento como observado no circuito na Figura 13.

O transformador de corrente YHDC SCT-013-000 é adequado para monitoramento de consumo de equipamentos elétricos, sem necessitar interferir diretamente na rede, como também o tempo de operação e ainda a emissão de alertas em casos de altas amperagens.

Figura 13 – Vistas do sensor transformado de corrente SCT-013.



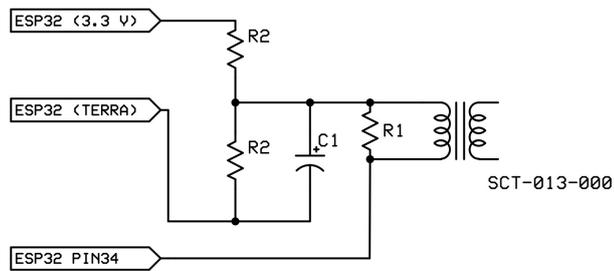
Fonte: YHDC (2015).

Tabela 2 – Parâmetros do sensor/transformador de corrente não invasivo SCT-013

Parâmetros	Valores	Unidades
Corrente de Entrada (RMS)	100	A
Corrente de Entrada Máx.	120	A
Saída Classifica	50	mA
Razão	1:2.000	
Precisão	$\pm 1$	%
Linearidade	$\leq 0,2$	%
Erro de Fase		
Resistência de Amostragem Máx.	10	$\Omega$ (Ohms)
Peso	50	g

Fonte: YHDC (2015).

Figura 14 – Diagrama de circuitos transformador de corrente SCT-013-000.



Fonte: Autoria própria.

## 3 Trabalhos Relacionados

Diversos estudos apontam para a utilização de sensores IoT cujo objetivo se trata do monitoramento do ambiente e suas diversas aplicações no campo da manutenção predial (NGUYEN, 2016; HU et al., 2016; ARSLAN; RIAZ; MUNAWAR, 2017; VALINE-JADSHOUBI et al., 2021). Já nos últimos anos, foi observada uma crescente tendência em desenvolver estruturas que integrassem o monitoramento de ambientes e equipamentos ao uso de sensores com plataformas diversas e modelos em BIM (ZHANG et al., 2021; ALAVI et al., 2021; TAN et al., 2021; LU et al., 2020; BOUABDALLAOUI et al., 2021; SUSANTO et al., 2020). Porém, é limitado na literatura a associação da interoperabilidade BIM-IoT, com a utilização de sensores em prédios públicos para o monitoramento e a tomada de decisões, principalmente no que tange o gerenciamento e o controle no âmbito da manutenção predial (TAN et al., 2021).

### 3.1 Estrutura de análise de dados

A coleta de dados e a utilização de informações tem sido peça chave na indústria nas últimas décadas, tendo muito se falado em dados e gestão de informações, permitindo que decisões sejam tomadas com base na análise dessas variáveis. Porém, quando se fala em Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) a acessibilidade às informações ainda avançam em menor escala, resultando em pouca disponibilidade de dados para a tomada de decisões e planejamento. Nesse contexto a Internet das Coisas (IoT) e a utilização de sensores possibilitariam o acesso à uma vasta gama de dados que vão desde a análise das condições internas de uma edificação até características físicas e padrões que indiquem a tomada de decisões.

Seguindo a mesma lógica, foi observado também que, mesmo em edificações que não tenham dados precisos ou ainda se apresentem como incompletos, com a aplicação da integração BIM-IoT é possível garantir uma eficiente troca de informações que favoreça a tomada de decisões para monitoramento de ativos, como motores elétricos, refrigeradores de ar e diversos equipamentos além de melhorar a atuação da manutenção (KENSEK; NOBLE, 2005).

Noor (2015) apresenta uma aplicação realizada pela empresa Adolene Inc. localizada na Baía de São Francisco, nos Estados Unidos da América - EUA, em que apontou, com a utilização de sensores remotos, a solução de três problemas característicos da manutenção de prédios comerciais. O primeiro, consiste na aquisição remota de dados de temperatura, umidade e qualidade do ar, o que permitiria à equipe responsável pela gestão do edifício a tomada de decisões que possibilitariam um melhor conforto do usuário. O

segundo, permitiu o monitoramento do consumo de energia, desenvolvendo uma visão mais avançada em técnicas de *machine learning* que permitiriam ao sistema aprender sobre o comportamento do prédio e desenvolver um modelo que permitira prever a demanda e otimizar a performance do edifício. Em terceiro, seriam monitorados dados de vibração, acústica e temperatura em determinados equipamentos, com objetivo de prevenir paradas, migrando as ações preventivas para preditivas no âmbito da manutenção predial.

Contudo ainda é necessário garantir o controle, a organização e o gerenciamento das informações como garantia e confiabilidade dos dados (MUNIR et al., 2019). Utilizando o conceito de integração entre BIM e IoT, Desogus et al. (2021) em seu estudo propuseram uma metodologia e uma estrutura para construção uma plataforma de visualização de dados contendo as condições da edificação, através dos dados obtidos pelos sensores instalados. Desenvolvendo a integração entre sensores de baixo custo e modelos em *Revit* estudaram a modelagem de um gêmeo-digital de uma edificação existente.

Nguyen (2016) ao estudar a integração de sensores IoT com a plataforma BIM descreve como ferramenta utilizada o software *Revit* da empresa *Autodesk*, criando um gêmeo digital do prédio, utilizando também o *Dynamo*, uma ferramenta ou API (Interface de Programação de Aplicação) que permite a obtenção dinâmica e automática de informações entre os sensores e o BIM, servindo como uma ponte entre o modelo BIM e os dados obtidos dos sensores.

## 3.2 Integração entre sensores e modelos arquitetônicos utilizando modelagem BIM no suporte de decisões

A modelagem BIM, na área de operação e manutenção de edifícios e instalações permite transformar os dados obtidos de sensores, instalados em campo, em dados que por sua vez podem ser visualizados via modelagem em BIM, Chang, Dzen e Wu (2018), estudaram maneiras de representar e visualizar os dados obtidos em várias perspectivas, para servirem como suporte na tomada de decisões que exigissem informações interdisciplinares. Seu estudo utilizou como exemplo diversos ambientes, contendo as mais variadas utilizações (equipamentos elétricos e mecânicos, salas de aula e auditórios), resultando em diversos cenários para serem analisados.

É importante notar que, para que se alcance a interoperabilidade, faz-se necessário que as informações combinadas de diferentes fontes consigam se integrar de maneira adequada. Nesse sentido Altohami et al. (2021, p. 5) aponta três estágios necessários para alcançar a integração BIM-IoT, que são:

- Estágio 1: Estabelecer um armazenamento livre (*open storage*); Consiste em uma estrutura e uma semântica específica e padronizada para os dados e sistemas.

- Estágio 2: Coleta de Dados BIM e *Live Data* (dados dos dispositivos); Consiste inicialmente na digitalização das instalações e da edificação, seguido pela identificação, detecção e coleta de informações de dispositivos e sensores instalados.
- Estágio 3: Alimentar o *Open Storage* com *Live Data*; Seguido do estágio dois, essa etapa captura os dados dos dispositivos e sensores, os transferindo para seus respectivos campos, relativos à edificação e instalação.

De modo análogo, Chang, Dzeng e Wu (2018) desenharam uma plataforma comum que possibilitou a comunicação entre sensores, com diferentes protocolos e microcontroladores (*Arduino*, *Raspberry Pi*), com a utilização da ferramenta *Dynamo-Autodesk*, um *plug-in* gratuito desenvolvido para o programa *Revit* da empresa *Autodesk*, que teria a função de receber os dados dos sensores e coordená-los automaticamente em BIM, onde seriam redesenhados, permitindo a sua visualização e interpretação na tomada de decisões.

Nesse sentido se observa a capacidade em operar com as duas ferramentas, o BIM, com os dados arquitetônicos, e o IoT, com a utilização de sensores. Consolidando os dois é possível a visualização dos dados obtidos em campo, sem a necessidade de se deslocar para a realização de aferições, economizando recursos e atuando de modo mais individual, conforme a necessidade de cada ambiente.

Assim, foram geradas simulações através dos dados coletados por sensores em uma sala, coletando parâmetros de umidade e temperatura, ao longo do tempo. Bem como permitiu visualizar o nível de conforto dos usuários em diferentes condições, permitindo a visualização na plataforma BIM, facilitando a tomada de decisões, considerando os diferentes contextos, demonstrando a possibilidade de executar o conceito de integrar o BIM e IoT através do uso de sensores e dos softwares disponíveis.

Já no conceito de tomada de decisão baseada em dados, também chamada de *data-driven*, Cheng et al. (2020) propuseram uma estrutura que pode prevenir a falha e prolongar o tempo de vida útil dos componentes das instalações, através da integração do BIM, IoT e do gerenciamento de manutenção. Dessa forma desenvolveram modelos de predição baseados em aprendizado de máquina (ML) para a predição das manutenções e redução de falhas.

Embora o trabalho destaque a tomada de decisão entre sistemas BIM e IoT, as ideias ainda se encontram em fase inicial, no que se refere a manutenção predial, seu modelo não se ajusta a sistemas de *chillers* para refrigeração, entretanto fornece ferramentas suficientes para a elaboração de um sistema para o planejamento, controle e gerenciamento da manutenção de trabalho em equipes de manutenção predial com base em sensores e equipamentos que integrem o BIM ao IoT para a aquisição de dados.

A estratégia que o estudo aborda é a de desenvolver uma estrutura específica que

mostre o fluxo de dados que parta dos sensores e que possibilite a implementação de procedimento de manutenção preditiva, permitindo às partes envolvidas na manutenção a melhor tomada de decisões. Havendo também a utilização de algoritmos de aprendizado de máquina para o desenvolvimento de predições.

Em seu estudo [Meng et al. \(2020\)](#) utilizaram programas de gestão da manutenção, contendo arquivos de inspeção, solicitações de serviços, ordens de serviços e histórico de manutenção. Com isso, a utilização do *COBie*, um extensão do software *Revit-Autodesk*, permitiu a interoperabilidade entre os dados do BIM e os sistemas de manutenção (FM), com a utilização dos dados de operações de construção e de troca de informações de construção (em inglês, *Constructions Operations Building information Exchange - COBiE*).

Com essa estrutura, a vantagem que se nota é a integração entre o BIM, aprimorando os *frameworks* apresentados por [Moreno et al. \(2022\)](#) e ([VILLA et al., 2022](#)). Automatizando as plataformas de manutenção e IoT, sendo possível, assim, o reconhecimento de dados que quando organizados formem um padrão de comportamento, representando para a manutenção um sinal de alerta ou de predição de falha, para que, após identificado facilite sua rastreabilidade minimizando o custo do equipamento parado para a realização da atividade de manutenção, quando comparado com a manutenção corretiva.

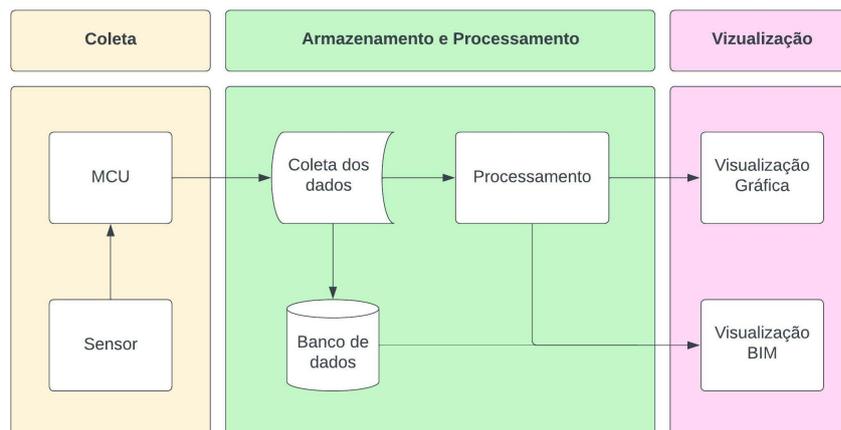
[Moretti et al. \(2020, p. 16\)](#), em seu estudo sobre a abordagem *openBIM* na integração da IoT com dados incompletos de as-built, apontam que gêmeos digitais são poderosas ferramentas no gerenciamento de ativos e na operação e manutenção de prédios cognitivos, bem como demonstra o potencial da integração entre dados estáticos e dados em tempo real ou dinâmicos, possibilitando uma abordagem através da tomada de decisão baseada em dados, o que poderia diminuir vazio existente, atestado pelo desconhecimento das instalações, como falta de projetos, acervos históricos e desconhecimento das instalações, contrapondo com um maior controle dos ativos e da automação.

## 4 Metodologia

O presente estudo trata do desenvolvimento de um modelo com uma estrutura associada a uma plataforma em nuvem, com integração das metodologias BIM e o emprego de sensores IoT para a manutenção de prédios públicos. A aplicação desenvolvida tem como ideia chave o monitoramento da edificação construída, bem como os seus equipamentos e ambientes diversos, através da visualização dos dados numa plataforma web.

Assim, a pesquisa inicialmente desenvolveu, no contexto da manutenção predial, um *protomodelo* (Figura 15) para o início da abordagem experimental, com três etapas ou camadas, sendo a primeira a de coleta dos dados, seguida pela camada de armazenamento e processamento, concluindo visualização das informações.

Figura 15 – Modelagem inicial da integração BIM-IoT.



Fonte: Autoria própria.

Na camada correspondente à Coleta, o estudo se dirigiu para a relação dos sensores e microcontroladores no ambiente no qual estavam inseridos, objetivando a coleta de dados e sua respectiva transmissão.

Já a camada de Armazenamento e Processamento, ilustra a recepção dos dados obtidos dos sensores, tendo seu armazenamento e processamento dos dados como fundamento, para que, num momento seguinte se transformem em informações que possam ser utilizadas pelo usuário. Conduzindo o estudo na busca de meios sobre como trafegar os dados e gerenciar as informações obtidas dos sensores.

Por fim, a terceira camada, apresentado como Visualização, tratando de modo objetivo do estudo de meios que possibilitasse a visualização das informações, que após o processamento dos dados poderiam ser integradas às outras informações de origem diversa,

como no caso do estudo, a visualização BIM, relacionada a estrutura existente, que quando associadas permitem uma melhor representação das características em campo.

## 4.1 Desenvolvimento do modelo

O presente estudo traz consigo as bases para a estruturação de um modelo de virtualização da edificação, cujos dados são obtidos por meio de sensores, que após a transmissão dos dados, e em conjunto com aplicações de interoperabilidade promovida entre a plataforma BIM, contendo a modelagem de uma instalação predial pública já existente, e de hospedagem em nuvem dos dados, é que se analisará os dados obtidos, resultando em informações e o consequente desenvolvimento modelos que favoreçam a manutenção predial e suas instalações.

Logo, para que fosse possível o desenvolvimento metodológico sobre o assunto foi proposto uma modelagem conceitual que objetivasse a integração entre a tecnologia BIM e sensores IoT associados a uma plataforma web, como observado na Figura 16.

