

Monitorização e Análise Operacional de uma Farmácia através de um Digital Twin

GONÇALO FARIA PEREIRA

Junho de 2026

**Monitorização e Análise Operacional de uma Farmácia
através de um Digital Twin**

Gonçalo Faria Pereira

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Gonçalo Faria Pereira, Nº 1201343, 1201343@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professor Doutor Luís Pinto Ferreira, lpf@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

2026

Agradecimentos

À proprietária da farmácia, agradeço a disponibilização da planta do edifício, que permitiu dar o pontapé inicial na componente prática deste trabalho. A sua colaboração foi essencial para que o projeto pudesse avançar com uma base sólida e realista.

Ao meu orientador, Professor Doutor Luís Pinto Ferreira, agradeço a oportunidade de desenvolver esta dissertação sob a sua orientação e todo o tempo que generosamente dedicou ao acompanhamento do trabalho. A sua experiência e disponibilidade foram determinantes ao longo de todo o percurso.

Ao Engenheiro Francisco, agradeço a coorientação prestada, que em muito contribuiu para o arranque do trabalho. As suas indicações iniciais foram fundamentais para definir o rumo certo desde o início.

À minha família, à minha namorada e aos amigos mais próximos, agradeço todo o companheirismo e apoio incondicional. Neste tipo de projetos, as pessoas que nos rodeiam tornam-se tão importantes quanto o trabalho em si, e sem elas este caminho teria sido bem mais difícil.

Resumo

A gestão de edifícios de saúde apresenta desafios crescentes de complexidade operacional, eficiência energética e sustentabilidade, sendo as infraestruturas hospitalares responsáveis por cerca de 4,4% das emissões globais de gases com efeito de estufa. O conceito de *Digital Twin* (DT) — representação virtual dinâmica de um sistema físico — surge como uma ferramenta promissora, ao permitir a contextualização espacial de dados operacionais num modelo tridimensional do edifício.

A presente dissertação tem como objetivo desenvolver e avaliar um modelo de *Digital Twin* orientado para a gestão de espaços numa farmácia, através de: (i) modelação de uma unidade funcional em ambiente BIM (Revit) e integração na plataforma Autodesk Tandem; (ii) integração de dados representativos das condições operacionais; e (iii) avaliação dos benefícios do DT nas dimensões de eficiência operacional, manutenção, sustentabilidade e apoio à decisão.

A metodologia seguiu uma abordagem de caso de estudo aplicada a uma farmácia de pequena dimensão, suportada por uma arquitetura modular com três componentes: o modelo BIM em Revit, a plataforma Tandem como camada de integração e visualização, e um gerador de dados sintéticos em Python que simula o comportamento de sensores IoT.

Foram definidos e implementados três cenários de demonstração: (1) impacto térmico de um evento físico (abertura de porta), (2) deteção de ineficiência energética (HVAC em funcionamento desnecessário) e (3) degradação progressiva de um equipamento de refrigeração. Para cada cenário, estabeleceram-se thresholds e uma classificação de estados (normal, alerta, crítico), permitindo a identificação automática de anomalias e a sua visualização espacial.

Os três cenários foram reproduzidos com sucesso na plataforma Tandem, com transições de estado claramente visíveis e contextualizadas espacialmente. A principal vantagem identificada reside na capacidade do DT de associar cada indicador ao compartimento, piso ou equipamento correspondente, superando as limitações dos dashboards convencionais.

As principais limitações incluem o uso de dados sintéticos e a ausência de capacidade nativa de simulação ou predição no Tandem; ainda assim, a arquitetura modular permite substituir o gerador por fontes reais (sensores IoT, BMS, CMMS) sem alterações estruturais.

Em suma, demonstrou-se a viabilidade técnica e o potencial operacional da integração BIM–*Digital Twin* para a gestão inteligente de espaços numa farmácia. Como trabalho futuro, propõe-se a integração de sensores IoT reais, o acoplamento com motores de simulação energética (e.g., EnergyPlus), a aplicação de machine learning para manutenção preditiva e a extensão a outras áreas funcionais e sistemas de gestão hospitalar.

Palavras-Chave

Digital Twin, BIM, Gestão de Espaços, Farmácia, Autodesk Tandem, Revit, IoT, Monitorização em Tempo Real, Eficiência Energética, Sustentabilidade, Manutenção Preditiva

Abstract

The management of healthcare buildings presents growing challenges in operational complexity, energy efficiency, and sustainability, with hospital infrastructures accounting for approximately 4.4% of global greenhouse gas emissions. The Digital Twin (DT) concept — a dynamic virtual representation of a physical system — emerges as a promising tool, enabling the spatial contextualization of operational data within a three-dimensional building model.

This dissertation aims to develop and evaluate a Digital Twin model for pharmacy space management through: (i) modeling a functional pharmacy in a BIM environment (Revit) and integrating it into the Autodesk Tandem platform; (ii) integrating data representative of operational conditions; and (iii) evaluating the benefits of the DT in terms of operational efficiency, maintenance, sustainability, and decision support.

The methodology followed a case study approach applied to a small pharmacy, supported by a modular architecture with three components: the BIM model developed in Revit, the Tandem platform as the integration and visualization layer, and a synthetic data generator developed in Python simulating IoT sensor behavior.

Three demonstration scenarios were defined and implemented: (1) the thermal impact of a physical event (door opening), (2) the detection of energy inefficiency (HVAC running unnecessarily), and (3) the progressive degradation of refrigeration equipment. For each scenario, thresholds and a state classification (normal, alert, critical) were established, enabling automatic anomaly identification and spatial visualization.

All three scenarios were successfully reproduced on the Tandem platform, with state transitions clearly visible and spatially contextualized. The primary advantage identified lies in the DT's ability to associate each indicator with the corresponding room, floor, or equipment, surpassing the limitations of conventional dashboards.

The main limitations include the use of synthetic data and the absence of native simulation or prediction capabilities in Tandem; nevertheless, the modular architecture allows the generator to be replaced by real sources (IoT sensors, BMS, CMMS) without structural changes.

In summary, this work demonstrated the technical feasibility and operational potential of BIM–Digital Twin integration for the intelligent management of pharmacy spaces. Future work includes the integration of real IoT sensors, coupling with energy simulation engines (e.g., EnergyPlus), the application of machine learning for predictive maintenance, and extension to other functional areas and hospital management systems.

Keywords

Digital Twin, BIM, Space Management, Pharmacy, Autodesk Tandem, Revit, IoT, Real-Time Monitoring, Energy Efficiency, Sustainability, Predictive Maintenance

(Página deixada em branco de forma intencional)

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIII
ACRÓNIMOS	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO DO TRABALHO.....	1
1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	3
1.3 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	4
1.4 APRESENTAÇÃO DA FARMÁCIA	6
1.5 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	7
2. FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA.....	8
2.1 GESTÃO DE ESPAÇOS EM FARMÁCIA	8
2.1.1 CONCEITOS DE PLANEAMENTO E GESTÃO DE ESPAÇOS	9
2.1.2 CRITÉRIOS DE EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE	10
2.1.3 PRÁTICAS E TECNOLOGIAS ATUAIS (BIM, CAFM, IoT).....	12
2.2 DIGITAL TWINS.....	14
2.2.1 CONCEITO	14
2.2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA	15
2.2.3 TIPOS DE DIGITAL TWIN	17
2.2.4 TECNOLOGIAS HABILITADORAS	19
2.2.5 BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES	21
2.3 APLICAÇÕES DE DIGITAL TWIN EM SAÚDE	22
2.4 PANORAMA CIENTÍFICO DOS DT EM CONTEXTO HOSPITALAR.....	27
2.5 ENQUADRAMENTO LEGAL E NORMATIVO	32
3. CONCEÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO DIGITAL TWIN	35
3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO PRÁTICA	35
3.2 MODELAÇÃO BIM (REVIT)	36
3.2.1 BASE DE MODELAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO	36
3.2.2 DEFINIÇÃO DE AMBIENTES (ZONAS FUNCIONAIS)	38
3.2.3 ORGANIZAÇÃO ESPACIAL E FUNCIONAL.....	39
3.2.4 PREPARAÇÃO DO MODELO PARA INTEGRAÇÃO NO DT	40
3.3 CONCEÇÃO DO DIGITAL TWIN (TANDEM)	41
3.3.1 INTEGRAÇÃO DO MODELO E ESTRUTURAÇÃO DOS ATIVOS	41

3.3.2 ESTRUTURAÇÃO DOS ATIVOS E PARÂMETROS	42
3.3.3 LIGAÇÕES E MAPEAMENTO DOS DADOS	43
3.4 ARQUITETURA DO SISTEMA.....	45
4. GERAÇÃO DE DADOS, CENÁRIOS E RESULTADOS	49
4.1 LIMITAÇÕES E ABORDAGEM ADOTADA	49
4.2 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS.....	51
4.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS CENÁRIOS E GERAÇÃO DE DADOS.....	53
4.3.1 ESTRUTURA DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE DADOS.....	54
4.3.2 DEFINIÇÃO DOS <i>THRESHOLDS</i> E CLASSIFICAÇÃO DE ESTADOS	56
4.3.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS CENÁRIOS DE DEMONSTRAÇÃO.....	58
4.4 RESULTADOS E ANÁLISE	60
4.4.1 CENÁRIO 1 – IMPACTO DE EVENTO FÍSICO	61
4.4.2 CENÁRIO 2 – INEFICIÊNCIA ENERGÉTICA	63
4.4.3 CENÁRIO 3 – FALHA DE SISTEMA E MANUTENÇÃO	65
4.5 DISCUSSÃO E APOIO À DECISÃO	67
5. CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS.....	74

Índice de Figuras

Figura 1- Arquitetura Típica de um DT (Jones et al., 2020)	15
Figura 2- <i>Timeline</i> da evolução da definição de <i>Digital Twin</i> (Agnusdei et al., 2021)	17
Figura 3 - Níveis de integração de dados (Kritzinger et al., 2018)	17
Figura 4 - Progressão do número de publicações em função da combinação de <i>Keywords</i>	29
Figura 5 - Número de publicações por ano	29
Figura 6- Países com documentos publicados	30
Figura 7- Top10 países com mais documentos publicados	30
Figura 8- Percentagem de documentos por tipo	31
Figura 9 - Percentagem de documentos por área científica	32
Figura 10 - Planta da farmácia utilizada como base para a modelação no Revit	37
Figura 11 - Vista de cima do modelo tridimensional da farmácia desenvolvido no Revit	37
Figura 12 - Modelo Tridimensional da farmácia desenvolvido no Revit	38
Figura 13 - Definição dos ambientes correspondentes às diferentes zonas funcionais da farmácia	39
Figura 14 - Organização espacial e relação funcional entre as diferentes áreas da farmácia	40
Figura 15 - Modelo da farmácia após importação para o Autodesk Tandem	42
Figura 16 - Definição dos parâmetros associados aos ativos no Tandem	43

Figura 17 - Listagem das <i>connections</i> criadas para envio de dados	44
Figura 18 - Mapeamento de elementos do JSON aos parâmetros do Tandem	44
Figura 19 - Arquitetura proposta do sistema	46
Figura 20 - Arquitetura de possíveis integrações futuras	47
Figura 21 - Definição de thresholds no Tandem	57
Figura 22 - Temperaturas iniciais do Cenário 1	61
Figura 23 - Etapa Alerta do Cenário 1	62
Figura 24 - Evolução da Etapa Alerta do Cenário 1	62
Figura 25 - Etapa Crítica do Cenário 1	63
Figura 26 - Estado inicial do Cenário 2	64
Figura 27 - Identificação de ineficiência energética no Cenário 2	64
Figura 28 - Estado inicial do Cenário 3 no <i>backoffice</i>	65
Figura 29 - Estado de alerta no frigorífico 1	66
Figura 30 - Estado crítico e necessidade de intervenção no Cenário 3	66

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Diferentes definições de <i>Digital Twin</i>	14
Tabela 2 - Aplicações de <i>Digital Twin</i> em Saúde	22
Tabela 3 - Definição de cenários	53
Tabela 4 - Definição de <i>thresholds</i>	56

Acrónimos

AC	–	Ar Condicionado
BIM	–	Building Information Modeling
BMS	–	Building Management System
CAFM	–	Computer-Aided Facility Management
CMMS	–	Computerized Maintenance Management System
CSV	–	Comma-Separated Values
DES	–	Discrete Event Simulation
DT	–	Digital Twin
EHR	–	Electronic Health Record
FM	–	Facility Management
HTTP	–	Hypertext Transfer Protocol
HVAC	–	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
IA	–	Inteligência Artificial
IFC	–	Industry Foundation Classes
IoT	–	Internet of Things
JSON	–	JavaScript Object Notation
KPI	–	Key Performance Indicator
O&M	–	Operations & Management
PLM	–	Product Lifecycle Management
UCI	–	Unidade Cuidados Intensivos

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma visão introdutória do tema em estudo, definindo o seu enquadramento, os objetivos a alcançar, a metodologia adotada ao longo do trabalho e a estrutura que orienta a sua organização.

1.1 ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

A crescente complexidade das infraestruturas de saúde torna a gestão eficiente dos espaços um desafio central para garantir custos controlados, segurança operacional, conforto dos utilizadores e sustentabilidade ambiental. A configuração física das unidades de cuidados, a organização dos fluxos de pacientes, profissionais e equipamentos, bem como a capacidade de reajustar *layouts* perante necessidades clínicas variáveis, influenciam diretamente o desempenho global das instalações de saúde (Bayraktar Sari &

Jabi, 2024). Estes edifícios funcionam de forma contínua e dependem de sistemas especializados, como climatização, redes de gases medicinais e iluminação técnica, que aumentam significativamente o consumo energético. Estudos internacionais revelam que o setor da saúde representa cerca de 4,4% das emissões nacionais de gases com efeito de estufa, com valores per capita particularmente elevados nos Estados Unidos, Canadá, Austrália e Suíça. Verifica-se ainda que o gasto elétrico hospitalar não acompanha linearmente a ocupação, sendo fortemente condicionado por fatores externos, como a temperatura ambiente, o que demonstra a complexidade operacional destes ambientes (Liu et al., 2022).

Para além das questões ambientais, as farmácias enfrentam pressões de natureza económica e organizacional. Melhorar a afetação do espaço, reduzir movimentos desnecessários e melhorar os fluxos logísticos exige ferramentas que suportem análises detalhadas e decisões fundamentadas. (Lavy & Shohet, 2004) destacam que um desempenho eficaz das infraestruturas de saúde depende de uma coordenação consistente entre a operação diária, as atividades de manutenção e o planeamento estratégico de longo prazo, permitindo gerir o edifício ao longo do seu ciclo de vida de forma mais racional. Contudo, muitas organizações de saúde continuam a recorrer a metodologias fragmentadas e a modelos estáticos, que dificultam a antecipação de necessidades e limitam a capacidade de resposta a situações imprevistas.