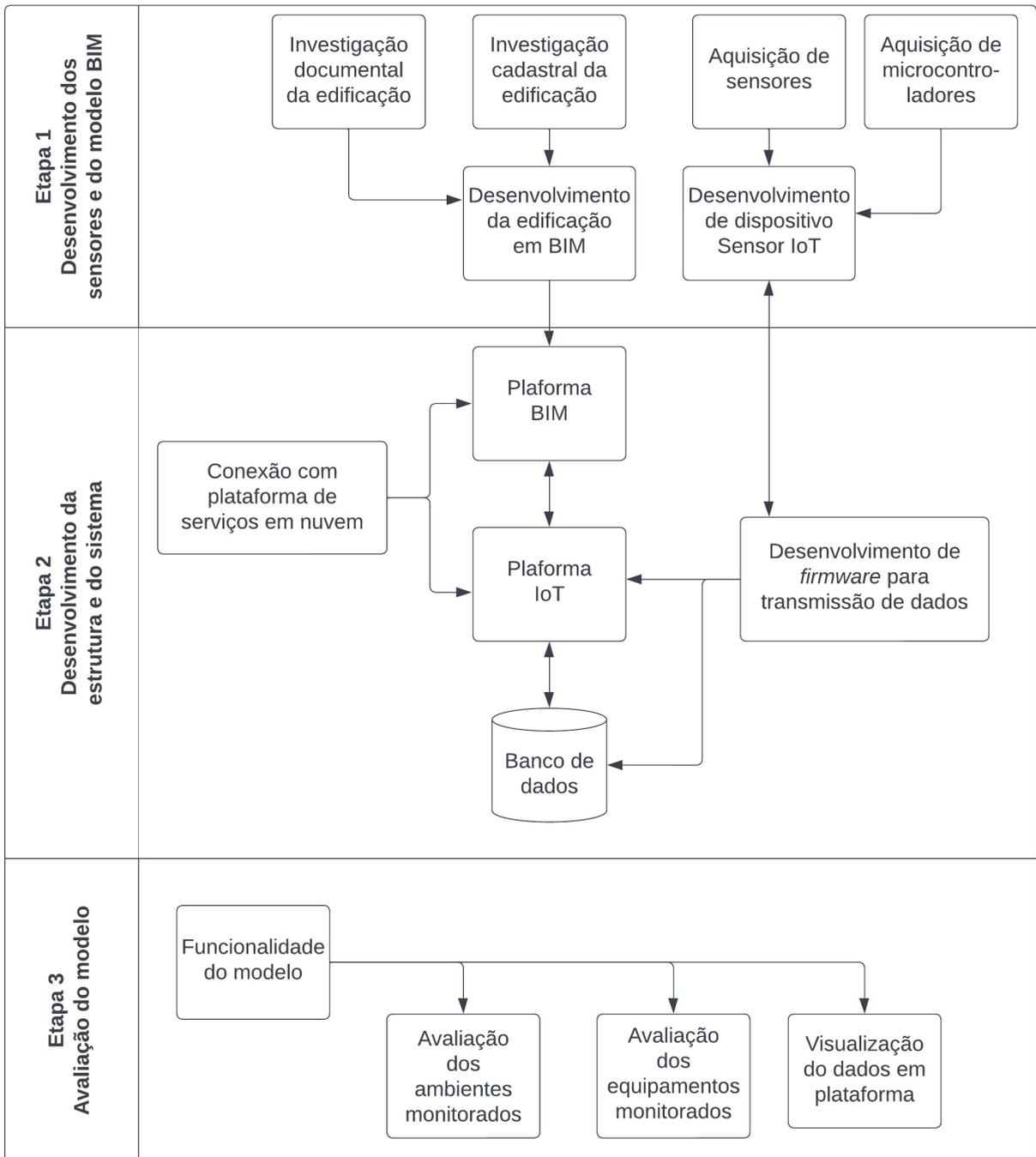
Em princípio, a primeira etapa que corresponde ao emprego das ferramentas utilizadas para a base de construção do modelo, cabendo a realização de pesquisas documentais, a coleta de informações em campo, como também a utilização de plataformas e programas autorais, considerando a diversidade do acervo existente, pertencentes à Superintendência da Zona Franca de Manaus, como plantas baixas e arquivos de projetos das instalações existentes, como também a revisão bibliográfica, a pesquisa de campo e a análise dos dados.

Nessa perspectiva, por meio da análise das tecnologias e esquemas existentes na literatura científica, o presente estudo buscou desenvolver um modelo considerando às demandas específicas de uma edificação, salvo proporções e especificidades, onde a BIM-IoT proporcionem ganhos relativos à gestão da manutenção e conforto dos usuários .

Em outras palavras, para o desenvolvimento da aplicação foi necessária a utilização de dispositivos que permitam o monitoramento e a conectividade, preferencialmente os de baixo custo envolvido, como cita [Susanto et al. \(2020\)](#) que em sua pesquisa, que utilizou sensores instalados em placas microcontroladoras de desenvolvimento como as desenvolvidas em Arduino, ESP32 e outras placas semelhantes de baixo valor agregado, disponíveis no mercado, para monitoramento de equipamentos, possibilitando leituras do ambiente e o transporte dos dados até o operador.

Posteriormente, dentro da segunda etapa, o estudo propõe, a partir da transmissão dos dados de sensores através de uma rede sem fio, a coleta de dados de equipamentos, como também dos ambientes, aos quais estejam inseridos, a fim de transmiti-los a um banco de dados, podendo este ser em nuvem, para num momento posterior integrá-los a

Figura 16 – Modelagem metodológica conceitual da integração BIM-IoT.



Fonte: Autoria própria.

uma plataforma BIM para visualização.

Uma vez hospedados, em nuvem e associados na plataforma BIM, os dados podem ser visualizados para monitoramento em tempo real do modelo digital, e ainda, possibilitando a gestão da informação para a tomada de decisão, transmissão de alertas e gestão de ativos. Podendo impactar positivamente na redução de custos, no gerenciamento e o controle de recursos materiais e humanos no campo da manutenção predial.

Por fim, após a transmissão e a leitura dos dados em plataforma hospedada em nuvem, é iniciado a avaliação do modelo a partir das leituras obtidas dos equipamentos existentes, a fim de verificar a estrutura, desde os sensores e dispositivos até a visualização das informações, correspondendo a terceira etapa da modelagem. Ou seja, caberá ao fim do estudo a execução de experimentos que visem a obtenção dos dados em campo, monitorados pelos sensores.

#### 4.1.1 Dispositivos utilizados

Os dispositivos utilizados na pesquisa, apresentados como protótipos, são parte do modelo para o desenvolvimento da estrutura de integração BIM-IoT. Nesse sentido, de modo geral, os dispositivos tem como objetivo principal a coleta de dados e a transmissão das informações por meio de rede sem fio, Wi-Fi.

Para a confecção do dispositivo foi utilizado como base o módulo microcontrolador da família *Esprecciff* ESP32-WROOM-DEV-KIT, para armazenamento das informações, cálculos e envio dos dados. Associados a esses há também a utilização do *Arduino IDE* como ambiente ou plataforma para escrita e *upload* de programas para leitura dos sensores nas placas, utilizando a linguagem *C++* para o desenvolvimento dos protótipos.

##### 4.1.1.1 Sensor de temperatura

Em um primeiro momento o presente estudo se direcionou para a análise e monitoramento do sistema de refrigeração da Sede da SUFRAMA em Manaus, cujo sistema se dava por um conjunto de *Chillers* da Marca Hitachi do tipo parafuso, modelo 6002 SC-H, instalado em 1999.

Porém, após a instalação do novo sistema VRF a pesquisa se modelou de forma que possibilitasse o monitoramento dos efeitos físicos do novo equipamento.

Para implementação do sistema foi utilizado um dispositivo com placa MCU associado ao sensor de temperatura que coletará a temperatura do ambiente. O dispositivo realizará leituras, tendo como objetivo o monitoramento de um dia típico de funcionamento da instituição, uma vez que o estudo prevê a utilização desses dados para a possível representação (NATEPHRA; MOTAMEDI, 2019).

Complementarmente, o estudo utilizará sensores de temperatura e umidade, que colocados em ambientes registraram as variações de temperatura enviado os dados via rede sem fio para armazenamento, possibilitando a construção de uma série histórica para a posterior verificação e otimização do sistema de refrigeração.

#### 4.1.1.2 Sensor de aceleração

Com o objetivo de traduzir os efeitos físicos do objeto a ser medido (motor elétrico rotativo) a utilização de um acelerômetro permite a medição da aceleração da vibração do equipamento. Nesse contexto, a aplicação é limitada pela frequência do sensor, que é de 30 kHz.

Assim, inicialmente será dada pela instalação do sensor ao motor, no sentido do alinhamento do eixo do motor do ventilador, cuja ligação elétrica se dará pela própria alimentação do dispositivo MCU, sendo este ligado a rede via fonte adaptadora apropriada.

Para o processamento dos sinais, a partir da análise da vibração do equipamento se dará a aplicação da *Transformada Rápida de Fourier* (FFT), disponível pela própria aplicação em nuvem, uma vez que, dentre as técnicas aplicadas, a análise da vibração seguida pela análise dos sinais (domínio da frequência x domínio do tempo) são princípios que ajudam a indicar falhas e desgastes em equipamentos rotativos (HAWKRIDGE et al., 2021).

#### 4.1.1.3 Sensor de corrente elétrica

Como parte da análise do sistema, será realizada a medição e monitoramento da corrente elétrica dos equipamentos que estão sob a avaliação da vibração (unidades condensadoras do sistema de refrigeração VRF) com o objetivo de unir os dois dados para a geração de análises derivativas que possibilitem a criação de informações de modo simples.

Nesse sentido, foi desenvolvida uma placa de circuito integrada ao microcontrolador ESP32 que estará conectado aos sensores de corrente elétrica, conectados à rede de alimentação dos equipamentos de modo indireto, possibilitando a necessidade de pessoal altamente especializado para realizar a instalação dos dispositivos. Assim, a utilização dos sensores gerará sinais que após interpretados pela unidade MCU se traduzirão em dados da corrente elétrica para o monitoramento em plataforma na nuvem (VILLA et al., 2022).

Assim, caberá a aplicação desenvolvida o registro dos dados, para que publicados de modo específico facilitem a análise e a interpretação em tempo real, no sentido de determinar e identificar falhas que possam ocorrer.

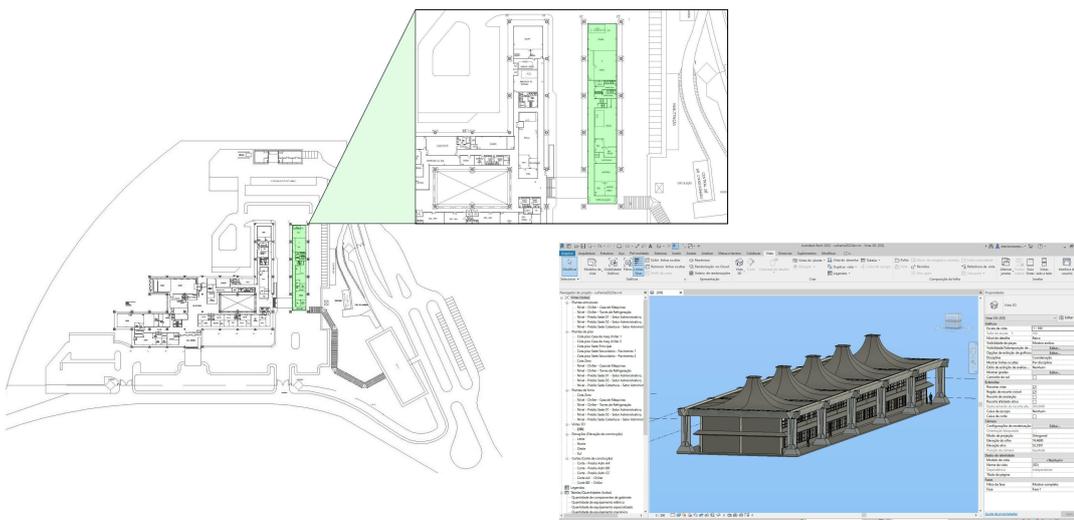
## 5 Experimentos e Resultados

O modelo BIM, carrega consigo uma estrutura de dados e informações, apresentando tanto dados estáticos, como componentes da edificação que não sofrem qualquer alteração ao longo da sua vida, detalhamentos e localizações fixas, bem como os dados dinâmicos, como exemplo os dados de temperatura e umidade de ambientes, obtidos de sensores (ARSLAN; RIAZ; MUNAWAR, 2017). Considera-se que a integração das informações, no aspecto da engenharia, possibilita uma valorização e repercussão das informações, uma vez que elementos da edificação, antes tidos como estáticos passariam a integrar condições dinâmicas, como por exemplo dados e informações ambientais coletadas em tempo real (TANG et al., 2019a).

### 5.1 Procedimentos experimentais

Para o presente estudo, foi digitalizada parte das instalações do órgão, sendo esta correlacionada aos sensores que captam as características do ambiente, como a temperatura, a corrente elétrica e as vibrações, e transformando-os em dados que então serão transmitidos e posteriormente visualizados em plataforma apropriada. Sendo instalados em diversos pontos, localizados nas instalações da Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA).

Figura 17 – Instalações da SUFRAMA em CAD e BIM.



Fonte: Autoria própria.

## 5.2 Setup Experimental

Utilizando uma topologia tipo *Mesh*, disponibilizada pelo MCU ESP32 WROOM com o nome *ESP-WiFi-Mesh*, que associada a uma porta de entrada (*gateway*) é que foi possível desenvolver uma rede de conectividade dos sensores. Nessa rede, os sensores conectados não só formavam uma rede própria, como também possibilitavam a transferência de dados com a internet, via rede sem fio (Wi-Fi), para a transmissão das informações, facilitando ainda mais a escalabilidade do sistema, sendo esse um aspecto vantajoso no caso de ampliação ou alteração de rota dos dados, possibilitando um maior alcance da rede em campo, permitindo uma cobertura de área utilizando os próprios nós da rede (NGUYEN, 2016).

Uma vez na plataforma, os dados podem ser visualizados e monitorados, podendo ainda, ser distribuídos para auxiliar a tomada de decisão, com a transmissão de alertas e gestão de ativos. Possibilitando a redução de custos, o gerenciamento e controle de recursos materiais e humanos no campo da manutenção predial.

Nesse sentido, foi possível a segmentação do modelo em duas principais divisões, dadas pelo ambiente em que operam, sendo a primeira divisão resultante das interpretações físicas do ambiente, denominado como Ambiente Físico. É nessa área que ocorrem as coletas de dados dos sensores, como também, de modo discreto, a transmissão dos dados através da rede de sensores e redes sem-fio, seguida da transmissão para o ambiente digital através da internet.

Ademais, a divisão seguinte, o Ambiente Digital, formado pelos sistemas e modelos digitais, corresponde às plataformas de armazenamento dos dados em nuvem, como também, a visualização dos modelos digitais hospedados. Fazendo a integração de dados dos sensores com a modelagem BIM, possibilitando a interpretação e análise de situações que ocorrem no ambiente físico.

Nas próximas seções, seguirão as descrições de cada ambiente de desenvolvimento, descrevendo as partes que os compõem, os dispositivos aplicados, bem como, as suas características específicas que contribuem para a montagem dos experimentos e para o desenvolvimento do modelo.

### 5.2.1 Ambiente Físico

A princípio, a modelagem se baseou em uma edificação existente, localizada na cidade de Manaus, no estado do Amazonas, onde funciona atualmente a Superintendência da Zona Franca de Manaus, uma autarquia federal, situada na Avenida Ministro Mário Andreazza, 1.424, no bairro Distrito Industrial.

Dada a grande extensão da edificação e a proporcionalidade das suas estruturas,

somente parte do ambiente físico foi considerado para o estudo, no que se refere a virtualização e modelagem para a aplicação, sendo a “Área Administrativa” a parte escolhida para o avanço e produção dos resultados, bem como quais os equipamentos indicados para a análise, de acordo com sua criticidade. De sorte que, nesses ambientes posteriormente foram instalados os sensores, que após acionados, coletaram dados de temperatura, umidade, corrente elétrica e vibração.

A princípio, o estudo objetivou a mensuração de temperatura em ambientes refrigerados pelo *Chiller* hidrônico que alimentava os condicionadores de ar, *fancoils* e *fancoletes* para toda a sede da SUFRAMA, porém durante o estudo o equipamento entrou em parada permanente, em virtude da substituição do sistema de refrigeração pelo sistema de climatização de Volume de Refrigerante Variável (*Variant Refrigerant Flow - VRF*)

### 5.2.1.1 Caracterização da edificação

O prédio abordado no estudo se trata de uma edificação comercial do tipo governamental pública Figura 18, construída em 1971, tendo sofrido severo incêndio em 1994, sendo posteriormente reformada, com suas obras finalizadas em 1995, perdurando até hoje, localizada em Manaus, Amazonas, servido como base de referência para a implantação do modelo estudado.

Figura 18 – Vista aérea da SUFRAMA.



Fonte: Autoria própria.

Tendo aproximadamente 16.000 metros quadrados de área construída, o espaço hoje abriga a Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA), órgão responsável pelo desenvolvimento regional da cidade de Manaus e a região norte do país (estados do Acre, Amapá, Amazonas, Rondônia e Roraima), bem como, a regulamentação e fiscalização do usufruto de incentivos fiscais que visam a atração de empresas para o Polo Industrial de Manaus.

Fazendo do prédio-sede da SUFRAMA uma das principais representações do “Brutalismo Amazônico”, da obra do arquiteto Severiano Mário Porto, ainda existente, empregando grandes estruturas de concreto em conjunto com uma arquitetura moderna inspirada em temas regionais. Associando as condições da natureza e clima local, ao uso de

tecnologias construtivas disponíveis à época, resultando num conforto térmico equilibrado na edificação (NEVES, 2006; FONSECA; PONTES; SÁNCHEZ, 2013).

Figura 19 – Vista superior da cobertura do prédio da SUFRAMA.



Fonte: Autoria própria.

A edificação conta com várias características que associam o brutalismo, que deriva de um estilo arquitetônico voltado para repartições públicas e governamentais, além da valorização do concreto armado aparente em suas obras. Como também, uma estrutura modular de cúpulas, aproveitando a possibilidade de crescimento da instituição.

## 5.2.2 Sensores e Microcontroladores

### 5.2.2.1 Módulo MCU ESP32

Para o referido estudo foi utilizado como microcontrolador o ESP32-WROOM32, com módulo Wi-Fi e BLE (*Bluetooth Low Energy*) já embarcados. Sendo que, para a comunicação a rede utilizada entre os dispositivos e a rede foi a *ESP-WIFI-MESH*, garantindo maior resiliência ao sistema durante o seu funcionamento. Fazendo parte de todos os sensores e até mesmo repetidos de sinal em casos mais específicos (MARWAN; WIKLOM, 2021).

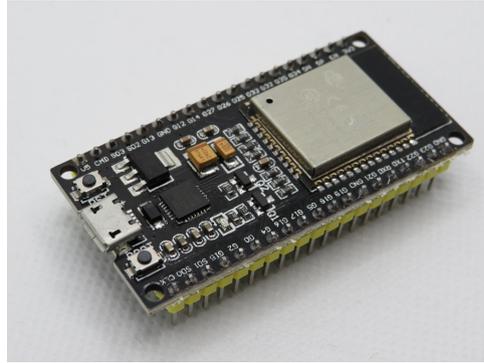
#### 5.2.2.1.1 Módulo sensor de temperatura e umidade

Na implementação de sensores de temperatura nos ambientes, o sensor DHT11 foi o sensor utilizado, tendo como base o espectro de leituras aceitos pelo sensor, como observado na Seção 12. Assim, no contexto do monitoramento de ambientes e equipamentos o módulo sensor de temperatura DHT11 se ajustou bem para as aplicações *in loco*.

#### 5.2.2.1.2 Módulo sensor de vibração - acelerômetro e giroscópio

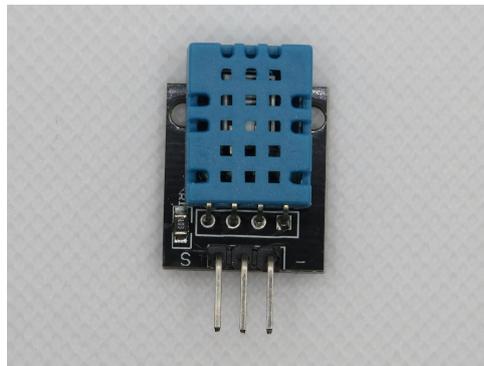
O sensor acelerômetro e giroscópio, presentes no módulo MPU 6050, disponibilizado pela *InvenSense TDK*, foi a ferramenta escolhida para interagir no monitoramento

Figura 20 – Módulo microcontrolador ESP32-WROOM-DEV.



Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Módulo sensor de temperatura e umidade.



Fonte: Autoria própria.

vibracional de motores, relativo a análise da condição dos seus acessórios, como correias e rolamentos, que também podem influenciar na vibração do sistema. A utilização do módulo tem como objetivo registrar esse tipo de vibrações, a depender de onde estejam instalados.

#### 5.2.2.1.3 Módulo sensor de corrente elétrica

A utilização do sensor transformador de corrente, YHDC SCT-013-000 foi importante devido à sua instalação não invasiva, permitindo o acesso aos circuitos, nos quadros e nos equipamentos elétricos de forma menos perigosa, quando comparado aos sensores invasivos. Quanto a sua aplicação *in loco*, um outro benefício observado foi o da preservação da garantia nos equipamentos recém adquiridos pela instituição, que se encontram em período de garantia, impossibilitando a realização de medições diretas, sendo permitido somente o acesso de modo indireto, através dos quadros de alimentação adjacentes aos circuitos dos equipamentos de refrigeração VRF para o monitoramento com a mínima interferência, conforme disposto na Figura 23.

Figura 22 – Módulo sensor de vibração e acelerômetro.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Módulo sensor de corrente elétrica YHDC SCT-013-000

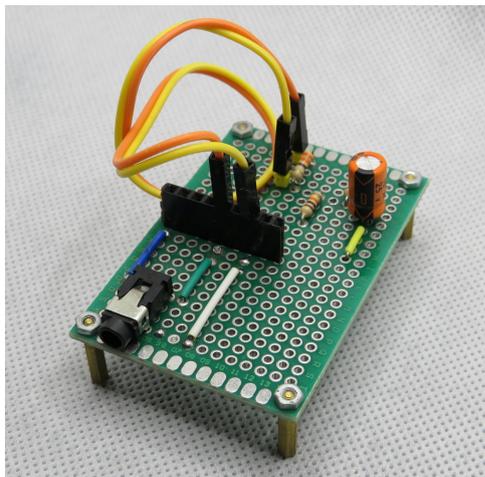


Fonte: Autoria própria.

Desse modo, o referido dispositivo possibilitou leituras indiretas, sem acesso físico aos condutores, fazendo do sensor YHDC SCT-013-000 o dispositivo utilizado na pesquisa para a coleta de assinaturas elétricas e monitoramento de equipamentos. O esquema de montagem do circuito de ligação pode ser consultado na Seção 2.4.4 do estudo presente, tendo o seguinte aspecto após montada, conforme Figura 24. Assim, o dispositivo eletrônico desenvolvido produz, quando instalado, sinais proporcionais de corrente elétrica e de voltagem, convertendo-os para as entradas familiares do MCU ESP32.

Paralelamente, para que fosse possível a realização da leitura pelo MCU, através de suas portas, foi necessário o emprego de componentes montados conforme a Figura 24, com a função de converter a estrutura do sinal elétrico, de ondas senoidais produzidas pelo circuito de corrente alternada (AC), com fases de 127V a 220V, para ondas quadráticas e corrente contínua (DC), com a tensão variando entre 0V a 5V, proporcionado ao sinal de saída uma estrutura mais linear possível, possibilitando a transmissão e o processamento das informações.

Figura 24 – Placa eletrônica para leitura do sensor transformador de corrente elétrica SCT-013-000

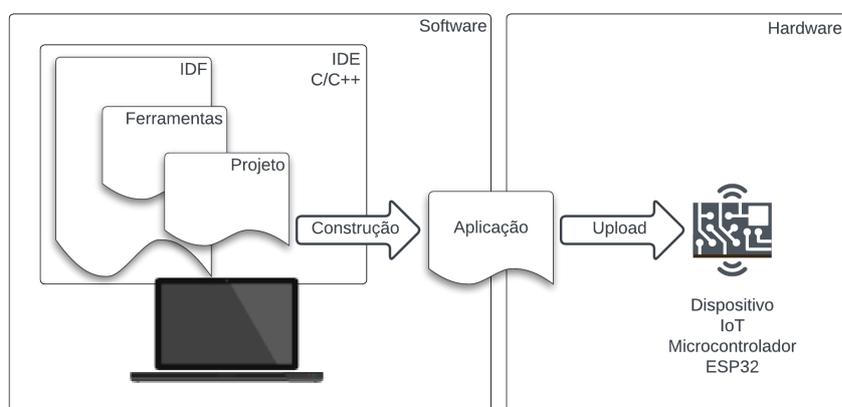


Fonte: Autoria própria.

### 5.2.3 Montagem dos dispositivos

A montagem dos equipamentos foi dada como ponto de partida, com a programação dos microcontroladores, utilizando a plataforma *Arduino IDE*, seguindo com a instalação de *softwares* que possibilitassem a leitura e interpretação dos pulsos elétricos ou eletrônicos originadas nos sensores acoplados ao MCU. Como resultado, o dispositivo microcontrolador ESP32 WROOM, após programado tem gravado em seus sistemas internos as rotinas para processamento desses pulsos elétricos, para transformá-los em dados, que num momento posterior transmitirá os dados via Wi-Fi para a rede de internet, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Estrutura da aplicação - instalação de software.

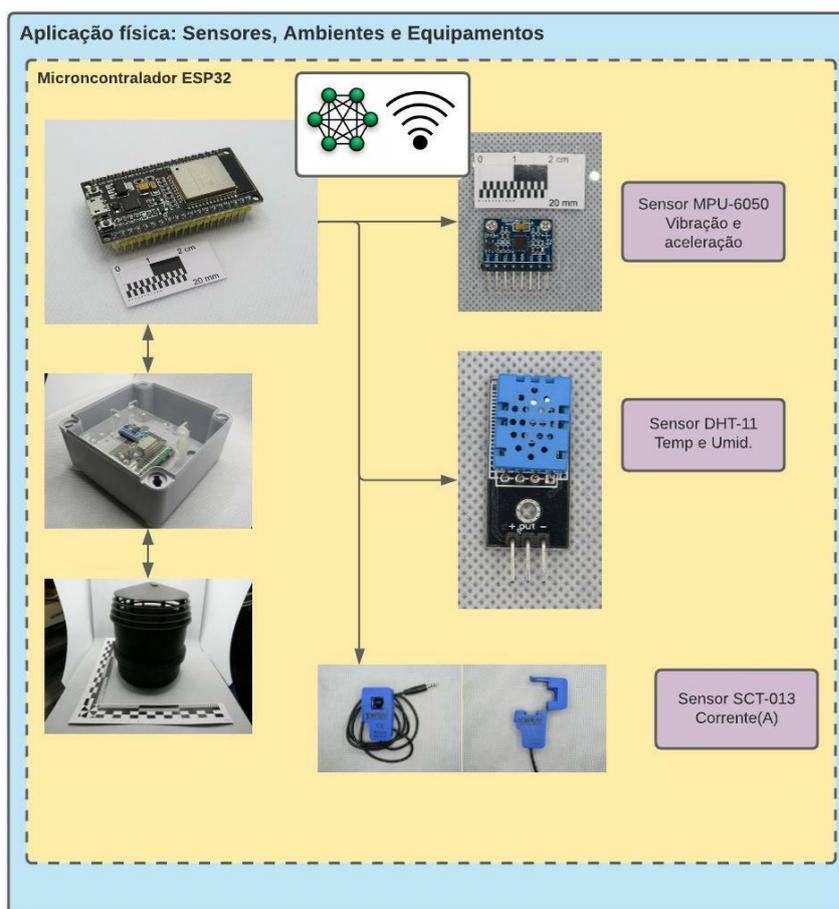


Fonte: Autoria própria.

Para que os dispositivos não ficassem a exposição do ambiente, foram utilizadas caixas específicas, do tipo caixa de passagem elétrica, conforme a Figura 27, com proteção

impermeável nível *IP 65* - contra jatos de água, para que fosse evitado qualquer entrada indesejada de água no sistema que alojasse os circuitos, não evitando a entrada por umidade de ar do meio externo. Como também, foi desenvolvida a adaptação para armazenamento dos dispositivos de temperatura, com tubulação em PVC e seus acessórios Figura 28, para o alojamento dos circuitos, favorecendo a disposição dos sensores e sua versatilidade nas mais diversas aplicações de campo.

Figura 26 – Estrutura de aplicação dos sensores.



Fonte: Autoria própria.

#### 5.2.4 Tratamento e Análise das Informações

Em seguida, após a transmissão dos dados, e com utilização de uma ferramenta BIM de suporte, os dados que correspondem aos ambientes físicos e locação de equipamentos são cadastrados.

Ao mesmo tempo, os dispositivos instalados nessa etapa, já integram uma rede de sensores sem-fio, transmitindo dados referentes a características dos ambientes conforme planejado e programado.

Figura 27 – Caixa de abrigo dos sensores e MCU.



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Abrigo do sensor de temperatura em PVC - vista frontal



Fonte: Autoria própria.

Desse modo, tanto os dados correspondentes aos ambientes físicos e equipamentos, quanto os dados obtidos dos sensores convergem para um banco de dados em comum, nas nuvens, com os conceitos de *Serverless Computing*, para então se integrarem ao ambiente digital de modo consolidado.

### 5.2.5 Modelagem da Edificação

Durante a fase experimental da pesquisa foi realizada a modelagem da edificação, utilizando o software autoral *Revit*, da empresa *Autodesk*, contendo os dados e a métrica necessária obtida a partir da coleta em campo, tendo como ponto de partida os documentos e os projetos de construção da edificação, que após a coleta, o processamento e as medições feitas possibilitou a geração de um modelo digital de parte da edificação existente.