Neste contexto, têm emergido soluções digitais que visam fornecer uma visão contínua e integrada do funcionamento das infraestruturas. Estas ferramentas procuram consolidar dados operacionais, monitorizar sistemas técnicos e permitir a análise de cenários alternativos, oferecendo suporte a decisões mais informadas. Entre estas abordagens, destaca-se o crescente interesse por modelos digitais adaptativos que representem de forma fiel o comportamento real do edifício. Uma dessas abordagens, que constitui a base deste trabalho, é o *Digital Twin*, entendido como uma representação virtual dinâmica de um sistema físico complexo, alimentada por dados históricos e em tempo real e apoiada em capacidades de simulação, permitindo aplicações como previsão, otimização e acompanhamento contínuo (Rasheed et al., 2019).

Assim, o presente estudo parte dos desafios atuais associados à gestão de espaços hospitalares e da evolução das ferramentas digitais aplicadas ao setor, propondo explorar o contributo que uma representação digital integrada pode oferecer para melhorar a eficiência operacional, melhorar o uso dos espaços e reforçar a sustentabilidade energética nas infraestruturas de saúde.

O trabalho aqui apresentado enquadra-se no âmbito da unidade curricular de Tese/Dissertação (TEDI) do Curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, no ramo de Sistemas e Planeamento Industrial.

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento e a avaliação de um modelo de DT aplicado à gestão de espaços de uma farmácia. Pretende-se explorar o potencial desta tecnologia para representar virtualmente as infraestruturas físicas de uma farmácia, permitindo a monitorização, análise e otimização das suas operações. Através da integração de dados em tempo real e da simulação de diferentes cenários, procura-se criar uma ferramenta de apoio à decisão que contribua para uma gestão mais eficiente, sustentável e segura do ambiente.

De forma mais específica, o trabalho visa, numa primeira fase, mapear e modelar digitalmente a farmácia, ou uma área específica da mesma, recorrendo a ferramentas de modelação, tais como Autodesk Tandem e Revit, e a dados arquitetónicos disponíveis. Esta modelação constitui a base para a criação do DT, possibilitando uma representação rigorosa da estrutura física e funcional do espaço. Posteriormente, será realizada a integração de dados reais e simulados, provenientes de sensores, sistemas de gestão ou fontes artificiais, de modo a alimentar o modelo digital com informação dinâmica sobre o estado e utilização das instalações.

Com base neste modelo integrado, pretende-se avaliar os benefícios da aplicação de DT na gestão hospitalar, nomeadamente nas seguintes dimensões:

- Eficiência operacional, através da otimização da ocupação dos espaços e da gestão dos fluxos de pessoas e equipamentos;
- Manutenção e monitorização, pela identificação precoce de falhas e necessidades de intervenção;
- Sustentabilidade, mediante a análise de consumos energéticos e ambientais;
- Tomada de decisão, através da simulação de cenários e avaliação de impactos antes da implementação de alterações reais.

Com base nestes objetivos, estabelecem-se ainda as seguintes questões de investigação, que orientam o desenvolvimento do trabalho e a avaliação do modelo proposto:

- 1) Como os *Digital Twins* podem melhorar a gestão e utilização dos espaços de saúde?
- 2) Que indicadores devem ser monitorizados em tempo real para apoiar a decisão?

Assim, este trabalho procura demonstrar como a utilização de *Digital Twins* pode transformar a forma como estes espaços são geridos, promovendo uma abordagem mais inteligente, integrada e baseada em dados. No final, espera-se não apenas validar a aplicabilidade do modelo proposto, mas também gerar conhecimento que possa servir de base para futuras implementações em contextos hospitalares/clínicos reais.

1.3 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

A metodologia de investigação escolhida para a elaboração desta dissertação foi o Caso de Estudo, justificando-se esta escolha pela complexidade inerente à gestão de espaços hospitalares e pela necessidade de compreender em profundidade as interações entre os sistemas físicos e digitais envolvidos na criação de um DT. A metodologia de caso de estudo constitui uma abordagem que permite aos investigadores estudar fenómenos complexos nos seus contextos reais, recorrendo a uma variedade de fontes e métodos de recolha de dados. Trata-se de uma metodologia particularmente valiosa nas áreas da saúde e ciências

sociais, estudos ambientais, serviço social, educação e gestão, uma vez que contribui para o avanço teórico, a avaliação de programas e o desenvolvimento de intervenções (de Vries, 2020).

De acordo com a literatura, um caso de estudo procura compreender fenómenos complexos no seu contexto real, permitindo uma análise aprofundada e multidimensional da situação em estudo. Tal como referido por (Johansson, 2007), “um caso de estudo deve captar a complexidade de um único caso, o qual deve constituir uma unidade funcional, ser investigado no seu contexto natural através de uma multiplicidade de métodos e situar-se num período contemporâneo”. Esta perspetiva reforça a adequação da metodologia ao presente trabalho, centrado na análise e desenvolvimento de um modelo de DT num ambiente hospitalar real.

De acordo com (Crowe et al., 2011), a condução de um caso de estudo segue cinco etapas principais que orientam o processo de investigação e garantem a coerência metodológica. Estas etapas permitem compreender o fenómeno em profundidade e assegurar uma análise rigorosa e contextualizada.

1. Definição do caso - nesta fase, é necessário delimitar claramente a unidade de análise e o fenómeno a estudar, estabelecendo o foco da investigação. O caso pode corresponder a uma instituição, um serviço, um processo ou um conjunto de práticas, devendo ser suficientemente delimitado para permitir uma análise detalhada.
2. Seleção do caso - após definida a unidade de estudo, procede-se à escolha do contexto específico e à definição das fontes de dados mais adequadas. Estas podem incluir observações diretas, entrevistas, documentos institucionais, registos operacionais ou dados provenientes de sistemas digitais e sensores.
3. Recolha de dados - esta etapa envolve a recolha sistemática da informação necessária para compreender o caso em profundidade. A diversidade de fontes permite realizar uma triangulação de dados, reforçando a validade e a credibilidade dos resultados obtidos.

4. Análise dos dados - nesta fase, procede-se ao tratamento e interpretação da informação recolhida, identificando padrões, relações e significados relevantes. A análise pode incluir abordagens qualitativas e quantitativas, consoante a natureza dos dados e os objetivos do estudo.
5. Apresentação e interpretação dos resultados - por fim, os resultados são organizados, apresentados e discutidos, de forma a evidenciar as principais conclusões e contributos do estudo. Esta etapa inclui também a reflexão sobre as limitações do trabalho e as implicações práticas e teóricas das conclusões alcançadas.

1.4 APRESENTAÇÃO DA FARMÁCIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi utilizada como caso de estudo uma farmácia localizada na cidade do Porto, escolhida por representar uma unidade farmacêutica de pequena dimensão com características adequadas à demonstração da metodologia proposta. A seleção deste espaço permitiu trabalhar sobre um ambiente real, com organização funcional definida e necessidades operacionais concretas, facilitando a aplicação prática dos conceitos de modelação BIM e *Digital Twin* no contexto da gestão hospitalar e farmacêutica.

Apesar da sua dimensão reduzida, a farmácia apresenta uma estrutura funcional suficientemente completa para permitir a análise de diferentes cenários operacionais, incluindo áreas de atendimento ao público, espaços de circulação interna, áreas técnicas e ligações ao exterior. Esta diversidade espacial torna possível a monitorização de diferentes parâmetros ambientais e energéticos, bem como a simulação de situações relacionadas com conforto térmico, eficiência energética e falhas de equipamentos críticos, constituindo assim uma base adequada para a validação da solução desenvolvida ao longo da dissertação.

1.5 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente capítulo introduz o tema, estabelecendo o enquadramento do trabalho, os objetivos e a metodologia adotada, e apresenta a unidade hospitalar que serve de caso de estudo.

A fundamentação teórica é desenvolvida no capítulo 2, que revê os conceitos de gestão de espaços hospitalares, define e tipifica os *Digital Twins*, mapeia as suas aplicações em contexto de saúde e enquadra o tema do ponto de vista legal e normativo.

O capítulo 3 constitui a base prática da dissertação. Descreve a modelação BIM da farmácia hospitalar em Autodesk Revit, a criação do *Digital Twin* na plataforma Autodesk Tandem, incluindo a parametrização e o mapeamento de dados, e a arquitetura global que integra estas componentes com o sistema externo de geração de dados.

O capítulo 4 aborda a geração de dados e a validação do sistema através de três cenários de demonstração — impacto térmico, ineficiência energética e falha de equipamentos de refrigeração. Após descrever o sistema de simulação desenvolvido em *Python*, são analisados os resultados obtidos na plataforma Tandem e discutido o contributo da solução para a melhoria da gestão hospitalar.

Por fim, o capítulo 5 sintetiza as conclusões, avalia o cumprimento dos objetivos definidos e identifica perspetivas de desenvolvimento futuro, nomeadamente a integração com sensores IoT reais e motores de simulação energética.

.

2. FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA

2.1 GESTÃO DE ESPAÇOS EM FARMÁCIA

O planeamento e gestão de espaços de farmácias assentam em vários conceitos centrais que, em conjunto, definem como o espaço é dimensionado, organizado e utilizado ao longo do tempo. A secção que se segue sintetiza os conceitos mais relevantes na literatura e apresenta as suas implicações práticas.

2.1.1 CONCEITOS DE PLANEAMENTO E GESTÃO DE ESPAÇOS

O planeamento e a gestão de espaços de farmácia assumem um papel central na eficiência operacional e na qualidade dos cuidados de saúde. A disposição física das áreas, a organização funcional dos fluxos de pacientes, profissionais e equipamentos, bem como a capacidade de adaptação a diferentes contextos clínicos, são fatores determinantes para o desempenho global da infraestrutura (Bayraktar Sari & Jabi, 2024). Estes espaços devem responder simultaneamente a exigências clínicas, logísticas e de conforto, integrando princípios de flexibilidade e modularidade que permitam a rápida adaptação a novas tecnologias ou surtos de procura, como ficou evidenciado durante a pandemia de COVID-19.

O planeamento espacial hospitalar tem como objetivo melhorar a utilização do espaço, assegurando uma relação equilibrada entre áreas assistenciais, técnicas e de apoio. Para tal, são frequentemente utilizados modelos de análise de fluxos e de capacidade que permitem avaliar o desempenho funcional das unidades. Estes modelos apoiam decisões como a localização de serviços, a distância entre departamentos críticos (por exemplo, bloco operatório e UCI) e a gestão de corredores e zonas comuns. Por exemplo, estudos como o de (Vahdat et al., 2019) evidenciam que, através de simulação baseada em dados e otimização de layout, é possível melhorar a eficiência da circulação e a experiência do paciente.

De forma complementar, a gestão de espaços foca-se na monitorização e manutenção contínua das áreas existentes, procurando alinhar as necessidades operacionais com os recursos disponíveis e as restrições normativas. Segundo (Lavy & Shohet, 2004) a gestão eficiente das infraestruturas hospitalares depende da integração entre operação, manutenção e planeamento estratégico, numa abordagem que maximize o desempenho ao longo do ciclo de vida do edifício.

A integração entre planeamento e gestão é, portanto, fundamental para garantir a coerência entre a conceção inicial e a utilização real das infraestruturas. Enquanto o planeamento define o potencial funcional e organizacional dos espaços, a gestão assegura a sua performance contínua. Neste contexto, o *facility management* (FM) surge como

disciplina estruturante, articulando a operação diária com a estratégia de longo prazo e permitindo uma utilização mais racional dos ativos disponíveis. Tal como referido por (Alfahmi et al., 2023) a aplicação de modelos de gestão baseados em indicadores de desempenho e monitorização contínua tem-se revelado essencial para melhorar a capacidade hospitalar e melhorar a experiência do paciente.

Nos últimos anos, o suporte digital a estas atividades tem-se tornado cada vez mais relevante. Ferramentas como o *Building Information Modeling* (BIM) e sistemas CAFM (*Computer-Aided Facility Management*) permitem representar digitalmente os espaços, os seus elementos construtivos e sistemas técnicos, facilitando o planeamento de intervenções e o controlo de manutenção. Embora o BIM ainda seja maioritariamente utilizado na fase de projeto e construção, a sua integração com processos de gestão de instalações tem vindo a crescer, servindo de base para soluções mais avançadas de monitorização e otimização do ambiente hospitalar (Turgay et al., 2023).

Em suma, o planeamento e a gestão de espaços em farmácias constituem áreas interdependentes que combinam princípios de organização funcional, eficiência operacional e suporte digital. Esta base conceptual é essencial para compreender as transformações em curso nas infraestruturas de saúde, que evoluem de sistemas estáticos para ecossistemas inteligentes, preparados para a análise contínua e a tomada de decisão informada.

2.1.2 CRITÉRIOS DE EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE

A eficiência e a sustentabilidade têm vindo a assumir um papel cada vez mais relevante na gestão das infraestruturas de saúde, especialmente num contexto de pressão crescente sobre os recursos e de exigências ambientais mais rigorosas.

Unidades de saúde, na sua maioria, são edifícios de elevada complexidade técnica e grande intensidade energética, representando um dos principais desafios na implementação de políticas sustentáveis no setor público e privado. A nível global, o setor da saúde é responsável, em média, por cerca de 4,4% das emissões nacionais de gases com efeito de estufa, com os maiores valores per capita observados nos Estados Unidos, Canadá,

Austrália e Suíça. No caso dos hospitais, o consumo de eletricidade revela-se pouco dependente do nível de ocupação, sendo, no entanto, fortemente influenciado por fatores externos, como a temperatura ambiente. Estes resultados evidenciam a necessidade de estratégias de eficiência energética que considerem não apenas o uso interno dos espaços, mas também as condições climáticas e os padrões de funcionamento típicos das infraestruturas hospitalares (Liu et al., 2022).

A sustentabilidade nas unidades deve assentar numa abordagem integrada que contemple simultaneamente as dimensões ambiental, económica e social (*Sustainability Practices in Hospitals - Health Procurement Africa*, n.d.), entendidas como indissociáveis no contexto da prestação de cuidados de saúde. A dimensão ambiental foca-se na otimização de consumo de energia e água, na gestão de resíduos e emissões e na minimização do impacto ecológico da infraestrutura hospitalar, enquanto a dimensão económica visa a utilização racional dos recursos, a redução de custos operacionais e o aumento da eficiência funcional; e a dimensão social refere-se ao bem-estar dos profissionais de saúde, à experiência dos pacientes e ao impacto na comunidade. Este quadro holístico tem impulsionado o desenvolvimento de indicadores de desempenho hospitalar sustentáveis como forma de apoiar decisões de gestão mais fundamentadas.