Caracterizado por medidas precisas e detalhamentos mais específicos das estruturas e dos elementos principais, a modelagem de parte da edificação foi desenvolvida para Nível de Detalhamento (*Level of Detail-LOD*) 100 a 200, contendo alguns equipamentos e as principais estruturas contidas no projeto. Além de garantir métricas confiáveis, a partir da geometria, o nível de detalhe da modelagem permitiu também a inserção de dados não geométricos ao modelo, como no caso do estudo, a utilização de sensores para os mais variados usos e dados dos equipamentos.

Figura 29 – Visualização da modelagem BIM em *Revit*

Fonte: Autoria própria.

### 5.2.6 Ambiente Digital

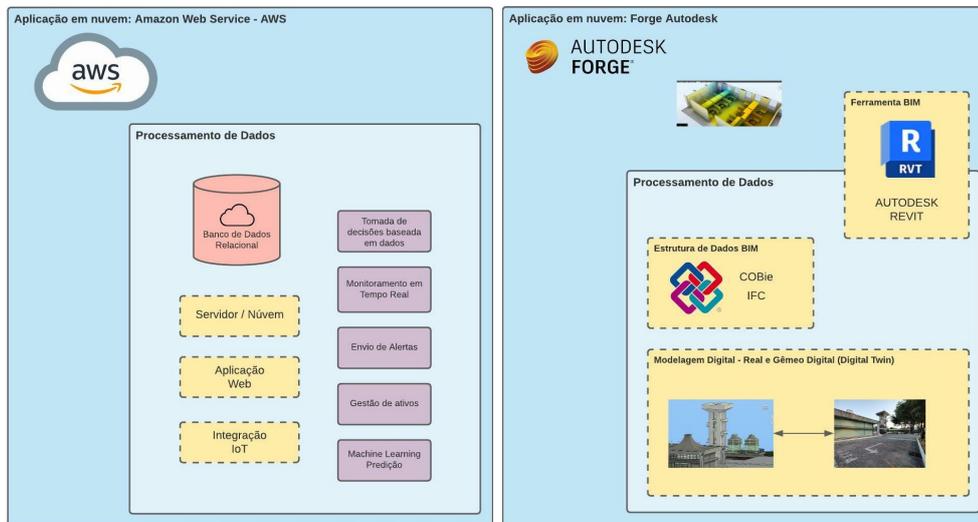
No ambiente digital os dados dos sensores estão correlacionados aos atributos, associados aos ambientes físicos e aos equipamentos, ambos em linguagem compatível ao BIM, disponibilizado em formato “.*rvt*”, possibilitando num primeiro momento a visualização da edificação. Sendo que, ainda nesse não está integrado a aplicação em nuvem e aos dados obtidos dos sensores.

Na outra ponta do modelo, ainda em ambiente digital, está a aplicação em nuvem, hospedada pela *AWS* (*Amazon Web Service*), um servidor em nuvem que disponibiliza na sua plataforma serviços de gerenciamento de dados, bem como a conexão destes, possibilitando aplicações mais avançadas no campo de IoT.

Do mesmo modo, tendo em mãos, a aplicação IoT em nuvem provida pela *AWS*, os sensores encaminhando dados via internet, a modelagem da edificação em BIM, é que se integra, com a utilização de aplicações específicas, (API's) é que, com a utilização da plataforma em nuvem hospedada pela *Forge*, da empresa *Autodesk*, se faz possível a visualização em tempo real dos sensores associados ao modelo digital da edificação. Possibilitando uma visualização em tempo real ou bem próximo da situação. Bem como a leitura dos sensores instalados para interpretação do usuário.

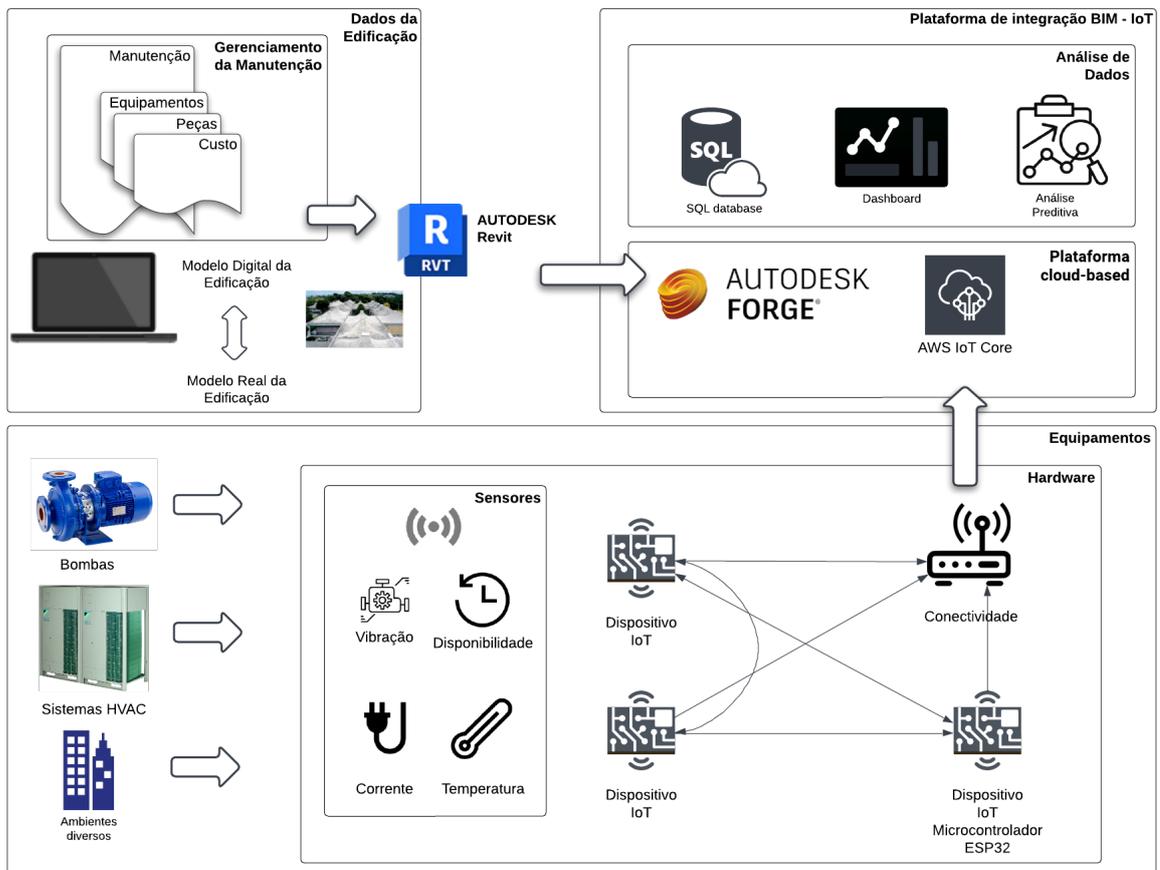
Representando a última etapa do ciclo da estrutura, é neste ambiente que ocorrerá a gestão e o controle do sistema que terá como finalidade a tomada de decisões baseada em dados, a visualização e interpretação do sistema, o envio de alertas para a equipe de manutenção e a gestão de ativos.

Figura 30 – Estrutura de utilização do servidor em nuvem para IoT/AWS e Forge.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Estrutura simplificada do modelo.



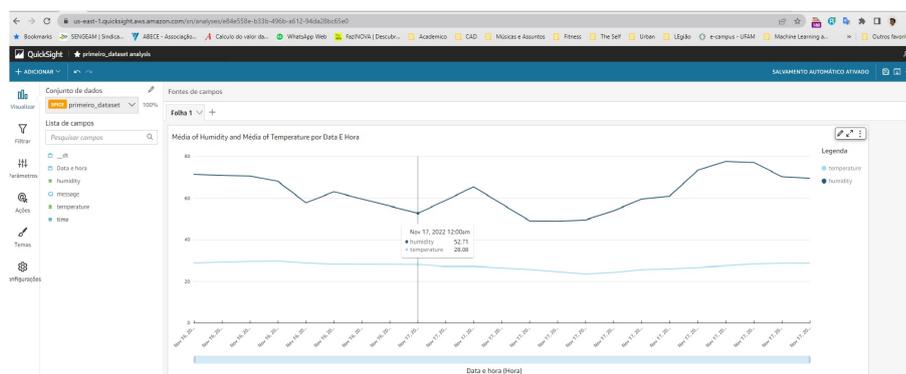
Fonte: Autoria própria.

## 5.3 Experimentos Realizados

### 5.3.1 Experimento 1 - Temperatura e umidade

Na primeira etapa, o experimento se configurou na construção de um dispositivo para o monitoramento da temperatura e umidade em diversos ambientes, representado no estudo pelo módulo sensor temperatura DHT11, associado a uma placa NODE-MCU-ESP32-WROOM, para transmissão de informações e alimentação elétrica.

Figura 32 – Apresentação Gráfica das Leituras de temperatura do sensor.



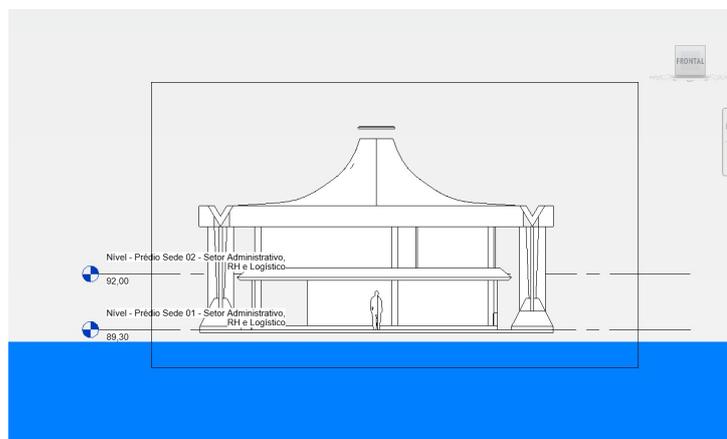
Fonte: Autoria própria.

O objetivo principal do experimento foi dado pela funcionalidade do circuito instalado em campo, que em associação com o micro controlador, possibilitou a transmissão e monitoramento dos sensores localizados no campo, com as transmissões sendo enviadas para internet através de *gateways Wi-Fi*, favorecendo a visualização na plataforma de banco de dados em nuvem, como também na plataforma BIM.

Adicionado a isso, destaca-se que a partir da instalação dos sensores, já programados com *firmwares* de código aberto, é que foi desenvolvido um API, sendo este o responsável por armazenar os dados de temperatura e umidade dos setores, bem como fornecer a capacidade processamento de dados necessário para a realização de tarefas, como no caso específico a análise gráfica, como também estabelecer a comunicação com a aplicação BIM associada para apresentação dos dados em sua plataforma específica.

É pertinente ressaltar que a montagem do sistema de modo modular permitiu a leitura de temperaturas e umidade em tempo real dos ambientes, como também abre caminhos rumo a escalabilidade do sistema como um todo, como também para leituras em outros setores.

Figura 33 – Apresentação Gráfica do modelo BIM.



Fonte: Autoria própria.

### 5.3.2 Experimento 2 - Vibração

Nesta segunda etapa, o experimento se tratou da configuração de um dispositivo para o controle do sistema microeletromecânico (MEMS) que compõe as unidades de processamento de movimentos (*Motion Processing Units*), isto é, foi desenvolvido um dispositivo, representado no estudo pelo módulo sensor de movimento MPU-6050, que associado a uma microcontrolador NODE-MCU-ESP32-WROOM, foi possível a transmissão de informações de vibração do equipamento, como também a alimentação do sistema, via tomada de uso geral, de 127V.

Destaca-se que, no primeiro momento, a pesquisa se inclinou para a análise de equipamentos de refrigeração maiores e mais robustos, como *Chillers* hidrônicos, e seus subsistemas de água gelada e demais equipamentos. Porém, ao passar do tempo o sistema foi substituído pelo VRF, com equipamentos mais leves e descentralizados, fazendo com que a análise se adaptasse a esse novo cenário.

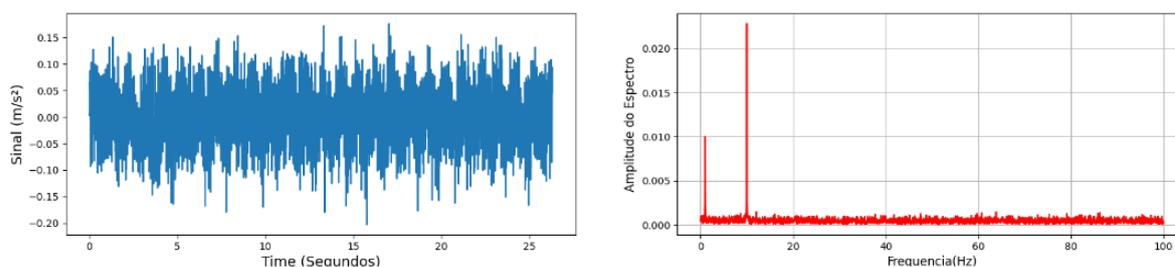
Tabela 3 – Especificações Técnicas das Unidades Externas dos Equipamentos VRF *Daikin*

Modelo		RHXYYQ8A	
Capacidade Nominal	HP	8	
Alimentação Elétrica	TL	3F / 220 V / 60Hz	
Capacidade	Resfriamento	kW	22,4
	Aquecimento	kW	25
Consumo	Resfriamento	kW	4,28
	Aquecimento	kW	4,85
Compressor	Tipo	Scroll Selado	
		Hermético	
	Quantidade	un	1
Fluído Refrigerante	Tipo	R-410A	
	Pré-carga	kg	5
Dimensões	mm	1.657 x 930 x 765	
Massa	kg	184	

Fonte: [Daikin \(2022\)](#).

Para uma análise mais profunda, dos equipamentos, em particular, dos motores rotativos, no que se refere a observação do espectro vibracional, obtido pelo monitoramento dos sensores, é fundamental a obtenção de mais dados, formando ao longo do tempo uma série histórica que possibilite a visualização do desgaste prolongado, bem como a análise de defeitos, possibilitando a atuação corretiva a partir de alertas, como também a construção de um algoritmo para a análise preditiva desses equipamentos.

Figura 34 – Análise de sinais e espectros motores dos ventiladores do VRF.



Fonte: Autoria própria.

Assim, a partir da Figura 34, obtida a partir da análise vibracional, foi observado que o equipamento em questão não vem apresentado qualquer anormalidade, sendo necessário o acompanhamento e registro histórico do equipamento para o estudo da evolução de falhas.

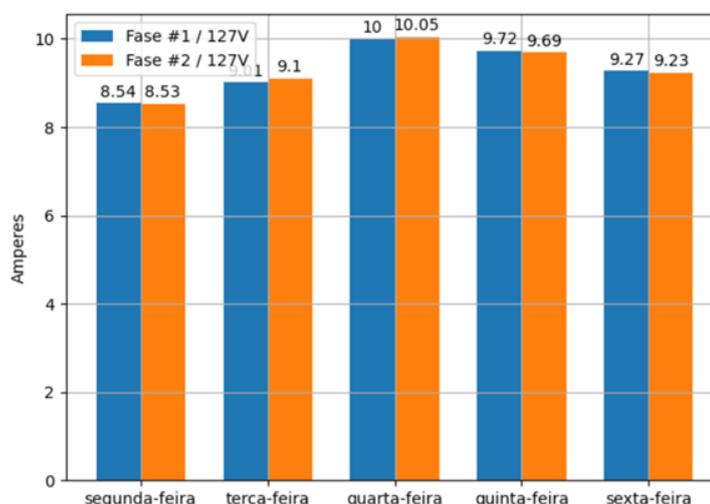
### 5.3.3 Experimento 3 - Corrente Elétrica

Para a terceira etapa, o experimento contou com a montagem de um dispositivo de medição indireta de corrente elétrica, representado no estudo pelo módulo SCT-013-000, que associado a uma microcontrolador NODE MCU ESP32-WROOM, e demais ajustes, permitiu a medição da corrente elétrica dos equipamentos, que possibilitou a transmissão de informações de corrente do equipamento, em tempo real.

Em se tratando de máquinas rotativas, como observado na seção anterior, a análise nem sempre é dada por apenas um fator, cabendo a adição de outros ensaios e monitoramentos para avaliar a tomada de decisão por parte da manutenção. Quanto aos equipamentos a serem medidos, a pesquisa se enveredou para monitoramento de equipamentos que possuem motores, dada a correlação do desgaste do motor com o aumento da corrente elétrica, sendo esse um índice que indica um desgaste pode estar acontecendo, resultando numa alta probabilidade de parada por pane ou falha (MARQUES, 2016).

O monitoramento e a posterior alteração de valores da corrente elétrica do sistema poderiam indicar um desgaste prematuro, incidindo em atividades corretivas de menor impacto para a solução e evitando consequentemente a parada do sistema. Porém as

Figura 35 – Monitoramento da alimentação de corrente elétrica de uma unidade externa de VRF.



Fonte: Autoria própria.

medições apresentaram valores dentro do intervalo especificado pelo fabricante, com variações aceitáveis entre 6 a 10 Amperes, conforme especificado pelo fabricante.

Durante o estudo, ressalta-se, que o sistema de refrigeração de água gelada da unidade da Suframa foi totalmente substituído, sendo colocado outro em seu lugar. Com a reestruturação do sistema de refrigeração, a unidade incorporou um equipamento menos robusto e mais preservado, tendo em vista sua data de aquisição, quando comparado com o outro sistema. Assim, a utilização dos sensores para o monitoramento do seu uso diário se mostrou muito relevante, mesmo que os dados obtidos em campo não tenham apresentado qualquer anormalidade nos equipamentos.

## 5.4 Resultados

### 5.4.1 Modelo de integração BIM-IoT com utilização de sensores

Como resultado, o presente estudo carrega consigo o desenvolvimento de estrutura associada em plataformas baseadas em nuvem, com integração das metodologia BIM e IoT para a manutenção preditiva, a emissão de alertas e a visualização dos sensores em tempo real.

O estudo ainda tem, como base inicial, as funcionalidades propostas pela plataforma AWS, providas pela Amazon, para alocação de dados dos sensores e o desenvolvimento de uma aplicação ML, por conseguinte, a plataforma *Forge*, disponibilizada pela *Autodesk*, possibilita a visualização da edificação, através da sua modelagem construída em *Revit*, contendo as locações dos sensores, interconectando-se através de *API's* específicos com a

plataforma *AWS*, além disso, as duas plataformas em conjunto promovem a observação e o acesso de informações da edificação via web através do uso de navegadores (*browser*).

Com os dados obtidos a partir da leitura dos sensores, há a posterior transmissão desses para a nuvem, onde é possível monitorar via remota os dados de campo em tempo real, com leituras programadas, apresentando dados como temperatura, umidade, corrente elétrica de máquinas e sua vibração.

Por conseguinte, ressalta-se a potencial oportunidade para a tomada de decisão e a emissão de alertas. Ou seja, a modelagem da estrutura proposta permite não só o monitoramento dos equipamentos, como também o desenvolvimento da estrutura cabendo mais sensores, como a sua evolução, no sentido de agregar ferramentas não somente para a predição de falhas, como também na resolução para análise dos dados obtidos, que ao longo de uma série temporal vai se tornando mais consoante a realidade *in loco*.

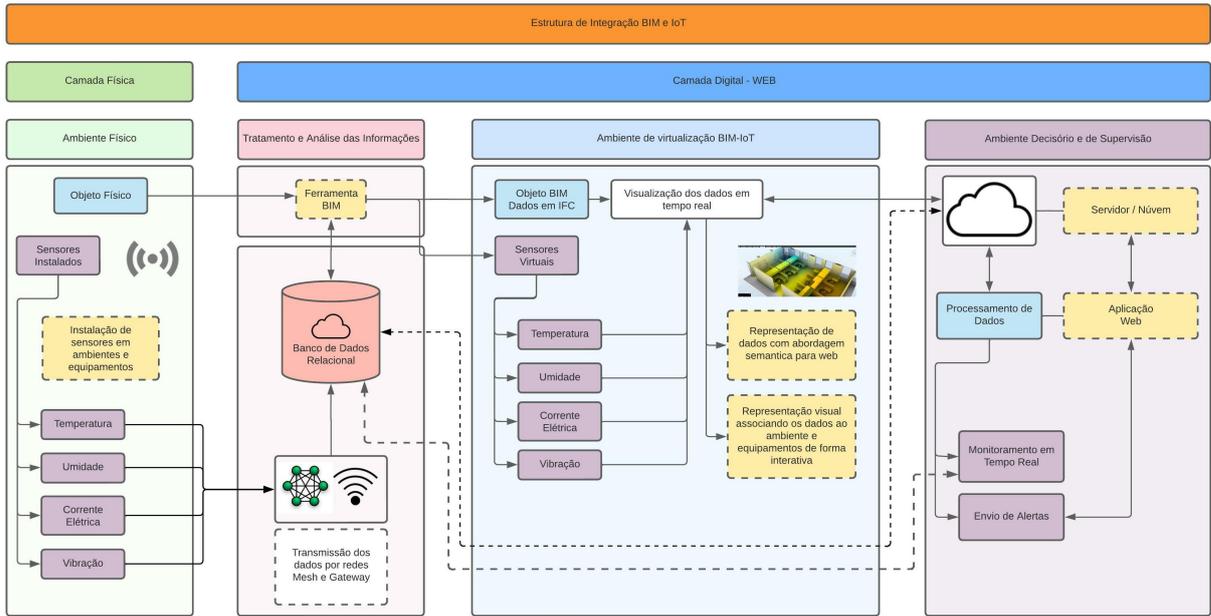
Para o estudo foram construídos protótipos contendo sensores, sendo que estes foram divididos em três categorias, que são:

- A primeira categoria composta por dispositivos contendo placa de desenvolvimento NODE-MCU-ESP32-WROOM, com microcontroladores ESP32, módulo sensor de temperatura e umidade DHT-11, ligados na rede Wi-Fi e na rede de energia local a 127V.
- A segunda categoria composta por dispositivos contendo placa de desenvolvimento NODE-MCU-ESP32-WROOM, com microcontroladores ESP32, módulo acelerômetro MCU6050, ligados na rede Wi-Fi e na rede de energia local a 127V.
- A terceira categoria composta por dispositivos contendo placa de desenvolvimento NODE-MCU-ESP32-WROOM, com microcontroladores ESP32, módulo SCT-013-000, ligados na rede Wi-Fi e na rede de energia local a 127V.

Os dados obtidos dos dispositivos em campo, através da leitura dos sensores, enviados à nuvem, para armazenamento e processamento, onde após um número suficientes de leituras - série histórica, com o passar do tempo forma a robustez necessária e suficiente para a geração de parâmetros adaptativos e para a predição de falhas e até mesmo a previsão de comportamentos, dependendo do ambiente onde estejam inseridos ([CAESARENDRA et al., 2018](#)).

Assim, a partir dos experimentos realizados, associados à utilização de plataformas BIM e IoT, o projeto apresenta uma estrutura para integração de dados BIM-IoT, para o monitoramento e o controle do patrimônio edificado com base na coleta de dados, facilitando a tomada de decisão para a manutenção das edificações, conforme a Figura 36, desenvolvida para a coleta e processamento de informações, como também o armazenamento e visualização BIM em tempo real.

Figura 36 – Estrutura de integração BIM-IoT com utilização de sensores.

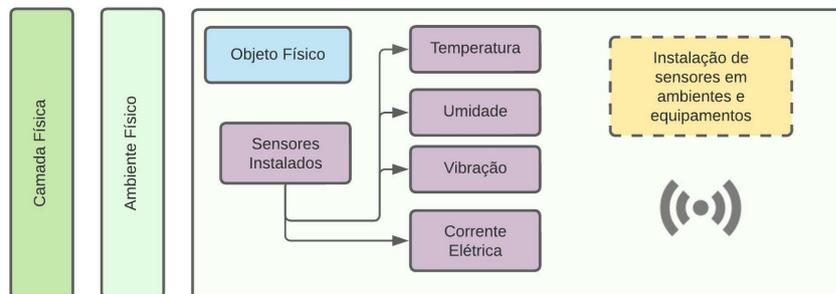


Fonte: Autoria própria.

### 5.4.2 Camada física

O modelo proposto, inicialmente, na camada física, carrega consigo a edificação propriamente dita, bem como as suas instalações e seus ativos. Além das suas características ambientais e sensoriais, como no caso de temperatura e umidade em ambientes, e a vibração e corrente elétrica em determinados equipamentos. É nessa camada específica que são instalados os sensores, de modo que estes registrem essas características do seu entorno, traduzindo-as em dados e posteriormente transmitindo-as para o meio digital (Figura 37).

Figura 37 – Camada e Ambiente físicos.

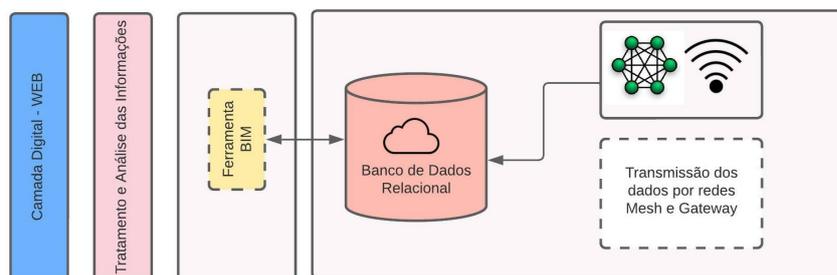


Fonte: Autoria própria.

### 5.4.3 Camada de tratamento e análise dos dados

No que tanger as camadas digitais, a Camada de Tratamento e Análise de Dados pode se diferenciar das outras subsequentes, tendo em vista sua flexibilidade na escolha de serviços locais, como no caso de softwares autorais e servidores físicos, ou no emprego de aplicações feitas a partir de servidores remotos. Em qualquer um dos casos, é nessa camada que se caracteriza a fronteira entre o meio físico e o digital, cabendo a esta a estruturação de redes que possibilitem o tráfego de dados para a internet ou para os servidores.

Figura 38 – Camada web - Tratamento e análise dos dados.



Fonte: Autoria própria.

Tratando de edificações já construídas, com estrutura física existente, conforme descrito na seção anterior, a implantação da metodologia BIM pode ser mais dificultosa, porém após a concretização do modelo digitalizado representando a estrutura existente é que se pode usufruir das vantagens da tecnologia BIM e de suas ferramentas. Possibilitando que diversos serviços e informações passem para um caráter colaborativo, além do armazenamento de dados em nuvem e de grande volume para as mais diversas atividades.

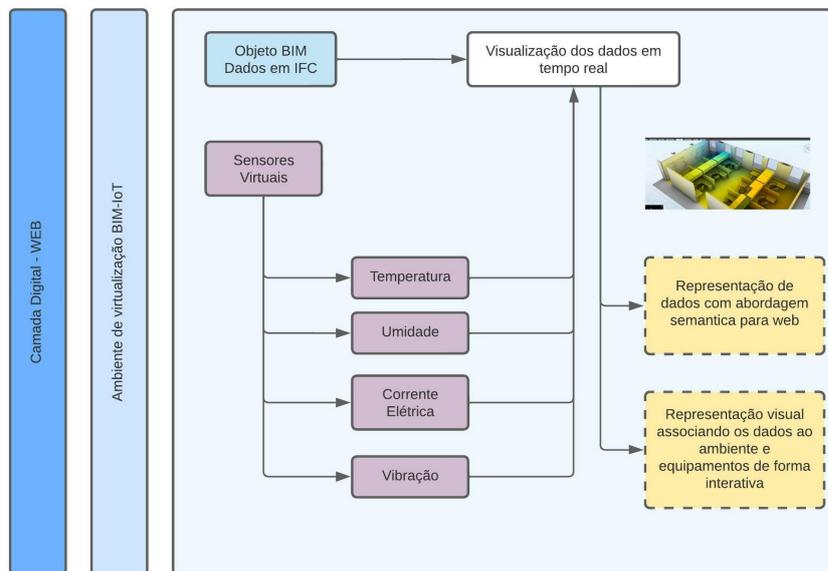
Como características, a rede de sensores construída de modo automático, utilizada pelos MCU ESP32 prevalece a outros dispositivos, uma vez que, após programado os equipamentos possibilitam diversos tipos de topologia do tipo mesh, o que facilita o emprego dos sensores nos mais diversos lugares, cujo alcance se dá por outros nós de sensores, além da rede sem fio existente para a transmissão de dados. O que no contexto de uma edificação existente acaba sendo vantajosos do ponto de vista operacional, reduzindo quebras e adaptações para as instalações dos equipamentos.

### 5.4.4 Ambiente de visualização BIM-IoT

#### 5.4.4.1 Visualização BIM

Para a visualização BIM-IoT, traz-se como referencia inicial as informações necessárias para a construção do modelo em BIM, bem como os dados IFC para interoperabilidade entre diferentes plataformas BIM. Como também, nessa etapa os dados dos sensores devem estar disponibilizados em plataforma ou ambiente específico. De modo que seja

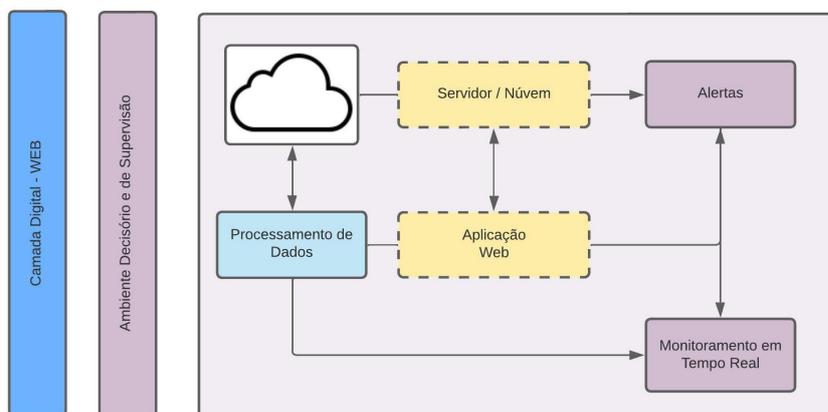
Figura 39 – Camada web - Ambiente de visualização.