A nível operacional, a eficiência energética é um dos eixos centrais nas unidades de saúde. Por exemplo, uma intervenção de renovação energética realizada num hospital privado no sul de Itália demonstrou que, através da instalação de sistemas mais eficientes de iluminação e climatização/ventilação, foi possível reduzir o consumo de eletricidade em cerca de 48 % e diminuir a procura de energia primária em cerca de 19 % face ao estado inicial (De Masi et al., 2023). Embora não se trate especificamente de um *Building Management System* (BMS) com controlo em tempo real, este estudo fornece evidência de que a combinação de simulação, monitorização e medidas integradas constitui uma via válida para promover simultaneamente o conforto ambiental e a economia de energia.

Outro vetor essencial é a eficiência funcional, que se refere à utilização otimizada dos espaços e recursos humanos. Através de ferramentas de análise de fluxos e de ocupação, é possível reduzir tempos de espera ou aumentar a taxa de utilização de blocos operatórios como mostra onde a melhoria do agendamento, a redução dos tempos de preparação e de

transição entre casos, e a monitorização da ocupação podem elevar a taxa de utilização das salas cirúrgicas de cerca de 85,6 % para 89,4 % (Park et al., 2020).

No campo da sustentabilidade social e ambiental, os hospitais de nova geração têm incorporado estratégias de design biofílico, materiais de baixo impacto ambiental e sistemas de monitorização contínua da qualidade do ar e da luz natural. Além disso, a integração de tecnologias digitais como *Digital Twins* e IoT tem permitido uma visão global e dinâmica do desempenho das infraestruturas, apoiando decisões de gestão mais sustentáveis (Popa et al., 2021).

Assim, os critérios de eficiência e sustentabilidade hospitalar baseiam-se na interligação entre gestão energética, funcionalidade, bem-estar e inovação digital. A convergência destas dimensões representa um passo essencial para o desenvolvimento de infraestruturas de saúde inteligentes, resilientes e ambientalmente responsáveis.

2.1.3 PRÁTICAS E TECNOLOGIAS ATUAIS (BIM, CAFM, IoT)

A gestão eficiente dos espaços de saúde depende cada vez mais da adoção de tecnologias digitais que permitem recolher, analisar e visualizar dados espaciais, energéticos e funcionais em tempo real. Entre as principais soluções destacam-se o BIM, os sistemas CAFM e IoT, que, em conjunto, formam a base tecnológica para uma gestão inteligente e sustentável das infraestruturas de saúde. Estas ferramentas possibilitam uma abordagem integrada às operações, desde o planeamento e manutenção das instalações até à monitorização contínua do desempenho ambiental e ocupacional.

O BIM representa uma metodologia digital que integra informações geométricas e funcionais num modelo tridimensional do edifício, permitindo a gestão colaborativa ao longo de todo o seu ciclo de vida. No contexto hospitalar, o BIM tem sido amplamente utilizado para apoiar o planeamento de espaços clínicos, simular fluxos de circulação, prever necessidades de manutenção e avaliar o impacto energético de diferentes cenários de utilização (Volk et al., 2014).

Já os sistemas de CAFM têm vindo a afirmar-se como ferramentas fundamentais na gestão integrada das infraestruturas hospitalares, permitindo reunir e gerir, de forma centralizada, informações relativas a espaços, equipamentos e processos operacionais. Segundo (Iadanza & Luschi, 2019), a implementação de um sistema CAFM em unidades de saúde possibilita a criação de uma plataforma informativa capaz de integrar plantas digitais, gerir ativos e analisar indicadores de desempenho, apoiando a tomada de decisão estratégica e operacional. Estes sistemas permitem ainda monitorizar continuamente o estado das instalações e dos equipamentos, otimizando as atividades de manutenção e a alocação de recursos. Desta forma, o CAFM contribui para uma gestão hospitalar mais eficiente, transparente e orientada por dados, promovendo a sustentabilidade e a melhoria contínua das operações.

A IoT tem vindo a consolidar-se como um elemento central na digitalização das infraestruturas hospitalares, permitindo a recolha contínua de dados através de sensores distribuídos para monitorização ambiental, rastreamento de equipamentos e apoio à tomada de decisão. (Li et al., 2024) realça que a integração de sensores inteligentes e redes de comunicação em tempo real amplia a visibilidade e o controlo sobre as operações hospitalares, contribuindo para uma gestão mais informada, segura e eficiente dos recursos físicos e clínicos.

A convergência entre BIM, CAFM e IoT representa o núcleo tecnológico da gestão contemporânea de espaços hospitalares, permitindo a transição de um modelo tradicional, reativo e compartimentado, para um modelo integrado e orientado por dados. Neste ecossistema digital, os *Digital Twins* surgem como uma camada avançada de integração, utilizando os dados em tempo real fornecidos pelos sensores IoT, a estrutura e informações dos modelos BIM, e as funcionalidades de gestão dos sistemas CAFM para criar uma réplica dinâmica e operacional do hospital.

2.2 DIGITAL TWINS

2.2.1 CONCEITO

O conceito de *Digital Twin* tem vindo a ganhar crescente relevância nas últimas duas décadas, mas a sua definição exata varia conforme o autor e o contexto de aplicação. De forma geral, um DT representa a integração entre um produto físico e a sua contraparte digital, ligada por um fluxo contínuo de dados. Segundo (Grieves, 2014), o conceito assenta em três componentes fundamentais: o produto físico, o produto digital e a ligação entre ambos. No entanto, apesar de existir um entendimento comum sobre a essência do conceito, a literatura científica apresenta diferentes interpretações quanto ao seu alcance, nível de integração, e tipos de dados envolvidos.

De seguida é apresentado um resumo de algumas das definições de DT, evidenciando as diferenças conceptuais entre autores e abordagens.

Tabela 1 - Diferentes definições de *Digital Twin*

Definição	Fonte
Uma simulação integrada multi-física, multiescala, probabilística de um sistema tal como construído, que usa os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações de sensores, historial de operações, etc., para espelhar a vida do seu correspondente físico.	(Inamdar et al., 2024)
Define <i>Digital Twin</i> como entidade que representa um sistema físico, com troca bidirecional de dados e conexão que se estende por todo o ciclo de vida desse sistema.	(Trauer et al., 2020)
Define-se como modelo digital com entidades físicas e virtuais, com processos físicos e virtuais, com ligações físicas-para-virtuais e virtuais-para-físicas.	(Jones et al., 2020)
Define-se como um modelo adaptativo de um sistema físico complexo, que incorpora dados em tempo real, histórico, simulações, e que	(Rasheed et al., 2019)

permite múltiplas aplicações, incluindo previsão, otimização e monitorização contínua.	
Integração sem esforço de dados entre uma máquina física e sua réplica virtual, em ambas as direções.	(Fuller et al., 2020)
Um <i>Digital Twin</i> é uma representação virtual de entidades e processos do mundo real, sincronizada com determinada frequência e fidelidade. Sistemas de <i>Digital Twin</i> usam dados históricos e em tempo real para representar passado e presente, e simular futuros previstos.	(Slama, 2023)

Apesar das distintas perspectivas, observa-se uma convergência quanto à essência do conceito: um DT é, de forma consensual, uma representação digital dinâmica de um sistema físico, ligada por fluxos contínuos de dados bidirecionais (como tenta mostrar a Figura 1), que permite monitorizar, simular, prever e melhorar o desempenho do seu equivalente real ao longo de todo o ciclo de vida. Esta definição abrangente traduz o papel central do DT na transformação digital e na integração entre o físico e o virtual, constituindo a base para aplicações em múltiplos domínios — desde a indústria e energia até à saúde e gestão de infraestruturas.

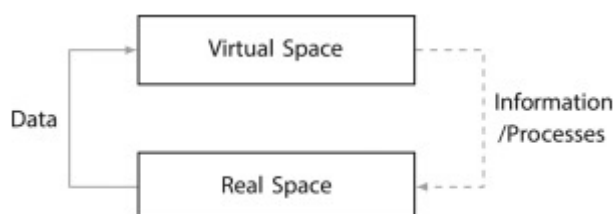


Figura 1- Arquitetura Típica de um DT (Jones et al., 2020)

2.2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

O conceito de DT teve origem no início dos anos 2000, com Michael Grieves, na Universidade do Michigan, que apresentou um modelo para Product Lifecycle Management (PLM) que incluía três componentes fundamentais: espaço real, espaço virtual, e um mecanismo de ligação entre ambos. Esse modelo inicial, embora não chamasse explicitamente “Digital Twin” nos seus primeiros usos, é frequentemente

referido como *Mirrored Spaces Model* ou *Information Mirroring Model*. Durante os anos seguintes, o conceito permaneceu sobretudo teórico ou com implementações muito limitadas, devido às restrições tecnológicas da época, por exemplo, na capacidade de sensores, computação, conectividade e armazenamento de dados. A partir de 2010, com o avanço das tecnologias IoT, big data, computação em nuvem e conectividade constante, o termo “Digital Twin” começou a ser usado de forma mais consolidada e passaram a surgir aplicações práticas em diversos setores, incluindo aeroespacial, manufatura e, mais recentemente, saúde. Um marco importante nessa evolução foi a adoção do conceito pela NASA, que em “roadmap” tecnológicos e publicações passou a referir “Digital Twin” com alguma formalização, frequentemente ligado à simulação de veículos ou sistemas aeroespaciais com dados reais e modelos multi-físicos. Posteriormente, durante a última década, o conceito expandiu-se para além da indústria pesada e aeroespacial, abrangendo cidades inteligentes, infraestruturas, sistemas hospitalares, energias, etc., com níveis crescentes de sofisticação nas funcionalidades (monitorização em tempo real, predição, recomendações automáticas) (Singh et al., 2021).

Hoje, o DT é entendido como uma tecnologia madura em muitos domínios, onde o ciclo de vida completo do sistema físico pode ser espelhado digitalmente, permitindo não só acompanhar o estado real, mas também simular cenários futuros, prever falhas, melhorar operações e apoiar a tomada de decisão de forma quase autónoma. Essa evolução histórica demonstra como o conceito, que começou como ideia conceitual, foi-se transformando à medida que as tecnologias digitais subjacentes progrediram, tais como, sensorização, conectividade, IoT, computação de alto desempenho, algoritmos de Inteligência Artificial (IA), etc.

A Figura 2 mostra de forma visual a evolução descrita, cronologicamente.

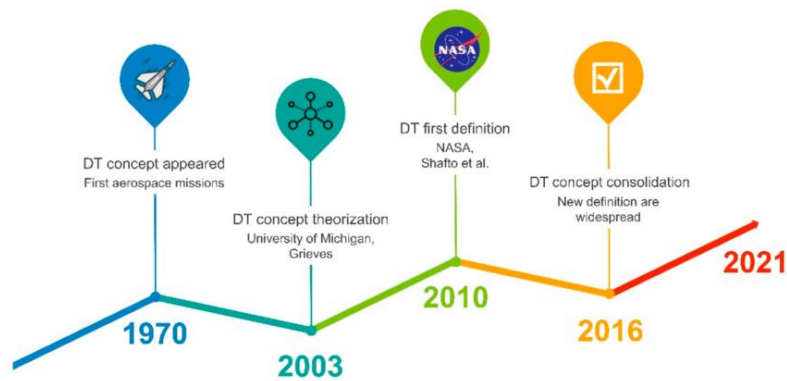


Figura 2- Timeline da evolução da definição de *Digital Twin* (Agnusdei et al., 2021)

2.2.3 TIPOS DE DIGITAL TWIN

Antes de abordar as diferentes tipologias funcionais de *Digital Twins*, importa clarificar os níveis de integração de dados que podem existir entre um sistema físico e a sua representação digital. A literatura distingue três níveis principais de maturidade: *Digital Model*, *Digital Shadow* e *Digital Twin*, diferenciados essencialmente pela direção e grau de automatização dos fluxos de dados, como evidenciado na Figura 3. No nível mais básico, o *Digital Model* corresponde a uma representação digital sem integração automática de dados com o sistema físico. Num nível intermédio, o *Digital Shadow* caracteriza-se pela existência de um fluxo de dados automatizado unidirecional, no qual as alterações no sistema físico são refletidas no modelo digital. O nível mais avançado, o *Digital Twin*, implica uma integração bidirecional contínua, permitindo que alterações no sistema físico se reflitam no modelo digital e que este, por sua vez, influencie ou suporte decisões sobre o comportamento do sistema real. Esta distinção é fundamental para compreender a evolução tecnológica que conduz ao conceito pleno de *Digital Twin* e serve de base para a classificação das suas diferentes aplicações e finalidades.

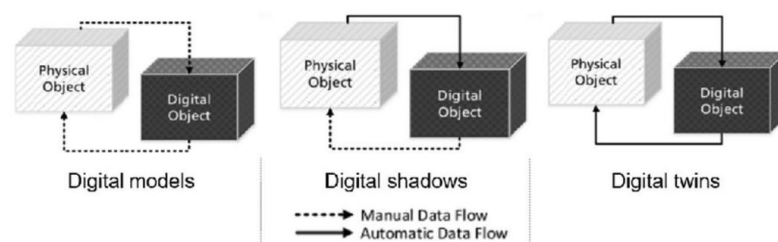


Figura 3 - Níveis de integração de dados (Kritzinger et al., 2018)

De acordo com a literatura, os *Digital Twins* podem ser classificados em diferentes tipos consoante o grau de integração e a finalidade da sua utilização. Esta categorização permite compreender a maturidade tecnológica e a profundidade analítica do modelo virtual em relação ao seu correspondente físico. Entre as tipologias mais referidas encontram-se o *Digital Twin Operacional*, o *Digital Twin Preditivo* e o *Digital Twin Prescritivo*.

- DT Operacional: Representa o nível mais básico da tecnologia, focando-se na monitorização em tempo real do sistema físico. Este tipo de modelo digital reflete o estado atual do ativo ou processo, recolhendo dados de sensores e apresentando-os em ambiente virtual para acompanhamento, diagnóstico e otimização imediata do desempenho. É amplamente utilizado em manutenção e gestão de operações (Kritzinger et al., 2018).
- DT Preditivo: Este tipo de *Digital Twin* vai além da monitorização e análise descritiva, incorporando modelação preditiva e simulação de cenários futuros com base em dados históricos e em tempo real. Através da utilização de algoritmos de *machine learning* e técnicas avançadas de modelação, o DT Preditivo permite antecipar falhas, prever o estado futuro dos ativos e identificar padrões de comportamento, apoiando estratégias de manutenção preventiva e a otimização do desempenho operacional. Os DT com capacidades preditivas assumem um papel essencial na evolução destas plataformas, como referido por (Jones et al., 2020), ao permitir prever estados futuros do sistema físico através de mecanismos de previsão baseados em dados e em modelos, potenciando decisões mais informadas e proativas.
- DT Prescritivo: Corresponde ao nível mais avançado de maturidade dos *Digital Twins*, caracterizando-se pela capacidade de ir além da monitorização e previsão do comportamento do sistema. Este tipo de modelo é capaz de recomendar ações corretivas ou preventivas, ou até ajustar automaticamente parâmetros operacionais, recorrendo a técnicas de otimização, analítica prescritiva e inteligência artificial. Segundo (Kibira & Shao, n.d.), os *Digital Twins* prescritivos adicionam inteligência para recomendar ações corretivas e preventivas no sistema

com base nos resultados de análise de dados, aprendizagem automática ou algoritmos de otimização, o que reforça o seu papel ativo na tomada de decisão. Este tipo de abordagem revela-se especialmente relevante em contextos de elevada complexidade e criticidade, como sistemas hospitalares, redes industriais inteligentes ou cidades inteligentes, onde a tomada de decisão autónoma, informada por dados em tempo real, pode contribuir para ganhos significativos de eficiência, segurança e sustentabilidade.

2.2.4 TECNOLOGIAS HABILITADORAS

A implementação de um DT depende fortemente de um conjunto de tecnologias que permitem estabelecer a ligação contínua entre o mundo físico e o digital. Estas tecnologias, conhecidas como tecnologias habilitadoras, são responsáveis pela recolha, transmissão, processamento e interpretação dos dados provenientes do sistema real, garantindo a atualização constante do modelo virtual. Entre as principais destacam-se a IoT, os sensores inteligentes, as plataformas de *Big Data*, a IA, as ferramentas de simulação e o BIM. A integração destas componentes é o que confere ao DT a sua natureza dinâmica, interativa e preditiva, permitindo que este funcione como uma representação digital fiável e operacional do seu equivalente físico (Fuller et al., 2020).

A IoT constitui a infraestrutura base de comunicação dos *Digital Twins*. Através da interligação de dispositivos e sistemas físicos em rede, permite a recolha contínua de dados de sensores e atuadores instalados em equipamentos, edifícios ou ambientes. No contexto hospitalar, a IoT possibilita a monitorização em tempo real de variáveis como temperatura, humidade, ocupação de espaços, estado de equipamentos médicos ou consumo energético. Estes dados são transmitidos para o modelo digital, assegurando a atualização e sincronização permanente entre o ambiente físico e o virtual (Tao et al., 2019). Diretamente ligado a IoT estão os sensores inteligentes, que representam a interface direta entre o ambiente físico e o DT. Estes dispositivos são responsáveis por medir variáveis físicas e transformar esses dados em informação digital que alimenta o modelo. A

diversidade e precisão dos sensores utilizados determinam a fidelidade do DT, sendo comum a integração de sensores de movimento, ambientais, de consumo energético e de desempenho de equipamentos. A fiabilidade da recolha de dados é, portanto, um elemento crítico para o sucesso do modelo digital.

As tecnologias de *Big Data* e análise de dados são igualmente fundamentais, uma vez que os *Digital Twins* geram e dependem de grandes volumes de informação provenientes de múltiplas fontes. As plataformas de *Big Data* permitem o armazenamento, tratamento e processamento eficiente desses dados, extraíndo conhecimento útil e identificando padrões de comportamento e desempenho. A análise avançada de dados contribui ainda para melhorar a precisão das previsões e otimizações realizadas pelo DT, apoiando decisões de planeamento e gestão (Qi & Tao, 2018).

A IA assume um papel central nas funcionalidades preditivas e prescritivas dos *Digital Twins*. Através de técnicas de *machine learning* e *deep learning*, os modelos conseguem identificar anomalias, prever falhas e melhorar operações com base em dados históricos e em tempo real. Em contextos hospitalares, a IA pode apoiar a gestão de fluxos de pacientes, prever picos de ocupação ou melhorar o uso de recursos energéticos e logísticos. Esta integração torna o DT não apenas uma réplica digital, mas também uma ferramenta de apoio à decisão com autonomia crescente (Jones et al., 2020).

A simulação constitui outra tecnologia essencial, permitindo testar cenários e estratégias antes da sua aplicação no mundo real. Através da simulação, é possível avaliar o impacto de diferentes decisões sobre a operação de um sistema hospitalar, como a redistribuição de espaços, a introdução de novos equipamentos ou alterações em horários de funcionamento, sem comprometer o ambiente real. A combinação entre dados reais e simulação confere ao DT a capacidade de prever comportamentos futuros e melhorar processos operacionais (Negri et al., 2017).

Por fim, o BIM destaca-se como a base estrutural dos *Digital Twins* aplicados a edifícios e infraestruturas. O BIM permite criar uma representação digital tridimensional detalhada de uma instalação física, integrando informação geométrica, técnica e funcional. Quando associado a sensores e dados em tempo real, o BIM evolui para um DT do edifício, possibilitando a monitorização contínua do seu estado, desempenho energético e

necessidades de manutenção. No contexto hospitalar, esta integração contribui para uma gestão mais eficiente, sustentável e segura das instalações (Volk et al., 2014).

Em conjunto, estas tecnologias habilitadoras formam o ecossistema que suporta a criação e operação de *Digital Twins*. A sua integração harmoniosa é determinante para garantir a fidelidade, atualidade e utilidade do modelo digital, permitindo que o DT funcione como uma ferramenta estratégica de apoio à decisão e otimização de processos em ambientes hospitalares complexos.

2.2.5 BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES

A adoção de um DT em contextos hospitalares oferece múltiplos benefícios, que decorrem da capacidade de combinar modelação virtual, dados em tempo real e análises avançadas para suportar a gestão dos espaços, fluxos de pessoas, equipamentos e infraestruturas de saúde. Entre os benefícios mais frequentemente citados destacam-se a monitorização em tempo real de recursos e ocupações, a simulação de cenários futuros, a otimização do consumo energético e manutenção preditiva, bem como o apoio à tomada de decisão baseada em dados. Além das vantagens operacionais, *Digital Twins* podem apoiar decisões socioéticas, melhorar a transparência dos processos e permitir uma gestão mais responsável e centrada nos pacientes (Popa et al., 2021). Por exemplo, estudos no âmbito da construção e da energia demonstram que o DT pode melhorar a eficiência operacional e reduzir custos energéticos (Tahmasebinia et al., 2023).

Contudo, estes benefícios são acompanhados por limitações e desafios não negligenciáveis, particularmente relevantes no sector da saúde e para o tema da gestão de espaços hospitalares. Dentre as principais limitações identificadas na literatura encontram-se a elevada complexidade de integração de dados e sistemas, a dependência de sensores e tecnologias IoT com fiabilidade nem sempre garantida, a interoperabilidade entre sistemas, a questão da fiabilidade e fidelidade dos modelos virtuais, os custos de implementação e manutenção, bem como as incertezas relativas ao retorno do investimento. Por exemplo, um estudo de revisão sistemática aponta que os benefícios percebidos dos DTs não são claramente compreendidos... o nível de fidelidade dos DTs não

é totalmente avaliado em termos dos seus parâmetros, precisão e nível de abstração (Carvalho & da Silva, 2021).

Adicionalmente, no contexto hospitalar, emergem riscos específicos como a segurança e privacidade dos dados, o impacto na formação e adoção por parte dos utilizadores (pessoal clínico e técnico), a necessidade de adaptação organizacional e processo de mudança, e a questão ética de decisões assistidas ou automatizadas baseadas em *Digital Twin* (Popa et al., 2021). Estas limitações sugerem que, embora o DT apresente um forte potencial de transformação, a sua implementação deve ser acompanhada de uma avaliação rigorosa de viabilidade, gestão de riscos e alinhamento com os processos de saúde existentes.

2.3 APLICAÇÕES DE DIGITAL TWIN EM SAÚDE

Na Tabela 2 são apresentados vários casos de estudo relacionados com gestão de espaços de saúde com recurso a um DT, demonstrando aplicações práticas em diferentes contextos clínicos e administrativos.

Tabela 2 - Aplicações de *Digital Twin* em Saúde

(Peng et al., 2020)	Implementação de um <i>Digital Twin</i> para um grande hospital na China, integrando modelos BIM com dados dinâmicos de sensores e o sistema de gestão do edifício. O objetivo foi demonstrar a integração contínua ao longo do ciclo de vida do edifício para suporte à manutenção e eficiência energética. A implementação incluiu recolha e ingestão automática de dados, visualização 3D e simulação para avaliação de cenários operacionais, resultando num aumento de cerca de 10% na satisfação da gestão, numa redução estimada de aproximadamente 1% no consumo energético anual e na prevenção de mais de 10% das falhas e pedidos de manutenção através de diagnóstico antecipado dos sistemas técnicos.
---------------------	---

(Y. ; Lee et al., 2024)	Os autores de instituições sul-coreanas construíram um <i>Digital Twin</i> interior para um hospital com foco na análise da transmissão de infeções respiratórias (ex.: COVID-19). O trabalho descreve a modelação espacial, integração de dados de ocupação e simulação de dispersão de partículas para análise de risco. A implementação incluiu mapeamento indoor (BIM/IFC), sensores de ocupação e um módulo de simulação de difusão para testar cenários de ventilação e distanciamento. Resultou em identificação de zonas de maior risco e recomendações de rearranjo de fluxos/ventilação.
(Cespedes-Cubides & Jradi, 2024)	Estudo aplicado a um hospital em Odense (Dinamarca) onde se implementou um modelo dinâmico para <i>retro-commissioning</i> e otimização energética. O <i>Digital Twin</i> reuniu IFC/BIM, registos históricos e leituras em tempo real de sensores para detetar anomalias e otimizar controlo HVAC. Os resultados documentam reduções no consumo energético e melhoria na deteção de falhas de controlo, com impactos mensuráveis em O&M. Ferramentas: IFC, WebGL, Python para análise, protocolos Modbus para recolha de dados.
(Song & Li, 2022)	Este caso de estudo descreve a implementação de um <i>Digital Twin</i> para a gestão de instalações no Shanghai Tongji Hospital, integrando BIM, dados de operação e módulos de IA para manutenção preventiva. O objetivo foi suportar decisões de <i>facility management</i> e priorização de intervenções. Os resultados indicam melhorias na eficiência da manutenção e maior visibilidade operacional dos ativos.
(Sieve et al., 2025)	O projeto BedreFlyt apresenta um <i>Digital Twin</i> operacional para planeamento e despacho de camas em enfermarias, usando modelos executáveis e solvers SMT para produzir decisões de

	alocação. Foi implementado e testado com dados hospitalares reais (fluxos de internamento) e demonstrou capacidade de gerar cenários “what-if” e decisões de curto prazo. Resultados: solução demonstrou melhoria na capacidade de planeamento e redução de situações de sobrelotação em simulações com dados reais.
(Kuruppu Appuhamilage et al., 2025)	Proposta de arquitetura com validação em cenários de cuidados críticos. Os autores implementaram um protótipo integrado com AnyLogic para simular fluxos e tarefas em unidades de cuidados críticos com o objetivo de monitorizar atividades e apoiar planeamento em tempo real. O protótipo conseguiu rastrear cerca de 72% das tarefas de equipa em cenários de validação e melhorar a visibilidade operacional. Foram usadas ferramentas como: Azure Cloud, AnyLogic (DES), integração IoT e <i>dashboards</i> para monitorização.
(Jiang et al., 2025)	Apresenta um caso aplicado de <i>Digital Twin</i> que integra modelos BIM e dados operacionais para apoiar o design e a operação de sistemas HVAC em contexto hospitalar. O estudo combina modelos de simulação térmica, análise de fluxos de circulação e integração com dados IoT, permitindo avaliar cenários operacionais em tempo quase real. Os resultados indicam reduções significativas nos percursos e tempos de deslocação de pacientes e profissionais, entre 38% e 53%, associadas à otimização do layout funcional e dos padrões de utilização dos espaços, bem como melhorias projetadas no desempenho do HVAC, mantendo os requisitos de conforto clínico e suportando estratégias de controlo mais responsivas.
(E. L. S. Lee et al., n.d.)	Investigação aplicada que usa um <i>Digital Twin</i> orientado a serviço para apoiar a conceção e operação de uma unidade hospitalar no Moorfields Eye Hospital (Londres). O projeto implementou protótipos integrando dados de serviços e BIM para avaliar

	impactos no desenho do espaço e fluxo de pacientes. Com recurso a BIM + análises qualitativas, workshops e prototipagem nasceram recomendações concretas de design, melhoria de fluxos e validação do conceito com utilizadores reais.
(Rovati et al., 2023)	Projeto de desenvolvimento e testes de usabilidade de uma aplicação de <i>Digital Twin</i> de paciente (simulação das primeiras 6 horas de doença crítica), com testes feitos no Mayo Clinic (Rochester). O objetivo foi avaliar aceitabilidade e utilidade como ferramenta educativa, com recurso a um modelo baseado em EHR/variáveis clínicas, app iOS para interação, validação com utilizadores. Resultados: boa aceitabilidade entre residentes, insights sobre interface e <i>workflow</i> .
(<i>Digital Twins: A New Era for ICU Decision-Making</i> ORS, n.d.)	Grupo liderado por Geoff Chase tem implementado protótipos de <i>Digital Twin</i> e automação em UCI, integrando dados de dispositivos clínicos para suporte à decisão e automação controlada. Os trabalhos incluem implementações-piloto e demonstrações com monitorização em tempo real e testes de controladores automáticos. Os resultados relatam melhor utilização de dados de dispositivos, possibilidades de automação segura e reduções de carga de trabalho em cenários controlados.
(Cumó et al., 2025)	Artigo descreve a implementação de um <i>Digital Twin</i> para gestão do bloco operatório, incluindo monitorização ambiental, controlo de difusão de gases e otimização de fluxos de serviço. O caso incluiu integração de sensores com BMS/BIM e software de visualização, definição de KPIs e <i>dashboards</i> de suporte a decisão para gestores cirúrgicos. Os autores relatam melhorias previstas na eficiência e na segurança ambiental.
(Moretti et al., 2025)	Proposta e implementação de um <i>framework</i> de integração de BIM com DES (Discrete Event Simulation) para criar <i>Digital Twins</i>

	espaço-conscientes. Com o objetivo de permitir simulações capazes de suportar decisões de ocupação e logística foi demonstrada a interoperabilidade entre BIM e DES, validação com casos de utilização hospitalar e benefícios na análise de ocupação. Foram usadas pipelines de dados IoT, integração BIM/IFC, DES (AnyLogic/SimPy).
(Han et al., 2023)	Apresenta um <i>framework</i> de <i>Digital Twin</i> para otimizar operações hospitalares, implementado num hospital municipal em Xangai. O objetivo foi integrar dados em tempo real de sistemas BIM, IoT e gestão hospitalar, permitindo monitorização contínua de equipamentos e espaços. A solução incluiu um modelo BIM conectado a sensores e <i>dashboards</i> operacionais, suportando análise do estado das infraestruturas e dos fluxos. Os resultados demonstraram melhoria na visibilidade operacional e maior capacidade de resposta a eventos críticos, promovendo processos mais eficientes e automatizados. As ferramentas utilizadas envolveram BIM, plataformas IoT e módulos de análise.
(Noeikham et al., 2024)	Foi desenvolvido e testado uma arquitetura em cinco camadas para <i>Digital Twins</i> aplicada a uma unidade de quimioterapia na Tailândia. O objetivo foi garantir interoperabilidade, privacidade e integração de dados clínicos em tempo real. O modelo foi implementado em ambiente hospitalar usando metodologias PRISMA e um protótipo baseado em padrões de arquitetura distribuída. O estudo conclui que a arquitetura proposta é escalável e adequada para ambientes hospitalares complexos, fortalecendo a segurança e gestão dos fluxos clínicos. Os resultados reportados são predominantemente qualitativos, carecendo de métricas quantitativas que permitam avaliar o impacto em desempenho ou eficiência de processos clínicos.