Fonte: Autoria própria.

possível entre elas a criação de estruturas e fluxos de dados personalizados, possibilitando a sobreposição de dados IoT aos modelos BIM facilitando as análises visuais.

Figura 40 – Camada web - Ambiente de decisório e supervisão.

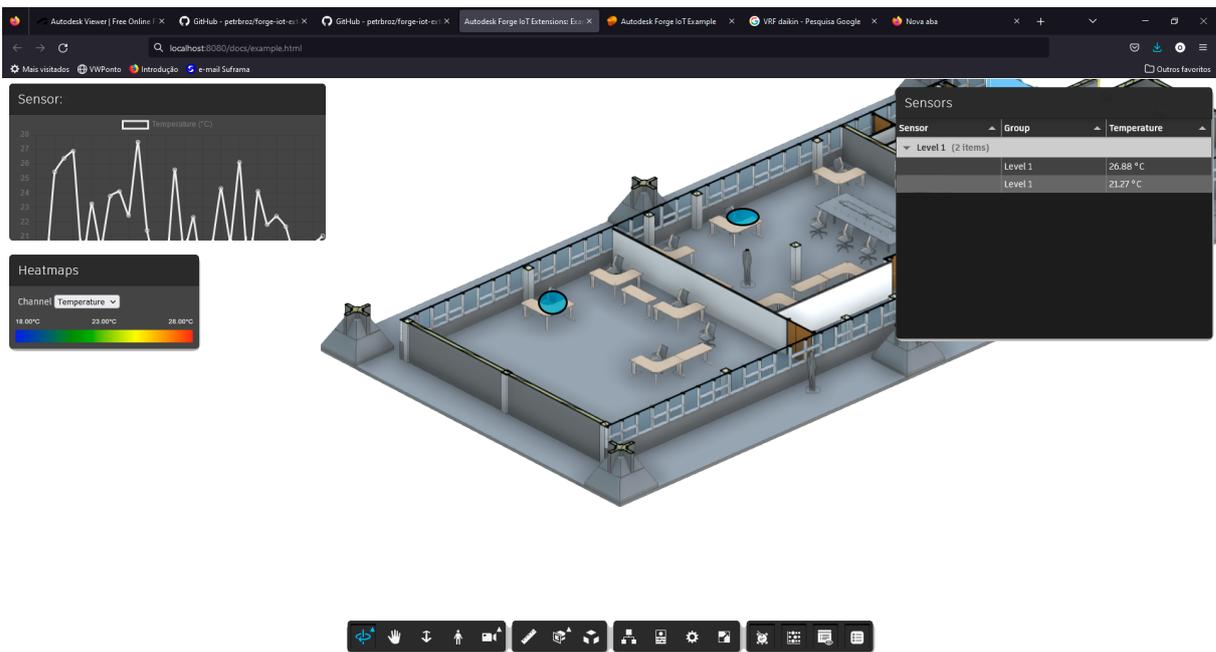


Fonte: Autoria própria.

### 5.4.5 Ambiente decisório e supervisão

Servindo como ambiente para armazenamento dos dados dos sensores, há a utilização da plataforma *AWS (Amazon Web Services)* implementando os dados de modo que seja possível a leitura web dos dados em tempo real. Com isso, as leituras possibilitam a conhecimento necessário para a aquisição de informações. Na Figura 43 é possível verificar

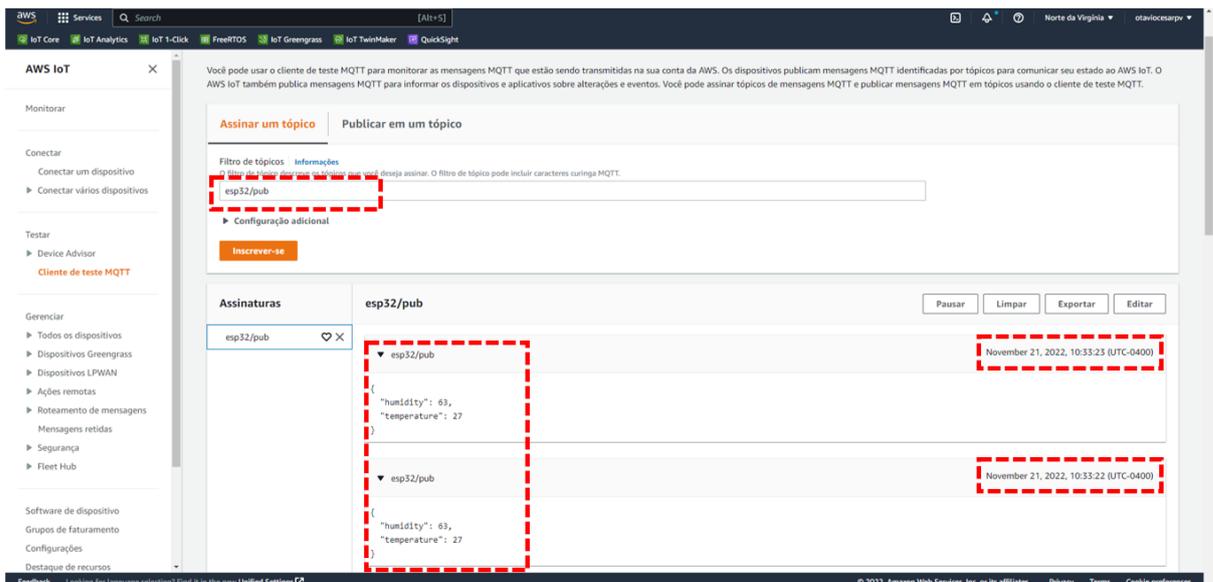
Figura 41 – Virtualização BIM.



Fonte: Autoria própria.

a chamada do sensor “ESP32/pub”, via publicação em MQTT, com a consequente alimentação de dados, cuja frequência é determinada de acordo com a necessidade, recebendo os dados de temperatura e umidade.

Figura 42 – Ambiente de visualização de dados dos sensores.

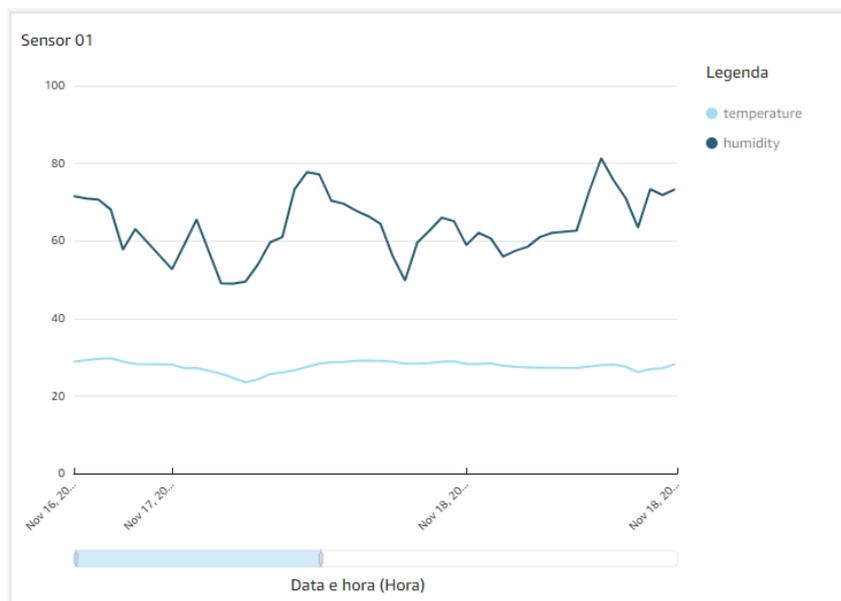


Fonte: Autoria própria.

De forma automática, o serviço prossegue, na mesma plataforma, levando os dados

para outra aplicação, cujo objetivo é a formação de gráficos. Assim, é possível a leitura em tempo real dos dados obtidos em campo, conforme Figura 42 apresentando um trecho da série histórica de leitura dos dados.

Figura 43 – Dados gerados pela plataforma AWS.



Fonte: Autoria própria.

#### 5.4.6 Observações Experimentais

Após a instalação dos sensores e do efetivo uso das plataformas em nuvem (Forge e AWS) para a virtualização dos dados dos sensores e da edificação estudada, foi possível entender a sistemática que envolve o acompanhamento dos dados em campo de modo virtual. Sendo possível, através do navegador *browser*, fazer o uso da solução para o simples monitoramento de ambientes e equipamentos. Entretanto, mesmo com a visualização dos dados, ainda se fazia necessário a operacionalização dos dados para a emissão de alertas e a previsibilidade de falhas, em outra plataforma.

Atualmente muitas instituições contam com planos concretos para implantação do BIM, porém ainda há diferenças quanto a adaptação e a sua operacionalização para uma nova realidade, onde ainda existem órgãos que atuam manualmente na compatibilização dos seus projetos (JEREISSATI et al., 2022). Portanto, denota-se que ainda se tem muito a caminhar no sentido de evoluir do modelo tradicional de projetos.

Por conseguinte, com o desenvolvimento do presente estudo, foi possível entender os principais conceitos e aspectos envolvidos no uso da metodologia, bem como o seu uso e a compatibilização com plataformas de computação em nuvem e a agregação de

sensores IoT. Tornando mais simples o acesso, tanto a equipe técnica, quanto da equipe operacional, responsável pela manutenção às plataformas já prontas.

Na contramão, observa-se também que a cultura de programação, seja ela em nuvem, ou a simples programação de sistemas e de embarcados, ainda é um abismo para os profissionais de engenharia e arquitetura e de outras áreas correlatas, fazendo com que novas soluções e contribuições levem mais tempo para ser adotadas de modo pleno, sobretudo em equipes que não contam com profissionais de tecnologia da informação.

Ainda assim, apesar das complexidades envolvidas na implementação da solução BIM-IoT, vale ressaltar que a sua utilização promove grandes soluções, e em diversas atividades, como na manutenção predial, que permite a virtualização das edificações, controle dos ativos, monitoramento de ambientes e equipamentos, além do seu crescimento e alcance facilmente escalável. Contribuindo também no aspecto de intervenção mínima quando se diz respeito à instalação dos sensores sem fio para o monitoramento da edificação, servindo como ótima alternativa para prédios tombados, patrimônios históricos e áreas de acesso restrito.

## 5.5 Análise Custos e Implementação

Inicialmente, a proposta inicial do estudo foi baseada nos equipamentos da SUFRAMA antes da reforma realizada no sistema de refrigeração, sendo possível traçar uma projeção de custos envolvendo a manutenção do *Chiller*, no que tange a manutenção corretiva e preventiva, conforme a Tabela 4 com os custos das ações de manutenção do equipamento previstas no Contrato n° 22/2021, responsável pela manutenção predial da sede da SUFRAMA.

Tabela 4 – Tabela de preços para a manutenção preventiva e corretiva dos compressores do tipo parafuso do *Chiller* da sede da SUFRAMA do Contrato n° 22/2021 de Manutenção Predial

Item	Descrição	Und.	Quant.	Custo Unitário	Custo Total
1	Remanufaturamento de Compressor Parafuso Carlyle 06NA2209W7NA-A00	un	2	R\$ 21.777,41	R\$ 43.554,82
2	Remanufaturamento de Compressor Hitachi Modelo 6002SC-Z	un	3	R\$ 23.085,09	R\$ 69.255,27
3	Overhaul Básico em Campo	un	1	R\$ 38.102,56	R\$ 38.102,56
4	Overhaul com troca de estator para Compressor Hitachi Modelo 6002SC-Z	un	1	R\$ 63.794,03	R\$ 63.794,03

Fonte: Autoria própria.

Baseado nesses dados, e na recomendação do fabricante do *Chiller*, *Hitachi Air Conditioning Solutions*, que estabelece a revisão a cada 5 anos ou 40.000 horas de operação, ou ainda, o que ocorrer primeiro (HITACHI, 2016), foi que determinou a periodicidade mínima para a execução do *overhaul* da manutenção preventiva.

Contudo, foi observado que devido a falta de revisões no passado, associado ao tempo de vida do equipamento, a contar da sua instalação em 1999, poucas intervenções tinham sido executadas, fazendo com que os gastos com a manutenção corretiva com esse tipo de equipamento disparasse nos últimos cinco anos. Resultando em intervenções corretivas com períodos inferiores aos atribuídos pelo fabricante de forma preventiva.

Nesse sentido, o presente estudo focou na análise e no monitoramento do equipamento, associado ao modelo BIM-IoT, para a identificação de falhas simples, que quando saneadas resultariam num custo inferior, quando comparadas à quebra ou queima do equipamento, com custos mais elevados. Uma vez que, grande parte das falhas nesse tipo de equipamento é dada pela detecção da vibração e análise da corrente elétrica (MARQUES, 2016).

Sob esse aspecto se observa que quando monitorado o equipamento, ante de apresentar falhas graves e panes apresenta outras anomalias, muitas dessas detectáveis pela sua vibração e peça alteração da sua corrente elétrica, fazendo com que se estabeleçam parâmetros que dinamizem alertas e ações para a prestação de serviços de manutenção preventiva ou corretivas, porém de baixo valor quando compradas.

Em seguida, com efeito comparativo, na Tabela 5 apresenta-se a planilha de custos para a execução do serviço de troca de rolamentos, apresentando um valor de R\$ 616,56. Ação esta que tem por objetivo prolongar a vida útil do equipamento, como também garantir as manutenções obrigatórias, que em caso de falha ou pane podem chegar até o valor de R\$ 63.794,03 por compressor, conforme a Tabela 4.

Tabela 5 – Tabela de preços para a manutenção preventiva com substituição de rolamentos dos compressores do tipo parafuso do *Chiller* da sede da SUFRAMA do Contrato n° 22/2021 de Manutenção Predial

Item	Descrição	Und.	Quant.	Custo Unit.	Custo Total
1	Rolamento 6311 C3	un	2	R\$ 126,78	R\$ 253,56
2	Téc. Refrigeração	h	3	R\$ 95,59	R\$ 286,77
3	Artífice	h	3	R\$ 25,41	R\$ 76,23
				Total	R\$ 616,56

Fonte: Autoria própria.

Nesse sentido, apenas com o monitoramento, associado a metodologia proposta, é possível evitar um risco de um gasto não previsto, com uma ação planejada que representa aproximadamente 1% desse valor, aumentando a segurança e a confiabilidade na operação.

Apesar, da substituição do sistema de refrigeração *Chiller*, refrigerado a água, por outro mais moderno, o VRF, a utilização dos sensores ainda se mostra eficiente e compatível, uma vez que ainda há a necessidade de coleta de informações, agora configuradas para outros equipamentos e situações de campo. Mostrando a capacidade adaptativa do modelo,

que tem como fundamento o monitoramento BIM-IoT, mostrando-se vantajoso ao relacionar o custo-benefício no âmbito da manutenção predial.