(Harode et al., 2023)	O estudo apresenta a implementação de um <i>Digital Twin</i> numa sala cirúrgica de um hospital no Colorado (EUA), com o objetivo de monitorizar condições ambientais críticas em tempo real, como temperatura, humidade, fluxo de ar e presença de gases. A solução integrou sensores IoT, Azure Cloud e visualização em Power BI. Os resultados demonstraram maior visibilidade operacional e deteção precoce de anomalias, tais como o decréscimo do fluxo de ar devido a possíveis obstruções, reduzindo tempos de resposta da equipa de manutenção. As ferramentas permitiram uma análise contínua do ambiente, garantindo melhores condições de segurança para o paciente e para a operação clínica.
-----------------------	--

Os casos de estudo apresentados na Tabela 2 demonstram a implementação de *Digital Twins* em diferentes partes do mundo, incluindo hospitais na China, Tailândia, Reino Unido e EUA. Cada estudo tinha objetivos específicos, como otimização de fluxos de pacientes, gestão de salas operatórias, monitorização ambiental e alocação de recursos. Os resultados evidenciam benefícios consistentes, como maior visibilidade operacional, redução de tempos de espera, melhor utilização de espaços e suporte à tomada de decisão em tempo real. Contudo, os artigos também destacam desafios comuns, nomeadamente a integração de dados provenientes de múltiplas fontes, interoperabilidade entre sistemas, latência na atualização de informações e necessidade de protocolos de privacidade e segurança robustos. No conjunto, estas experiências reforçam a aplicabilidade prática dos *Digital Twins* em contextos hospitalares, apontando caminhos para superar limitações e expandir a sua adoção global.

2.4 PANORAMA CIENTÍFICO DOS DT EM CONTEXTO HOSPITALAR

Com a digitalização crescente e a evolução das ferramentas de análise de dados, os *Digital Twins* assumem um papel central no desenvolvimento de infraestruturas hospitalares mais

resilientes, eficientes e adaptáveis às exigências contemporâneas. Esta tecnologia possibilita, por exemplo, a simulação de cenários, a gestão inteligente de recursos, a melhoria dos tempos de resposta e a otimização de consumos energéticos, aspetos particularmente críticos num setor que enfrenta simultaneamente restrições orçamentais e necessidades operacionais crescentes. Esta secção procura analisar a evolução das publicações científicas e dos conceitos associados ao uso de *Digital Twins* em hospitais e outras infraestruturas de saúde.

Para tal, recorre-se aos dados bibliográficos disponíveis na base de dados Scopus, utilizando a combinação das palavras-chave ("Digital Twin" AND ("Healthcare facilities" OR "Hospital")), de forma a identificar tendências, padrões de investigação e o crescimento do interesse científico nesta área ao longo do tempo. Para os efeitos desta investigação, foram selecionados os seguintes critérios:

Data da Pesquisa: 22 de novembro de 2025

Campos de Pesquisa: "Article title, Abstract, Keywords"

Período: 2018 a 2024

Idioma: Inglês

Tipo de Documento: "Article, Conference Paper and Book Chapter"

Critério de Exclusão: Documentos não ingleses

Foi então realizada uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados da investigação. Esta análise considerou a evolução do número de publicações ao longo do período analisado, os países com maior número de publicações, as áreas em que o tema é mais frequentemente abordado, o tipo de documentos com maior número de publicações e as palavras-chave mais utilizadas nas publicações.

A Figura 4 ilustra a progressão do número de publicações em função da combinação das palavras-chave.

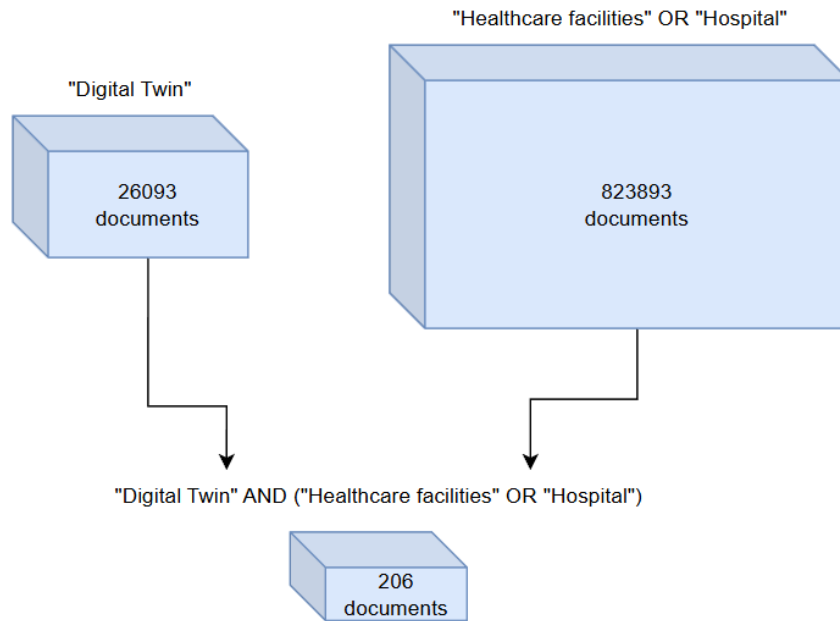


Figura 4 - Progressão do número de publicações em função da combinação de *Keywords*

Nota: O ano inicial da pesquisa foi definido em 2018 para manter a uniformidade de critérios, uma vez que a combinação final de palavras-chave só tem publicações a partir desse ano.

Documentos por ano

A evolução do número de publicações ao longo do período analisado, para a combinação de palavras-chave é demonstrado na Figura 5.

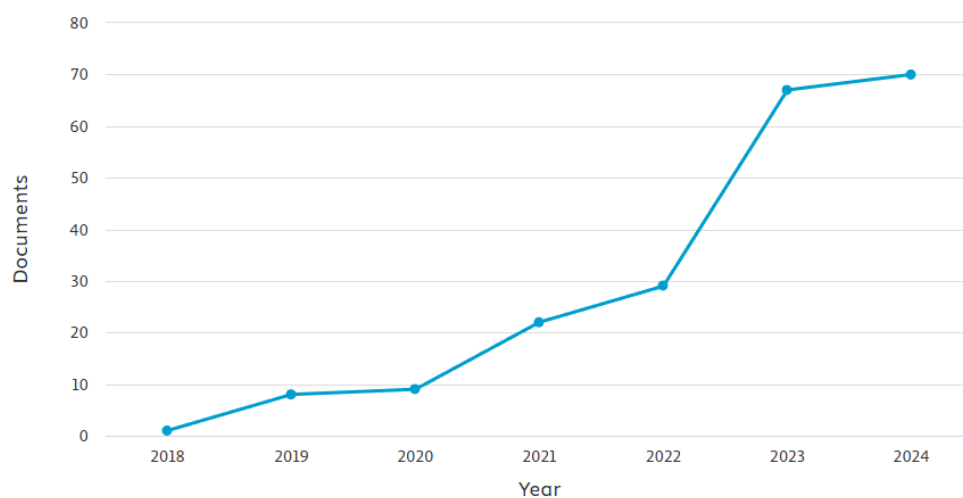


Figura 5 - Número de publicações por ano

A Figura 5 mostra que ao longo do período estudado houve sempre aumento no número de publicações tendo o primeiro salto quantitativo sido dado em 2021 com 22 publicações comparativamente às 9 do ano anterior. De notar o maior crescimento do período ter ocorrido em 2023, onde foram publicados 67 documentos, uma evolução de 131% comparativamente a 2022.

Documentos por país

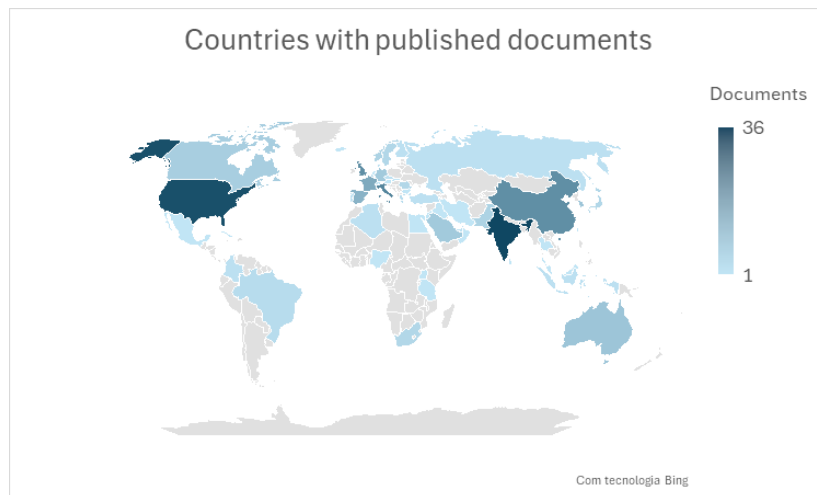


Figura 6- Países com documentos publicados

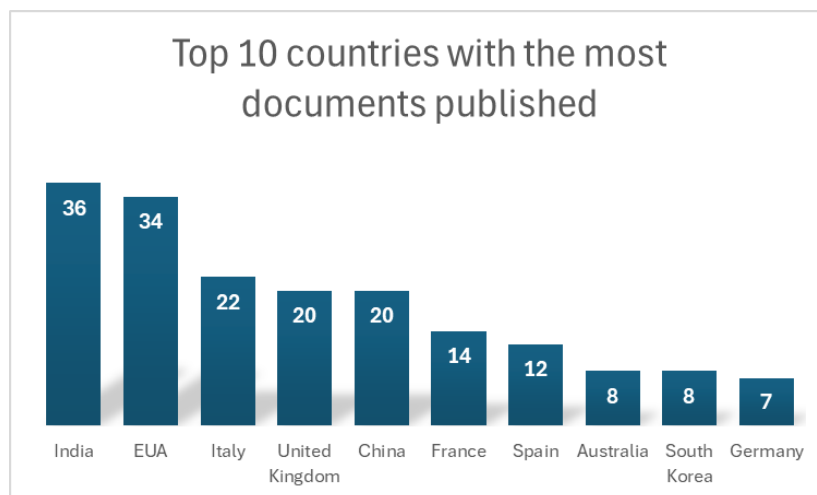


Figura 7- Top10 países com mais documentos publicados

A figura 6 mostra-nos que há uma maior contribuição distribuída pelo continente americano (mais propriamente América do Norte), europeu e asiático. Por outro lado, observa-se uma participação significativamente reduzida por parte do continente africano e da América do Sul.

Já a figura 7 mostra que os países com maior número de publicações são a Índia (36) e os EUA (34), seguidos por Itália (22), Reino Unido (20) e China (20).

Documentos por tipo

Posteriormente, os documentos obtidos através da pesquisa foram submetidos a uma análise adicional.

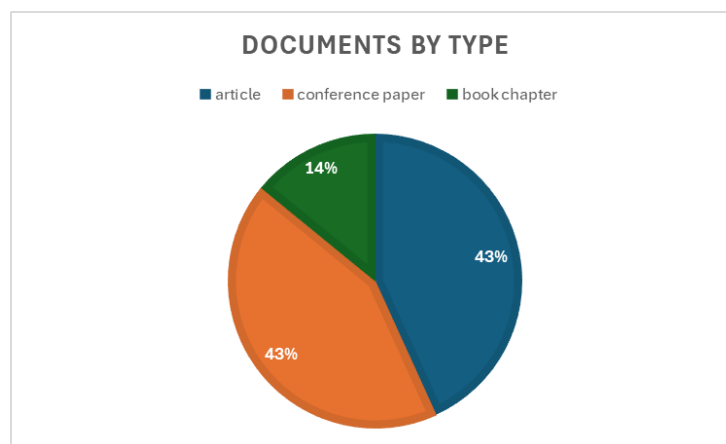


Figura 8- Percentagem de documentos por tipo

A Figura 8 ilustra que dos 206 documentos resultantes da pesquisa, 43% são artigos de conferência, 43% são artigos e apenas 14% são capítulos retirados de livros.

Documentos por área científica

A Figura 9 permite analisar as áreas em que as palavras-chave em estudo foram mais frequentemente mencionadas.

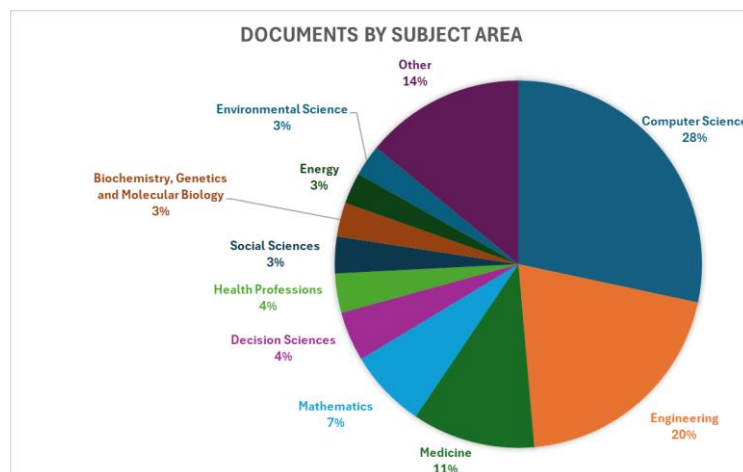


Figura 9 - Percentagem de documentos por área científica

A Figura 9 evidencia que, ao nível das áreas científicas, a investigação é predominantemente enquadrada em duas disciplinas principais: Ciência da Computação e Engenharia. Em conjunto, estas áreas representam aproximadamente 50% do total de documentos identificados.

2.5 ENQUADRAMENTO LEGAL E NORMATIVO

Embora ainda não exista legislação específica para *Digital Twins*, a sua implementação “encontra-se fortemente condicionada por um conjunto de regulamentos e normas que visam garantir a proteção de dados, a segurança dos sistemas, a interoperabilidade e a fiabilidade tecnológica” (de Oliveira El-Warrak & Miceli de Farias, 2025). Assim, o enquadramento legal dos DT resulta da convergência de diferentes instrumentos legislativos e normativos que, em conjunto, estabelecem os requisitos obrigatórios para a implementação de soluções digitais no setor da saúde.

No contexto português, a utilização de sistemas digitais que envolvem dados de saúde está sujeita às disposições do Regulamento Geral sobre a Proteção de Dados (RGPD) (*Regulation - 2016/679 - EN - Gdpr - EUR-Lex*, n.d.) e à sua aplicação nacional supervisionada pela Comissão Nacional de Proteção de Dados (CNPd) (*Lei n.º 58/2019 | DR*, n.d.), garantindo a salvaguarda de dados pessoais sensíveis. A nível europeu, destacam-se três pilares fundamentais: RGPD, que estabelece regras rigorosas de privacidade e segurança,

a Diretiva NIS2 (*Directive - 2022/2555 - EN - EUR-Lex*, n.d.), que reforça as obrigações de cibersegurança para entidades essenciais, incluindo hospitais, e o recente AI Act (*Regulation - EU - 2024/1689 - EN - EUR-Lex*, n.d.), que regula o desenvolvimento e utilização de sistemas de Inteligência Artificial, sendo particularmente relevante para *Digital Twins* com funções preditivas ou de apoio à decisão clínica. Adicionalmente, o Regulamento Europeu dos Dispositivos Médicos (MDR) (*Regulation - 2017/745 - EN - Medical Device Regulation - EUR-Lex*, n.d.) pode aplicar-se quando um DT desempenha funções clínicas, sendo, portanto, enquadrado como dispositivo médico digital.

Paralelamente à legislação, existe um conjunto de normas e *standards* internacionais que funcionam como referências técnicas para a implementação de DT em ambientes hospitalares. Destacam-se a ISO/IEC 27001 (*ISO/IEC 27001:2022 - Information Security Management Systems*, n.d.), que define boas práticas para sistemas de gestão de segurança da informação, e a ISO 19650 (*ISO 19650-1:2018 - Organization and Digitization of Information about Buildings and Civil Engineering Works, Including Building Information Modelling (BIM) — Information Management Using Building Information Modelling — Part 1: Concepts and Principles*, n.d.), aplicável à gestão de informação BIM em ativos construídos, contribuindo para a integração do *Digital Twin* em sistemas de gestão do edifício. Ao nível da interoperabilidade, os standards HL7/FHIR (*Index - FHIR v5.0.0*, n.d.) representam a principal referência para a troca de informação clínica entre sistemas digitais, assegurando a consistência e a comunicação entre plataformas hospitalares e o DT. No plano global, a Estratégia Global de Saúde Digital da OMS (Organização Mundial da Saúde, 2021) estabelece diretrizes e princípios orientadores para a transformação digital na saúde, promovendo a adoção de tecnologias como DTs de forma ética, sustentável e segura.

Em síntese, apesar da inexistência de legislação específica para *Digital Twins*, verifica-se a existência de um quadro normativo robusto que, em conjunto, regula as condições necessárias à sua adoção em hospitais. Este enquadramento confere proteção ao doente, assegura elevados padrões de cibersegurança e promove a interoperabilidade entre sistemas, embora permaneça espaço para futura regulamentação específica que acompanhe a crescente maturidade dos *Digital Twins* no setor da saúde.

3. CONCEÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO DIGITAL TWIN

A presente secção tem como objetivo descrever o desenvolvimento da componente prática da dissertação, centrada na aplicação do conceito de *digital twin* à gestão de uma farmácia de pequena dimensão. Esta abordagem procura demonstrar como a integração entre modelação BIM, geração de dados e plataformas de visualização pode contribuir para a monitorização e análise de condições operacionais.

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO PRÁTICA

O caso de estudo selecionado consiste numa farmácia organizada em diferentes áreas funcionais, incluindo a zona de atendimento ao público e o *backoffice*, mas também um

corredor de circulação interna, uma área comum, um WC, um escritório, um quarto e uma zona exterior. Cada uma destas zonas apresenta características operacionais distintas, justificando a sua modelação individual e a monitorização diferenciada de parâmetros relevantes.

A implementação desenvolvida baseia-se em três componentes: o modelo tridimensional da farmácia (Autodesk Revit), a plataforma de DT (Autodesk Tandem) e um módulo de geração de dados sintéticos (*Python*). O Revit fornece a base geométrica, o Tandem integra e visualiza os dados no contexto espacial, e o gerador em *Python* reproduz o comportamento de sensores virtuais, permitindo simular cenários como variações de temperatura e humidade, alterações na ocupação ou mudanças no consumo energético. A conjugação destes componentes permite identificar situações potencialmente críticas e apoiar o processo de tomada de decisão.

Deste modo, a componente prática desta dissertação procura evidenciar o potencial dos *Digital Twins* como ferramenta de apoio à gestão operacional em farmácias, ainda que recorrendo a uma abordagem simplificada baseada em dados simulados. Simultaneamente, são exploradas as limitações da solução implementada, bem como as possibilidades de evolução futura para sistemas mais avançados e integrados.

3.2 MODELAÇÃO BIM (REVIT)

3.2.1 BASE DE MODELAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO

A modelação da farmácia foi realizada com recurso ao software Autodesk Revit, tendo como base uma planta da unidade real. Esta planta serviu como referência para a construção do modelo tridimensional, garantindo a coerência geométrica e funcional entre o espaço físico e a sua representação digital.

A Figura 10 apresenta a planta utilizada como base para a modelação, onde é possível identificar a disposição geral das diferentes áreas da farmácia.

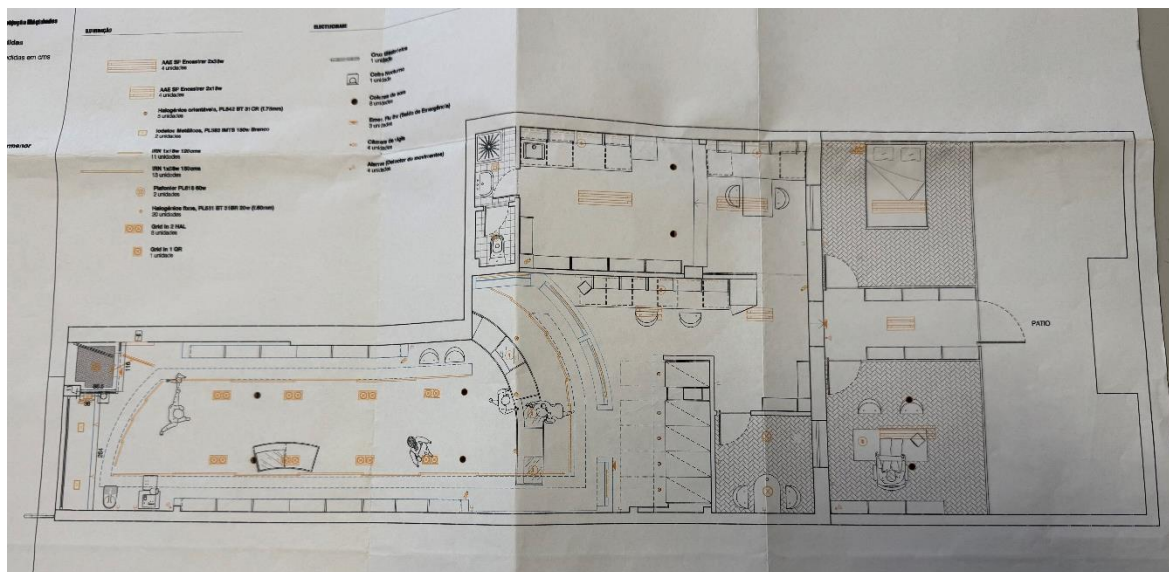


Figura 10 - Planta da farmácia utilizada como base para a modelação no Revit

Com base nesta planta, foi desenvolvido um modelo tridimensional representativo da farmácia, incluindo as principais divisões e elementos estruturais. As Figuras 11 e 12 ilustram a vista geral do modelo criado, evidenciando a correspondência com a planta original.



Figura 11 - Vista de cima do modelo tridimensional da farmácia desenvolvido no Revit

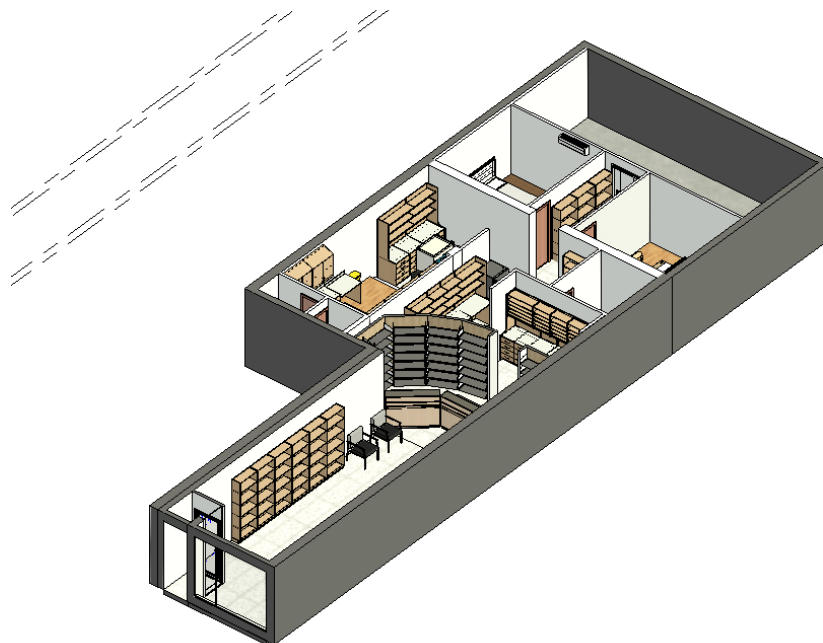


Figura 12 - Modelo Tridimensional da farmácia desenvolvido no Revit

3.2.2 DEFINIÇÃO DE AMBIENTES (ZONAS FUNCIONAIS)

Para permitir uma análise diferenciada das condições operacionais, o modelo foi estruturado em ambientes distintos, correspondentes às diferentes áreas funcionais da farmácia. Cada ambiente representa uma zona independente, possibilitando a associação futura de dados específicos no contexto do DT.

A definição destes ambientes foi realizada com base na funcionalidade de criação de “ambientes” do Revit, permitindo delimitar cada espaço de forma individual. Na Figura 13 é apresentada a identificação dos diferentes ambientes no modelo, nomeadamente, atendimento, *backoffice*, lavatório, WC, repouso, corredor traseiras, escritório, quarto e pátio, evidenciando a sua organização.

Figura 14 ilustra esta relação entre as diferentes áreas, evidenciando a estrutura funcional do modelo.



Figura 14 - Organização espacial e relação funcional entre as diferentes áreas da farmácia

3.2.4 PREPARAÇÃO DO MODELO PARA INTEGRAÇÃO NO DT

A preparação do modelo BIM para integração no DT constitui uma etapa crítica do processo, uma vez que influencia diretamente a qualidade da representação e a eficácia da associação de dados no ambiente digital. Neste sentido, o modelo foi desenvolvido com o objetivo de garantir não apenas a fidelidade geométrica, mas também a sua adequação para utilização em plataformas de monitorização.

Um dos principais aspetos considerados foi a definição clara e consistente dos ambientes, assegurando que cada divisão pudesse ser identificada como um ativo individual no DT, facilitando a associação de dados e a análise diferenciada, conforme a caracterização funcional já descrita na Secção 3.2.3. Adicionalmente, foi adotada uma estratégia de simplificação do modelo, evitando elementos construtivos excessivamente detalhados ou irrelevantes para o estudo, de modo a reduzir a complexidade computacional sem comprometer a utilidade do modelo. A nomenclatura das divisões foi definida de forma clara e intuitiva, facilitando o mapeamento entre os dados externos e os elementos do modelo e evitando ambiguidades na associação de informação.

Por fim, foi assegurada a coerência geométrica do modelo, nomeadamente ao nível da correta delimitação dos espaços e da consistência entre os diferentes elementos

construtivos, prevenindo possíveis erros durante o processo de importação do ficheiro .rvt para a plataforma do DT. Desta forma, o modelo desenvolvido constitui uma base sólida para a implementação do sistema e para a exploração dos cenários apresentados nas secções seguintes.

3.3 CONCEÇÃO DO DIGITAL TWIN (TANDEM)

3.3.1 INTEGRAÇÃO DO MODELO E ESTRUTURAÇÃO DOS ATIVOS

Após a conclusão da modelação BIM no Revit, procedeu-se à integração do modelo na plataforma de *Digital Twin* Autodesk Tandem, com o objetivo de permitir a associação de dados dinâmicos às entidades espaciais previamente definidas. Esta etapa representa a transição de um modelo estático, essencialmente geométrico, para uma representação digital enriquecida com informação operacional. A importação do ficheiro .rvt permitiu preservar a organização espacial do modelo, nomeadamente a divisão em ambientes, os quais foram automaticamente reconhecidos como ativos no contexto do Tandem. Esta correspondência entre ambientes físicos e ativos digitais constitui um elemento fundamental do conceito de *Digital Twin*, uma vez que permite associar informação contextualizada a cada espaço específico.

Cada área da farmácia passou a ser tratada como uma entidade independente no Tandem, possibilitando a monitorização diferenciada das respetivas condições ambientais e operacionais. A correta identificação e organização dos ativos revelou-se essencial para as etapas subsequentes, nomeadamente na definição de parâmetros e na associação de dados, reduzindo a probabilidade de erros durante o mapeamento. A Figura 15 apresenta o modelo após a sua importação para o Tandem, evidenciando a correspondência entre os ambientes definidos no Revit e os ativos disponíveis no DT.