## 5.6 Desafios e Oportunidades

### 5.6.1 Considerações quanto a qualificação dos profissionais: desafios e oportunidades

Mesmo que a disrupção tecnológica tenha alcançado diversas camadas profissionais, em tão pouco tempo, trazendo consigo diversas possibilidades entender melhor o comportamento de sistemas complexos e até mesmo o reconhecimento de padrões, muitas vezes imperceptíveis ao humano. Se observa que a interligação de sistemas físicos e digitais ainda é complexa para profissionais não familiarizados com a informática.

No caso de criação de gêmeos digitais, utilizando o BIM, denota-se que cabe ao profissional técnico interpretar o mundo físico e repassá-lo para o campo digital. Porém para que haja a interligação do mundo físico e virtual de modo a integrá-los, se faz necessário a utilização de atuadores e sensores, como objetos que coletam informações do ambiente para que posteriormente sejam modificadas e traduzidas ao ponto de facilitar ou até mesmo conduzir na tomada de decisões e de modo a torná-lo uma ferramenta melhor utilizada se faz necessário o conhecimento intermediário a avançado de linguagens de programação, criação de APIs.

Porém se observa que, para a aplicação desta tecnologia, o profissional deve ter, não só conhecimentos da área de redes, para a comunicação dos atuadores e sensores, comumente em linguagem C ou C++, como também conhecimentos *JavaScript* e outras linguagens necessárias para implementar ações no servidor e utilizar o alto poder computacional (TANG; SHELDEN, 2020). Fazendo com que haja uma lacuna para a utilização de tais ferramentas que possibilitam o melhor desenvolvimento do estudo.

O que antes era um sistema que deveria ser monitorado por vários técnicos, recurso humano valioso, do ponto de vista econômico e social, que dependendo da atividade, poderia estar exposto a diversos riscos, como choque elétrico, agora pode aderir a outras atividades, uma vez que sensores passariam a realizar esta tarefa.

### 5.6.2 Escalabilidade do sistema

Na seção anterior, se observou a eficiência na utilização de sensores para o monitoramento de sistemas e como isso pode ser um desafio para os profissionais, tendo em vista a diversidade de conhecimento integrado em uma solução, bem como, foi exposto também, como a aplicação desta tecnologia possibilita uma redução de custos, associada a uma otimização da manutenção.

Contudo, quando se analisa a quantidade de equipamentos, sensores e demais dispositivos e as múltiplas camadas de tecnologias envolvidas no processo, se constrói um grande desafio a ser solucionado a frente (TANG et al., 2019b). Sendo este motivo, mais especificamente, o fator chave que permite ainda mais impulsionar a utilização de sensores BIM-IoT e principalmente a sua escalabilidade.

Partido disso, há também a evolução de tecnologias de comunicação sem fio, como exemplo as redes *Wi-Fi*, *LoRa Wan*, e as redes móveis 3G/4G/5G, e as diferentes topologias e maneiras de se inter conectarem, tornado-se cada vez mais acessíveis aos novos dispositivos e possibilitando a conectividade de mais aparelhos e aumentando o alcance de suas redes, integrados plataformas e servidores em nuvem resultando em informações e soluções mais robustas e dinâmicas.

## 6 Conclusões

A pesquisa teve início no estudo de bibliografias referentes ao assunto, pesquisando-se inicialmente de modo individual os termos chaves da pesquisa que eram: BIM, sensores, microcontroladores e Internet das coisas. Para posteriormente pesquisar outros termos associados. Para que, no primeiro momento se buscasse uma definição mais aprofundada de conceitos e metodologias e, num segundo momento, fossem buscadas as práticas e pesquisas que envolvessem a integração das aplicações.

No mesmo sentido, o estudo buscou solucionar problemas no campo de gestão e manutenção predial, com o estudo de aplicações práticas com o desenvolvimento experimental de sensores conectados a rede de internet sem fio (IoT), que associados a uma plataforma web integram os conceitos de interoperabilidade da metodologia BIM e Internet das Coisas, monitorariam dados obtidos dos sensores para análises de falha dos equipamentos.

No aspecto amplo o modelo e a estrutura (*framework*) desenvolvida no presente estudo tem como norte a construção de uma plataforma BIM-IoT, vies para a criação de um modelo de monitoramento virtual, para em um primeiro momento possibilitar o monitoramento e a visualização do estado do sistema, com dados de temperatura, umidade, vibração, luminosidade, estado aberto-fechado, etc. E a posteriormente, em um segundo momento, que poderá ser abordado em outro estudo de modo mais complexo, que é o de fornecer observabilidade ao sistema, dando a este a capacidade de emitir alertas através de padrões definidos a partir dos dados coletados de modo automático.

Em suma, o presente estudo possibilitou, dentre diversos aspectos, no desenvolvimento e criação de um modelo para a análise dos equipamentos, bem como o monitoramento de ambientes. Seguido pela virtualização de parte da edificação, permitindo a visualização tridimensional dos ambientes e a localização dos equipamentos, bem como, o desenvolvimento de dispositivos IoT, com sensores e eletrônica embarcada, cujo aspecto principal foi a coleta e o envio de dados em tempo real.

Portanto, de modo sintético, o modelo referenciado possibilitou a construção uma plataforma virtual capaz de interagir com sensores IoT e servidores em nuvem, para o armazenamento de dados e informações da edificação. Proporcionando maior facilidade na identificação de possíveis anormalidades, através da leitura descentralizada e em tempo real de sensores capazes de coletar dados com temperatura, umidade, vibração de máquinas e verificação de corrente elétrica das instalações da SUFRAMA, possibilitariam no aumento de produtividade e otimização dos recursos de manutenção.

## 6.1 Contribuições da Pesquisa

### 6.1.1 Estrutura BIM-IoT

O desenvolvimento de um modelo ou de uma estrutura BIM-IoT, que configura desde um *dashboard* para visualização de séries temporais como também a mensuração para a detecção de anomalias, resultando na associação de diversas informações à edificação existente.

Com isso, o presente trabalho representa uma contribuição no sentido de demonstrar uma aplicação de campo, reforçando a ideia cíclica de colaboração e integração entre as mais diversas plataformas. Como também, foi observado que, para o contínuo funcionamento, a estrutura deve estar ativa, sendo atualizada sempre que necessário, tanto na camada de edição do *Revit*, atualizando as informações de campo, como obras e novos ativos, como também nas camadas digitais de hospedagem de nuvem e sensoriamento.

### 6.1.2 Conectividade física e digital

Como contribuição principal do estudo, destaca-se o desenvolvimento de um método (artefato) para a criação de uma estrutura (*framework*) que permite o monitoramento da edificação e seus equipamentos com o uso sensores, em tempo real, com a transmissão de dados, que quando integrados a uma plataforma de computação em nuvem, possibilitando um acesso mais simplificado dos dados, de forma integrada, aumento a eficiência na utilização dos recursos.

### 6.1.3 Colaboração para divulgação da Estratégia Nacional de Disseminação Building Information Modeling - BIM BR

Como contribuição secundária, há que se falar na promoção e divulgação da metodologia BIM, bem como a modelagem e virtualização de parte da instituição, para a visualização dos sensores, demonstrando as funcionalidades da modelagem pela metodologia BIM, por meio do software autoral da *Autodesk - Revit* e sua plataforma de visualização web (*Forge*).

### 6.1.4 Potencial para trabalhos futuros

#### 6.1.4.1 Integração BIM e IoT para a manutenção preditiva

Ainda existe um precipício na comunicação entre as plataformas, tendo como causa fundamental a dificuldade de comunicação entre elas e os componentes e dispositivos associados, como resultado disso, há uma complexidade para realizar a interoperabilidade de um sistema. Além disso, a diversidade de linguagens que envolvem a implementação de

*firmware* e *software* em dispositivos IoT e as plataformas de nuvem, para armazenamento de dados e modelagem BIM, carregam consigo diversas camadas de segurança e protocolos diferenciados de comunicação, o que contribui para complexidade na implantação de soluções BIM-IoT.

Assim, denota-se que, apesar das dificuldades observadas atualmente este é um campo de grande oportunidade, seja no campo de padronização das comunicações, linguagens e protocolos IoT, como também no desenvolvimento de hardware e software, integrando diversos dispositivos aos novos e diferentes sistemas, facilitando as aplicações computacionais e aquisição de informações e formação de conhecimento.

#### 6.1.4.2 Escalabilidade do modelo

As versões mais atuais de protocolos de internet, como o IPv6 e a utilização de 5G como rede móvel, tem possibilitado uma maior quantidade de dispositivos conectados, bem como, a difusão da rede *LoRa*, para comunicações de longo alcance, transformando sistemas inteiros em velocidade exponencial, escalando e padronizando serviços digitais, que quando agrupados permitem uma gama de equipamentos, das mais variadas formas.

Pelo mesmo motivo, as soluções de serviços hospedados em nuvem, cumprem um importante papel nessa evolução, mudando o conceito de processamento *in loco* para uma aplicação desenvolvida no meio digital, com processamento e armazenamento em nuvem, ampliando a capacidade colaborativa de diversos serviços.

Se por um lado, os avanços tecnológicos possibilitam uma maior oferta de equipamentos e sistemas, por outro, essa variação exponencial também tem provocado outros resultados inesperados. Como consequência, tem-se nesse cenário, uma maior diversidade de protocolos e outras características que dificultam a comunicação e a padronização de dados e informações, que conseqüentemente minam a escalabilidade de sistemas e tecnologias, principalmente quando se trata de plataformas interoperáveis.

Nesse sentido o presente estudo apresenta como espaço para trabalhos futuros a questão da operacionalização e desenvolvimento de formas mais simples para escalabilidade do modelo BIM-IoT, tendo em vista o potencial impacto positivo na manutenção predial.

#### 6.1.4.3 Novas tecnologias disruptivas

As novas plataformas computacionais tem se mostrado cada vez mais disruptivas, possibilitando a conexão de diversos dispositivos, com baixo custo, e associados a um baixo consumo de energia, sendo estes os pontos fortes dessas novas tecnologias.

Nesse sentido, se observa que, mesmo sem efeito direto sobre o tema, o crescimento da velocidade e do processamento computacional descentralizado tem impactos enormes na sociedade, com aspectos positivos e negativos, não se restringindo somente ao campo da

modelagem BIM e IoT, podendo resultar em inflexões na sociedade e em como interagimos no meio físico, cabendo a avaliação e o desenvolvimento responsável nesse campo.

## Referências

ALAVI, H. et al. Enhancing occupants' comfort through BIM-based probabilistic approach. *Automation in Construction*, v. 123, n. November 2020, 2021. ISSN 09265805. Citado na página 45.

ALTOHAMI, A. B. A. et al. Investigating Approaches of Integrating BIM, IoT, and Facility Management for Renovating Existing Buildings: A Review. *Sustainability*, v. 13, n. 7, p. 3930, apr 2021. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/7/3930>>. Citado 5 vezes nas páginas 23, 30, 31, 35 e 46.

ARSLAN, M.; RIAZ, Z.; MUNAWAR, S. Building Information Modeling (BIM) Enabled Facilities management using hadoop architecture. *PICMET 2017 - Portland International Conference on Management of Engineering and Technology: Technology Management for the Interconnected World, Proceedings*, v. 2017-Janua, p. 1–6, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 54.

BHUSARI, S. V.; WATTS, M. Building systems integration best practices: building automation systems (BAS) allow for state-of-the-art systems integration in nonresidential buildings. *Consulting - Specifying Engineer*, v. 52, n. 8, p. 4, sep 2015. Disponível em: <[gale.com/apps/doc/A432955057/AONE?u=capes&sid=bookmark-AONE&xid=9a](http://gale.com/apps/doc/A432955057/AONE?u=capes&sid=bookmark-AONE&xid=9a)>. Citado na página 33.

BIM Industry Working Group. *A report for the Government Construction Client Group Building Information Modelling (BIM) Working Party Strategy Paper*. [S.l.], 2011. 107 p. Disponível em: <<https://www.cdbb.cam.ac.uk/Resources/ResoucePublications/BISBIMstrategyReport.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.

BORHANI, A.; DOSSICK, C. S. Data Requirements for BIM-Based Asset Management from Owners' Perspective. In: *Construction Research Congress 2020*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. p. 478–487. ISBN 9780784482865. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784482865.051>>. Citado na página 27.

BOUABDALLAOUI, Y. et al. Predictive maintenance in building facilities: A machine learning-based approach. *Sensors (Switzerland)*, v. 21, n. 4, p. 1–15, 2021. ISSN 14248220. Citado na página 45.

BRASIL. *Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020*. Presidência da República Secretaria-Geral Subchefia para Assuntos Jurídicos, 2020. 5 p. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil/\\_03/\\_ato2019-2022/2020/decreto/D103](http://www.planalto.gov.br/ccivil/_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D103)>. Citado na página 27.

BRASIL. *Lei nº 14.303, de 21 de janeiro de 2022*. [S.l.], 2022. v. 00, 1–13 p. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil/\\_03/\\_ato2019-2022/2022/lei/L143](http://www.planalto.gov.br/ccivil/_03/_ato2019-2022/2022/lei/L143)>. Citado na página 23.

BRUNET, M. et al. Analysis of BIM use for asset management in three public organizations in Québec, Canada. *Built Environment Project and Asset Management*, v. 9, n. 1, p. 153–167, 2019. ISSN 20441258. Citado na página 21.

- CAESARENDRA, W. et al. An AWS machine learning-based indirect monitoring method for deburring in aerospace industries towards industry 4.0. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 8, n. 11, 2018. ISSN 20763417. Citado na página 69.
- CARNEIRO, J. et al. BIM, GIS, IoT, and AR/VR Integration for Smart Maintenance and Management of Road Networks: A Review. *2018 IEEE International Smart Cities Conference, ISC2 2018*, 2019. Citado na página 23.
- CASTRO, P. et al. The rise of serverless computing. *Communications of the ACM*, v. 62, n. 12, p. 44–54, 2019. ISSN 15577317. Citado na página 36.
- CHANG, K. M.; DZENG, R. J.; WU, Y. J. An automated IoT visualization BIM platform for decision support in facilities management. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 8, n. 7, 2018. ISSN 20763417. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.
- CHEN, W. et al. BIM-based framework for automatic scheduling of facility maintenance work orders. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 91, n. August 2017, p. 15–30, 2018. ISSN 09265805. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.007>>. Citado na página 30.
- CHENG, J. C. et al. Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 112, n. August 2018, p. 103087, 2020. ISSN 09265805. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103087>>. Citado na página 47.
- COSTIN, A.; EASTMAN, C. Need for Interoperability to Enable Seamless Information Exchanges in Smart and Sustainable Urban Systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 33, n. 3, p. 04019008, 2019. ISSN 0887-3801. Citado na página 21.
- DAHMANE, W. M. et al. A BIM-based framework for an Optimal WSN Deployment in Smart Building. *Proceedings of the 11th International Conference on Network of the Future, NoF 2020*, p. 110–114, 2020. Citado na página 40.
- DAIKIN. *Folheto técnico e catálogo de produtos*. 2022. 8 p. Disponível em: <<https://www.daikin.com.br/static/uploads/conteudos/produtos/220425055018000000.pdf>>. Citado na página 66.
- DANIOTTI, B. et al. *BIM-Based Collaborative Building Process Management*. Cham: Springer International Publishing, 2020. (Springer Tracts in Civil Engineering). ISBN 978-3-030-32888-7. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-32889-4>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- DESOGUS, G. et al. BIM and IoT Sensors Integration: A Framework for Consumption and Indoor Conditions Data Monitoring of Existing Buildings. *Sustainability*, v. 13, n. 8, p. 4496, apr 2021. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/8/4496>>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 27 e 46.
- DIBLEY, M. et al. An ontology framework for intelligent sensor-based building monitoring. *Automation in Construction*, Elsevier B.V., v. 28, p. 1–14, 2012. ISSN 09265805. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.018>>. Citado na página 32.
- EDIRISINGHE, R. et al. Building information modelling for facility management: Are we there yet? *Engineering, Construction and Architectural Management*, v. 24, n. 6, p. 1119–1154, 2017. ISSN 09699988. Citado na página 27.