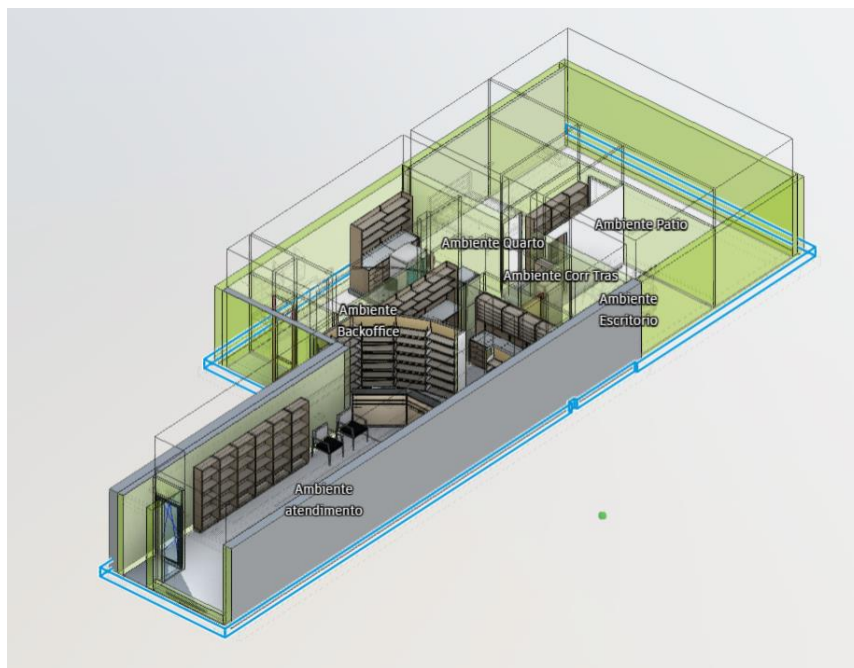


Figura 15 - Modelo da farmácia após importação para o Autodesk Tandem

3.3.2 ESTRUTURAÇÃO DOS ATIVOS E PARÂMETROS

Após a importação do modelo, procedeu-se à estruturação dos ativos correspondentes a cada ambiente da farmácia, garantindo que cada divisão pudesse ser monitorizada de forma independente. Cada ativo foi associado a um conjunto de parâmetros representativos das condições operacionais relevantes, tais como temperatura, humidade, ocupação, estado de portas, estado de sistemas de climatização e consumo energético. Importa referir que os parâmetros definidos são comuns a todos os ambientes, permitindo uma análise consistente entre diferentes zonas. No entanto, os valores associados a cada parâmetro são distintos, refletindo as condições específicas de cada área. A definição destes parâmetros, demonstrada na Figura 16, foi realizada no contexto do *Asset Room* do Tandem, permitindo estabelecer a base para a integração de dados provenientes de fontes externas.

Parameters						
+ Add Parameter		Library ☐				
Name	Category	Data Type	Unit	Precision	Description	Validation
AC State	Streams	Number	Number		AC	
Door State	Streams	Number	Number		Door	
Energy consumption	Streams	Number	W > Apparent Po...		Energy consumption	
Ext Temp	Streams	Number	°C > Temperature		Exterior Temperature	
General State	Streams	Number	Number		Numeric State	Restricted: 0, 1, 2
Humidity	Streams	Number	% > Relative Hu...		Humidity	
Occupation	Streams	Number	Number		Occupation	
State	Streams	Text			State of the system	Restricted: Normal, Alert, Critical
Temp Fridge 1	Streams	Number	°C > Temperature		Fridge Temp 1	
Temp Fridge 2	Streams	Number	°C > Temperature		Fridge Temp 2	
Temperature	Streams	Number	°C > Temperature	1	Temperature	

Figura 16 - Definição dos parâmetros associados aos ativos no Tandem

A definição dos parâmetros teve por base os cenários de análise considerados no presente trabalho, os quais são detalhados no capítulo seguinte, garantindo que a estrutura de dados do *Digital Twin* responde às necessidades de monitorização e análise pretendidas.

3.3.3 LIGAÇÕES E MAPEAMENTO DOS DADOS

No âmbito da integração de dados no DT, foi necessário estabelecer um mecanismo que permitisse associar informação proveniente de fontes externas aos parâmetros definidos para cada ambiente. Para este efeito, recorreu-se à criação de *connections* na plataforma Autodesk Tandem, as quais funcionam como pontos de entrada de dados, possibilitando a receção e integração de informação dinâmica no modelo. Cada *connection* criada corresponde a um ambiente específico da farmácia, permitindo a gestão independente dos dados associados a cada divisão. Neste trabalho, foram definidas *connections* para os principais espaços considerados na análise, nomeadamente a zona de atendimento, o *backoffice*, o corredor traseiro, o escritório, o quarto e o pátio exterior, como explícito na Figura 17. Esta abordagem permite refletir as diferenças funcionais entre os espaços, bem como simular comportamentos distintos em cada um deles.

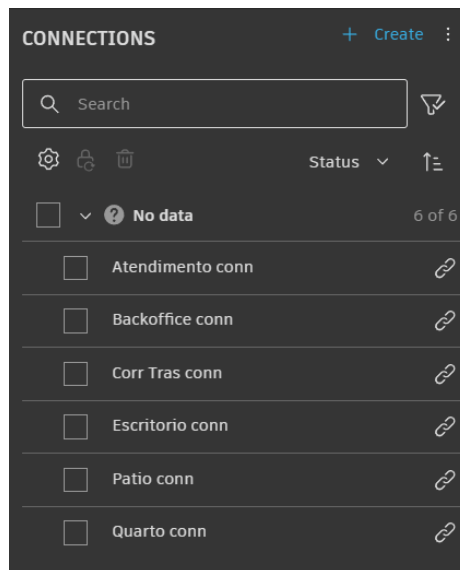


Figura 17 - Listagem das *connections* criadas para envio de dados

A utilização de uma *connection* por ambiente em estudo possibilita o envio de dados individualizados, sendo todas elas alimentadas através de um pedido HTTP do tipo POST, contendo informação estruturada em formato JSON, onde um identificador único é responsável por indicar a que *connection* pertence cada conjunto de dados. Desta forma, cada divisão recebe valores próprios para os parâmetros definidos, permitindo representar de forma diferenciada as condições ambientais e operacionais no interior da farmácia. Para assegurar a correta integração dos dados, foi necessário realizar o mapeamento entre os campos do JSON recebido e os parâmetros previamente definidos nos ativos do DT. Este processo, evidenciado na Figura 18, consiste em associar cada elemento do JSON a um parâmetro específico do ambiente correspondente, garantindo que os valores recebidos são corretamente interpretados e visualizados na plataforma.

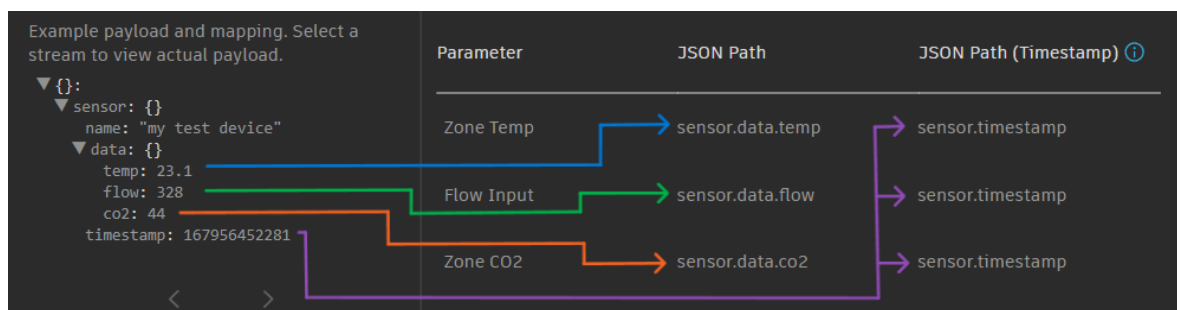


Figura 18 - Mapeamento de elementos do JSON aos parâmetros do Tandem

No presente trabalho, foram considerados parâmetros comuns a todos os ambientes, tais como temperatura, humidade, consumo energético e estado de abertura de portas, permitindo manter uma estrutura de dados consistente entre as diferentes divisões. O mapeamento foi realizado de forma uniforme, assegurando que cada *connection* utiliza a mesma estrutura de dados, sendo apenas diferenciada pelo destino da informação. Esta abordagem apresenta a vantagem de simplificar a geração de dados, uma vez que o formato do JSON enviado é idêntico para todos os ambientes, permitindo reutilizar a mesma lógica, alterando apenas o destino da *connection* através do seu respetivo identificador único. Adicionalmente, facilita a escalabilidade do sistema, possibilitando a inclusão de novos espaços ou parâmetros sem necessidade de alterações estruturais significativas.

Importa ainda referir que a definição das *connections* e dos parâmetros associados foi orientada pelos cenários de análise considerados no presente trabalho, os quais são detalhados no capítulo seguinte. Desta forma, assegura-se que a estrutura de dados implementada responde diretamente às necessidades de simulação e análise pretendidas.

3.4 ARQUITETURA DO SISTEMA

A implementação do sistema desenvolvido no presente trabalho assenta numa arquitetura modular, na qual diferentes componentes desempenham funções específicas e complementares, permitindo uma separação clara das responsabilidades associadas à modelação, à gestão de dados e à visualização. Esta abordagem contribui para uma maior flexibilidade e escalabilidade do sistema, facilitando a sua evolução e adaptação a contextos mais complexos.

A arquitetura proposta integra três componentes principais, conforme ilustrado na Figura 19: o modelo BIM desenvolvido em ambiente Autodesk Revit, a plataforma de *Digital Twin* Autodesk Tandem e um sistema externo de geração de dados, implementado em *Python*.

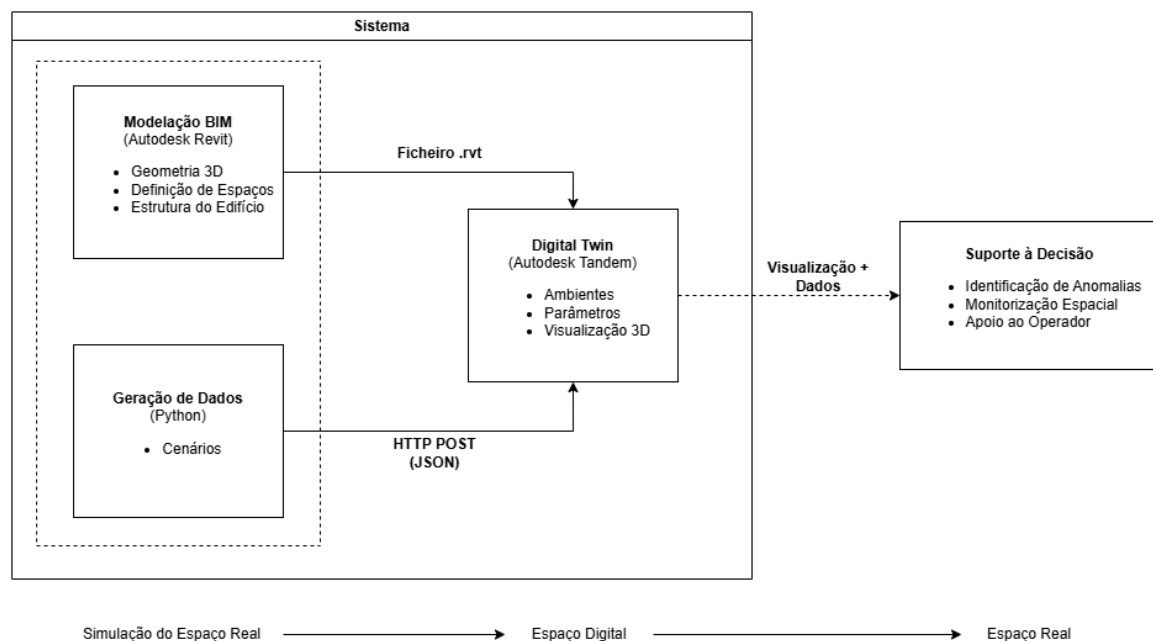


Figura 19 - Arquitetura proposta do sistema

O modelo BIM constitui a base estrutural do sistema, fornecendo a representação geométrica da farmácia e a definição dos diferentes ambientes, o que permite associar informação a localizações físicas concretas e garantir a contextualização espacial dos dados. Por sua vez, a plataforma Tandem assume o papel de camada de integração e visualização, sendo responsável pela receção dos dados, pela sua associação aos ativos definidos e pela sua representação no contexto tridimensional do modelo, funcionando essencialmente como um sistema de agregação de informação, sem capacidade de simulação autónoma. Complementarmente, o sistema de geração de dados em *Python* desempenha a função de motor de simulação, permitindo reproduzir o comportamento dos parâmetros ao longo do tempo com base nos cenários definidos, gerando valores representativos de diferentes condições operacionais e enviando-os para o Tandem através de pedidos HTTP. Este processo assegura a atualização contínua dos parâmetros associados a cada ambiente e estabelece um fluxo de informação unidirecional, no qual os dados são produzidos externamente e posteriormente integrados no DT, evidenciando uma separação clara entre a lógica de geração e a camada de visualização.

Esta abordagem desacoplada reflete práticas comuns em arquiteturas de sistemas complexos, permitindo que cada componente evolua de forma independente, sem comprometer o funcionamento global do sistema. Para além disso, a arquitetura foi

concebida com a possibilidade de integração futura de novas fontes de dados, nomeadamente sistemas reais de aquisição baseados em sensores IoT ou motores de simulação avançados, capazes de modelar com maior rigor o comportamento físico dos sistemas, como ilustrado na Figura 20.