- ESPRESSIF. *ESPRESSIF*. 2022. 1 p. Disponível em: <<https://www.espressif.com/>>. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 41.
- FONSECA, R. P.; PONTES, D. L. F.; SÁNCHEZ, J. M. M. Brutalismo Amazônico : a Obra De Severiano Mário Porto. *X Seminário DOCOMOMO Brasil - Arquitetura Moderna e Internacional: conexões brutalistas 1955-75*, p. 1–19, 2013. Citado na página 57.
- GAO, X.; PISHDAD-BOZORGI, P. BIM-enabled facilities operation and maintenance: A review. *Advanced Engineering Informatics*, v. 39, n. August 2018, p. 227–247, 2019. ISSN 14740346. Citado na página 31.
- GAO, X. et al. Internet of Things Enabled Data Acquisition Framework for Smart Building Applications. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 147, n. 2, p. 04020169, 2021. ISSN 0733-9364. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 33.
- HAUGHIAN, B. *Design, Launch, and Scale IoT Services A Practical Business Approach*. [S.l.: s.n.], 2018. ISBN 1-4842-3712-9. Citado na página 23.
- HAWKRIDGE, G. et al. Monitoring on a shoestring: Low cost solutions for digital manufacturing. *Annual Reviews in Control*, Elsevier Ltd, v. 51, n. December 2020, p. 374–391, 2021. ISSN 13675788. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.04.007>>. Citado na página 53.
- HAYAT, H. et al. The State-of-the-Art of Sensors and Environmental Monitoring Technologies in Buildings. 2019. Citado na página 36.
- HE, F.; YAN, Y.; YE, K. Reflection on Intelligent Construction Based on BIM: Take a Residential Building as an Example. In: *ICCREM 2020*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. p. 93–99. ISBN 9780784483237. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784483237.011>>. Citado na página 25.
- HILAL, M.; MAQSOOD, T.; ABDEKHODAEI, A. A hybrid conceptual model for BIM in FM. *Construction Innovation*, v. 19, n. 4, p. 531–549, 2019. ISSN 14770857. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 29.
- HITACHI. *Folder Comercial Hitachi Overhaul*. 2016. 1–2 p. Disponível em: <[https://www.jci-hitachi.com.br/static/site/files/Fol{\\\\_}Overhaul{\\\\_}OVH0400{\\\\_}>](https://www.jci-hitachi.com.br/static/site/files/Fol{\\_}Overhaul{\\_}OVH0400{\\_}>)>. Citado na página 75.
- HU, S. et al. Building performance optimisation: A hybrid architecture for the integration of contextual information and time-series data. *Automation in Construction*, Elsevier B.V., v. 70, p. 51–61, 2016. ISSN 09265805. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.018>>. Citado na página 45.
- HU, Z. Z. et al. BIM-based integrated delivery technologies for intelligent MEP management in the operation and maintenance phase. *Advances in Engineering Software*, Elsevier Ltd, v. 115, p. 1–16, 2018. ISSN 18735339. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.08.007>>. Citado na página 22.
- HUANG, M. Q.; NINIĆ, J.; ZHANG, Q. B. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 108, n. October 2020, 2021. ISSN 08867798. Citado na página 27.

- InvenSense Inc. *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification*. 2013. 53 p. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- ISMAIL, M. I. M.; DZIYAUDDIN, R. A.; SAMAD, N. A. A. Water pipeline monitoring system using vibration sensor. *IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSE)*, p. 79–84, 2014. Citado na página 42.
- JEREISSATI, G. et al. Análise do uso da metodologia BIM nos órgãos públicos do estado do Ceará/Brasil. *4<sup>o</sup> congresso português de ‘Building Information Modelling’ vol. 2 - ptBIM*, p. 210–220, 2022. Citado na página 74.
- KAVIANI, N.; KALININ, D.; MAXIMILIEN, M. Towards serverless as commodity: A case of Knative. *WOSC 2019 - Proceedings of the 2019 5th International Workshop on Serverless Computing, Part of Middleware 2019*, p. 13–18, 2019. Citado na página 35.
- KENSEK, K.; NOBLE, D. *Building Information Modeling: Bim in Current and Future Practice*. John Wiley. [S.l.: s.n.], 2005. ISBN 978-1118766309. Citado na página 45.
- KUMAR, B. *A Practical Guide to Adopting BIM in Construction Projects*. Whittles Publishing, 2015. 192 p. ISBN 9781849951463. Disponível em: <[www.whittlespublishing.com](http://www.whittlespublishing.com)>. Citado na página 28.
- LIN, Y.-C.; CHEUNG, W.-F. Developing WSN/BIM-Based Environmental Monitoring Management System for Parking Garages in Smart Cities. *Journal of Management in Engineering*, v. 36, n. 3, p. 04020012, 2020. ISSN 0742-597X. Citado na página 40.
- LU, Q. et al. Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus. *Journal of Management in Engineering*, v. 36, n. 3, p. 05020004, 2020. ISSN 0742-597X. Citado 3 vezes nas páginas 30, 34 e 45.
- MACHADO, F. A.; RUSCHEL, R. C. Soluções integrando BIM e Internet das Coisas no ciclo de vida da edificação: uma revisão crítica. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 9, n. 3, p. 240–258, 2018. ISSN 1980-6809. Citado na página 37.
- MACHADO, F. A.; RUSCHEL, R. C. Solutions Integrating Bim and Internet of Things in Building Life Cycle : a Critical Review. *PARC Research in Architecture and Building Construction*, v. 9, p. 204–222, 2018. Citado na página 23.
- MANNINO, A.; DEJACO, M. C.; RECECCONI, F. Building Information Modelling and Internet of Things Integration for Facility Management—Literature Review and Future Needs. *Applied Sciences*, v. 11, n. 7, p. 3062, mar 2021. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/7/3062>>. Citado na página 36.
- MARQUES, L. F. B. Manutenção preditiva de motores trifásicos de indução através da análise de assinatura de corrente e fluxo magnético. 2016. Disponível em: <<http://repositorio.unisc.br/jspui/handle/11624/1446>>. Citado 2 vezes nas páginas 67 e 76.
- MARWAN, W.; WIKLOM, T. Prototype Development and Performance Evaluation of ESP-WIFI-Mesh Sensor Networks for IoT. *Proceedings of Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform*, v. 2020, n. 2020, p. 63–64, 2021. Disponível em: <<https://ci.nii.ac.jp/naid/170000184479/en/>>. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 57.

- MATSUO, A. K. et al. Smart Plug Prototype for Residential Electrical Energy Monitoring. *2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan, ICCE-TW 2021*, p. 2021–2022, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 43.
- MENG, Q. et al. A review of integrated applications of BIM and related technologies in whole building life cycle. *Engineering, Construction and Architectural Management*, v. 27, n. 8, p. 1647–1677, 2020. ISSN 09699988. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 48.
- MORENO, J. V. et al. Dynamic Data Feeding into BIM for Facility Management: A Prototype Application to a University Building. *Buildings*, v. 12, n. 5, 2022. ISSN 20755309. Citado na página 48.
- MORETTI, N. et al. An openBIM Approach to IoT Integration with Incomplete As-Built Data. p. 1–17, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 48.
- MOTAMEDI, A.; HAMMAD, A.; ASEN, Y. Knowledge-assisted BIM-based visual analytics for failure root cause detection in facilities management. *Automation in Construction*, Elsevier B.V., v. 43, p. 73–83, 2014. ISSN 09265805. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.03.012>>. Citado na página 31.
- MUNIR, M. et al. BIM business value for asset owners through effective asset information management. *Facilities*, v. 38, n. 3-4, p. 181–200, 2019. ISSN 02632772. Citado na página 46.
- NATEPHRA, W.; MOTAMEDI, A. Live data visualization of IoT sensors using augmented reality (AR) and BIM. *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2019*, p. 632–638, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 52.
- NEVES, L. d. O. Arquitetura Bioclimática e a obra de Severiano Porto. p. 232, 2006. Citado na página 57.
- NGUYEN, H. T. Integration of BIM and IoT to improve the building performance for occupants' perspective. n. June, p. 84, 2016. ISSN 2222-6990. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/310481201>>. Citado 6 vezes nas páginas 23, 28, 34, 45, 46 e 55.
- NIBS, N. I. o. B. S. *National Building Information Modeling Standard - Part 1: Overview, Principles and Methodologies*. [S.l.], 2007. Version 1, n. Part 1, 182 p. Citado na página 26.
- NOOR, A. K. The Connected Life. *Mechanical Engineering*, v. 137, n. 09, p. 36–41, sep 2015. ISSN 0025-6501. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.2015-Sep-2>>. Citado na página 45.
- OZTURK, G. B. Interoperability in building information modeling for AECO/FM industry. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 113, n. December 2019, p. 103122, 2020. ISSN 09265805. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103122>>. Citado na página 29.
- PARISE, A. et al. Indoor Occupancy Prediction using an IoT Platform. *2019 6th International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security, IOTSMS 2019, IEEE*, p. 26–31, 2019. Citado na página 23.

SCHMITZ, T. L.; SMITH, K. S. *Mechanical Vibrations: Modeling and Measurement*. [S.l.: s.n.], 2012. 660 p. ISBN 978-3-030-52343-5. Citado na página 37.

SCHWAB, K. *A quarta revolução industrial*. São Paulo: [s.n.], 2016. ISSN 978-8572839785. ISBN 857283978X. Disponível em: <[www.weforum.org](http://www.weforum.org)>. Citado 3 vezes nas páginas 22, 30 e 35.

SEPASGOZAR, S. M. et al. Lean practices using building information modeling (Bim) and digital twinning for sustainable construction. *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 1, p. 1–22, 2021. ISSN 20711050. Citado na página 25.

SHEN, W.; HAO, Q.; XUE, Y. A loosely coupled system integration approach for decision support in facility management and maintenance. *Automation in Construction*, Elsevier B.V., v. 25, p. 41–48, 2012. ISSN 09265805. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.04.003>>. Citado na página 30.

SUSANTO, M. et al. Prototype of Sensor Node for Low-Cost Machine Vibration Monitoring System Using Accelerometer Sensor. *2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite, Comnetsat 2020 - Proceedings*, p. 222–226, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 22, 37, 45 e 50.

TAN, T. et al. Combining multi-criteria decision making (MCDM) methods with building information modelling (BIM): A review. *Automation in Construction*, v. 121, n. September 2020, 2021. ISSN 09265805. Citado na página 45.

TANG, S.; SHELDEN, D. R. A Framework Utilizing Modern Data Models with IFC for Building Automation System Applications. In: *Construction Research Congress 2020*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. p. 11–19. ISBN 9780784482865. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784482865.002>>. Citado na página 77.

TANG, S. et al. A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 101, n. June 2018, p. 127–139, 2019. ISSN 09265805. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020>>. Citado 4 vezes nas páginas 23, 31, 32 e 54.

TANG, S. et al. A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Automation in Construction*, v. 101, n. January, p. 127–139, 2019. ISSN 09265805. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 78.

TATIYA, M. Advanced capabilities are being incorporated into EAM systems. *Plant Engineering - Enterprise Asset Management*, n. September, p. 14–16, sep 2020. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 29.

TOSCHKE, Y. et al. Distributed LoRa based CO2 monitoring network – A standalone open source system for contagion prevention by controlled ventilation. *HardwareX*, Elsevier B.V., v. 11, p. e00261, 2022. ISSN 24680672. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00261>>. Citado na página 38.

- VALINEJADSHOUBI, M. et al. Development of an IoT and BIM-based automated alert system for thermal comfort monitoring in buildings. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier B.V., v. 66, n. November 2020, p. 102602, 2021. ISSN 22106707. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102602>>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 45.
- VARANIS, M.; SILVA, A. L.; MERELES, A. G. On mechanical vibration analysis of a multi degree of freedom system based on arduino and MEMS accelerometers. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 40, n. 1, p. e1304, 2018. ISSN 01024744. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 42.
- VILLA, V. et al. Machine Learning Framework for the Sustainable Maintenance of Building Facilities. *Sustainability (Switzerland)*, v. 14, n. 2, p. 1–17, 2022. ISSN 20711050. Citado 3 vezes nas páginas 37, 48 e 53.
- WEEKS, D. J.; LEITE, F. Facility Defect and Cost Reduction by Incorporating Maintainability Knowledge Transfer Using Maintenance Management System Data. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 35, n. 2, p. 04021004, 2021. ISSN 0887-3828. Citado na página 28.
- WONG, J. K. W.; GE, J.; HE, S. X. Digitisation in facilities management: A literature review and future research directions. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 92, n. March, p. 312–326, 2018. ISSN 09265805. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.006>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 28.
- WURFEL, M. M. Temperature and humidity module: DHT11 product manual. *Aosong Guangzhou Electronics Co., Ltd*, p. 1–9, 2018. Disponível em: <[www.aosong.com](http://www.aosong.com)>. Citado na página 43.
- XU, Y. et al. Digital Twin Concept in Managing Industrial Capital Construction Projects Life Cycle. *Proceedings of 2018 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development", MLSD 2018*, IEEE, p. 1–3, 2018. Citado na página 22.
- YHDC. *Product Specification SCT-013-000*. [S.l.], 2015. v. 22, 2015 p. Disponível em: <[http://www.yhdc.us/ENpdf/SCT013-000-0-100A-0-50mA{\\\_}en.](http://www.yhdc.us/ENpdf/SCT013-000-0-100A-0-50mA{\_}en.)> Citado na página 44.
- YU, G. et al. RIOMS: An intelligent system for operation and maintenance of urban roads using spatio-temporal data in smart cities. *Future Generation Computer Systems*, Elsevier B.V., v. 115, p. 583–609, 2021. ISSN 0167739X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.future.2020.09.010>>. Citado na página 23.
- ZHANG, S. et al. Wireless Monitoring–Based Real-Time Analysis and Early-Warning Safety System for Deep and Large Underground Caverns. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, American Society of Civil Engineers, v. 35, n. 2, p. 04020147, apr 2021. ISSN 0887-3828. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001534](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001534)>. Citado na página 45.