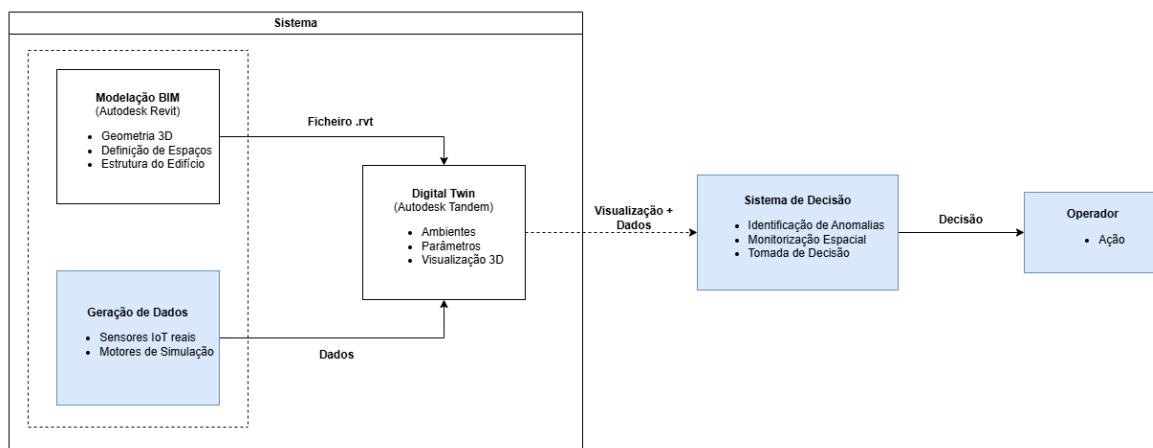


Figura 20 - Arquitetura de possíveis integrações futuras

Esta flexibilidade reforça o carácter evolutivo da solução proposta e a sua aplicabilidade em contextos reais, nomeadamente na gestão de infraestruturas hospitalares. Importa ainda salientar que a informação disponibilizada pelo DT não constitui, por si só, um mecanismo de decisão, mas sim um suporte à mesma, permitindo identificar situações anómalas, analisar tendências e apoiar a atuação dos utilizadores de forma informada. Assim, a arquitetura desenvolvida não só suporta a implementação dos cenários considerados neste trabalho, como também estabelece uma base estruturada para futuras extensões, evidenciando o potencial dos DTs enquanto plataformas integradoras de informação e ferramentas de apoio à análise e tomada de decisão.

A arquitetura apresentada estabelece a base para a implementação dos cenários de estudo, os quais são detalhados no capítulo seguinte, juntamente com o processo de geração de dados e a análise dos resultados obtidos.

4. GERAÇÃO DE DADOS, CENÁRIOS E RESULTADOS

Após a implementação do *Digital Twin*, torna-se necessário definir mecanismos que permitam simular diferentes condições operacionais e analisar o comportamento do sistema, o que é abordado no presente capítulo.

4.1 LIMITAÇÕES E ABORDAGEM ADOTADA

Apesar das capacidades de visualização e contextualização de dados oferecidas pela plataforma Autodesk Tandem, esta não integra mecanismos nativos de simulação ou previsão do comportamento dos sistemas modelados. Em particular, a plataforma não dispõe de um motor físico capaz de calcular, de forma autónoma, a evolução temporal de

variáveis como temperatura, humidade ou consumo energético com base em condições iniciais, interações entre espaços ou influência de variáveis externas.

Esta limitação implica que o Tandem não funcione como uma ferramenta de simulação no sentido tradicional, mas sim como uma camada de integração e visualização de dados. Ou seja, o sistema depende integralmente de fontes externas para a obtenção de informação, não sendo responsável pela sua geração ou modelação. Esta distinção é fundamental para o correto enquadramento da plataforma no contexto dos DTs. No entanto, esta característica não deve ser interpretada como uma limitação crítica, mas sim como uma consequência de uma arquitetura modular, onde diferentes componentes desempenham funções específicas. Neste tipo de abordagem, o DT assume o papel de interface entre o mundo físico (ou simulado) e o utilizador, agregando e contextualizando informação proveniente de múltiplas fontes. Neste contexto, a ausência de um motor de simulação interno exige a definição de uma estratégia alternativa para a análise de cenários. Em aplicações reais, esta função seria tipicamente assegurada por sistemas de aquisição de dados (sensores IoT) ou por ferramentas de simulação energética e ambiental, como motores de cálculo baseados em modelos físicos. Contudo, no âmbito deste trabalho, e considerando a natureza exploratória e demonstrativa do mesmo, optou-se pela utilização de um sistema de geração de dados sintéticos.

A utilização de dados sintéticos permite reproduzir comportamentos plausíveis, mantendo controlo total sobre as condições e facilitando a criação de cenários específicos, incluindo eventos raros ou críticos dificilmente observáveis em condições reais. Esta estratégia isola a geração de dados da sua visualização, clarificando o papel de cada componente: o Tandem funciona exclusivamente como plataforma de integração e representação espacial, enquanto a lógica de simulação é externalizada. Esta separação está alinhada com as práticas adotadas em sistemas de maior escala, e o gerador de dados poderá, no futuro, ser substituído por fontes reais ou motores de simulação mais avançados.

Deste modo, a abordagem adotada não só permite ultrapassar as limitações da plataforma, como também contribui para uma melhor compreensão do papel dos DTs enquanto sistemas integradores, reforçando o enquadramento conceptual do trabalho.

4.2 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS

A definição dos cenários de estudo constitui um elemento central do presente trabalho, uma vez que estabelece o enquadramento para a análise do comportamento do sistema em diferentes condições operacionais. Os cenários foram concebidos com o objetivo de representar situações realistas e relevantes no contexto de uma unidade farmacêutica, permitindo explorar diferentes dimensões de análise, nomeadamente fenómenos físicos, eficiência energética e falhas operacionais.

Ao contrário de abordagens puramente descritivas, os cenários definidos não se limitam à observação de valores isolados, mas procuram representar relações de causa-efeito e dinâmicas temporais, aproximando-se do comportamento esperado em sistemas reais. Esta abordagem permite não só visualizar estados do sistema, mas também compreender a sua evolução e impacto nas condições operacionais.

Neste sentido, foram definidos três cenários distintos, cada um associado a um tipo específico de análise:

1) Impacto de evento físico

O primeiro cenário corresponde a um evento físico que afeta diretamente as condições ambientais no interior da farmácia, nomeadamente a abertura prolongada da porta na zona de atendimento. Esta situação promove a interação entre o ambiente interior e exterior, originando alterações progressivas nos parâmetros ambientais. A lógica subjacente a este cenário baseia-se numa relação de causa-efeito, onde a abertura da porta (causa) conduz à variação da temperatura e da humidade no interior (efeito), podendo ainda implicar um aumento do esforço dos sistemas de climatização. Este cenário permite analisar a sensibilidade do sistema a perturbações externas e identificar áreas mais suscetíveis a variações ambientais, sendo particularmente relevante para a avaliação do conforto térmico e da conservação de produtos.

2) Ineficiência energética e otimização operacional

O segundo cenário foca-se na análise do desempenho energético do sistema, simulando uma situação de funcionamento ineficiente dos equipamentos de climatização. Neste caso, considera-se que o sistema HVAC se encontra ativo mesmo quando as condições ambientais já se encontram dentro dos intervalos desejáveis, originando consumo energético desnecessário. Ao contrário do cenário anterior, este não resulta de um evento físico externo, mas sim de uma condição operacional subótima, associada a uma má gestão ou configuração do sistema. Desta forma, o foco desloca-se da variação de parâmetros ambientais para a análise do consumo energético e da eficiência do sistema. Este cenário permite evidenciar oportunidades de otimização, demonstrando como a monitorização contínua pode contribuir para a identificação de desperdícios energéticos e apoiar a tomada de decisão no sentido da melhoria da eficiência operacional.

3) Falha de sistema e necessidade de manutenção

O terceiro cenário representa uma situação de falha de equipamento, nomeadamente a avaria de um sistema crítico, como um frigorífico utilizado para armazenamento de produtos sensíveis. Neste contexto, a falha do equipamento conduz a uma degradação progressiva das condições de armazenamento, refletida no aumento da temperatura e possível saída dos intervalos aceitáveis. Este cenário insere-se na categoria de manutenção, permitindo analisar o impacto de falhas operacionais e a importância da deteção atempada de situações críticas. A evolução dos parâmetros ao longo do tempo torna possível identificar padrões de degradação e antecipar a necessidade de intervenção. Para além disso, este tipo de cenário evidencia o potencial dos DTs como ferramenta de apoio à manutenção, permitindo uma monitorização contínua e contextualizada dos equipamentos.

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos cenários definidos, classificando-os de acordo com o tipo de análise e o objetivo principal.

Tabela 3 - Definição de cenários

Cenário	Tipo de análise	Descrição conceptual
1	Evento físico	Relação causa → efeito
2	Gestão energética	Otimização e eficiência
3	Falha de sistema	Manutenção e deteção

A definição destes cenários permite abranger diferentes perspetivas de análise no contexto da gestão de unidades hospitalares, demonstrando como a integração de dados num DT pode apoiar a compreensão do comportamento do sistema e contribuir para a tomada de decisão em situações distintas, desde eventos físicos a problemas de eficiência e falhas operacionais.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS CENÁRIOS E GERAÇÃO DE DADOS

A plataforma Autodesk Tandem, apesar de permitir a integração e visualização contextualizada da informação no modelo tridimensional, não dispõe de um motor de simulação física capaz de reproduzir autonomamente o comportamento dinâmico dos espaços. Desta forma, para possibilitar a demonstração prática do funcionamento do *Digital Twin* e a análise dos cenários definidos no presente trabalho, foi necessário desenvolver um sistema externo responsável pela geração de dados e pela sua posterior integração na plataforma.

Para este efeito, foi implementado um script em *Python* que assume a função de motor de simulação do sistema, permitindo reproduzir a evolução temporal dos parâmetros operacionais da farmácia com base em regras heurísticas previamente definidas. Esta abordagem não pretende substituir ferramentas de simulação física rigorosa, como motores energéticos ou sistemas de análise HVAC, mas sim representar de forma coerente

e controlada situações plausíveis de operação, permitindo observar relações de causa-efeito e validar o potencial do *Digital Twin* como ferramenta de monitorização e apoio à decisão. A lógica adotada baseia-se na definição de cenários progressivos, nos quais diferentes variáveis evoluem ao longo do tempo, influenciando o estado geral de cada ambiente. O objetivo não consiste apenas em apresentar valores isolados, mas sim em demonstrar a forma como alterações operacionais, falhas ou ineficiências se propagam no sistema e são refletidas visualmente no *Digital Twin*. Esta metodologia permite uma demonstração mais próxima de uma situação real, em oposição à simples introdução manual de valores arbitrários.

4.3.1 ESTRUTURA DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE DADOS

O sistema desenvolvido foi estruturado de forma modular, permitindo separar a lógica de configuração, a definição dos estados iniciais, a implementação dos cenários e o processo de envio de informação para a plataforma. Esta organização facilita a manutenção do código, a introdução de novos cenários e a adaptação futura a fontes reais de dados.

Numa primeira fase, são definidos os elementos base do sistema, nomeadamente o *endpoint* global de ingestão de dados do Tandem, o *token* de autenticação associado ao *webhook* e o ficheiro CSV exportado da plataforma contendo os identificadores únicos (*fullid*) de cada *connection*. Estes identificadores são fundamentais para garantir que cada conjunto de dados é corretamente associado ao ambiente correspondente dentro do modelo digital. O script realiza automaticamente a leitura deste ficheiro e estabelece a correspondência entre o nome lógico de cada zona e o respetivo identificador interno da plataforma. As zonas consideradas na implementação correspondem aos principais espaços operacionais da farmácia: atendimento, *backoffice*, corredor traseiro, escritório, quarto (devido a ser uma divisão com AC) e pátio exterior. Cada uma destas áreas apresenta características distintas ao nível da ocupação, da exposição ao exterior e da sensibilidade a alterações ambientais, justificando a sua modelação individual e a criação de *connections* dedicadas. Cada ambiente possui a sua própria *connection*, permitindo que os dados sejam enviados de forma independente e associados corretamente aos parâmetros definidos no ativo correspondente dentro do Tandem. Apesar de todas as

zonas utilizarem a mesma estrutura base de parâmetros, os valores enviados diferem de acordo com o comportamento esperado em cada espaço. Esta abordagem permite manter consistência na estrutura de dados e, simultaneamente, representar a individualidade funcional de cada ambiente.

A comunicação entre o sistema externo de geração de dados e a plataforma Tandem é realizada através de pedidos HTTP do tipo POST, utilizando um *payload* em formato JSON enviado para o *endpoint* de ingestão. Em vez de múltiplos pedidos individuais por variável, cada envio contém o conjunto completo de parâmetros de cada ambiente, permitindo atualizar simultaneamente o estado operacional da respetiva zona. Entre os principais parâmetros considerados encontram-se a temperatura ambiente, a humidade relativa, o consumo energético, o estado do ar condicionado, o estado de abertura de portas, a ocupação, a temperatura dos frigoríficos e a temperatura exterior de referência. Para além destes parâmetros físicos, foram ainda introduzidos dois indicadores de estado global: o parâmetro numérico “*General State*” e o parâmetro textual “*State*”, cuja função consiste em sintetizar a condição geral do ambiente e facilitar a interpretação operacional do sistema.

O JSON abaixo apresenta um exemplo simplificado do *payload* utilizado para atualização dos parâmetros de um dos ambientes do DT.

```
{
  "id": "AQAAAHcBgWwBs0TgvvuaS0-_2SsAAAAA",
  "timestamp": 1777203700,
  "temperature": 24.6,
  "humidity": 58,
  "energy": 1320,
  "ac_state": 1,
  "door_open": 1,
  "occupancy": 4,
  "external_temp": 29.5,
  "general_state": 1,
  "state": "Alert"
}
```

Neste exemplo, observa-se a atualização da zona de atendimento, incluindo variáveis ambientais, operacionais e o respetivo estado agregado. A presença do identificador da *connection* e do instante temporal permite garantir a rastreabilidade da informação e a

correta associação ao ambiente correspondente dentro da plataforma. Nem todos os parâmetros são aplicáveis a todas as zonas. O consumo energético, por exemplo, é monitorizado com maior relevância na zona de atendimento, enquanto os parâmetros associados aos frigoríficos pertencem ao ambiente *backoffice*, por corresponder ao espaço de armazenamento de produtos que necessitam de frio. De igual forma, o estado da porta apenas assume relevância em zonas com acesso direto ao exterior ou com influência significativa na circulação interna. Esta diferenciação evita redundância de informação e torna a representação mais coerente com o funcionamento real da farmácia.

4.3.2 DEFINIÇÃO DOS *THRESHOLDS* E CLASSIFICAÇÃO DE ESTADOS

Para permitir a interpretação automática dos valores gerados, foram definidos intervalos de referência (*thresholds*) para os principais parâmetros monitorizados. Estes limites estabelecem fronteiras entre funcionamento normal, situação de alerta e condição crítica, permitindo classificar sistematicamente o estado de cada ambiente e reduzir a necessidade de análise individual de cada variável. A definição destes valores teve como base o comportamento esperado para uma farmácia comunitária, considerando requisitos de conforto térmico, eficiência energética e conservação adequada de medicamentos e restantes produtos. A monitorização não se limita, assim, à observação de desvios físicos, mas também à identificação de situações de operação ineficiente ou de falha funcional.

A Tabela 4 apresenta os valores de referência considerados no presente trabalho.

Tabela 4 - Definição de *thresholds*

Parâmetro	Estado Normal	Estado de Alerta	Estado Crítico
Temperatura ambiente (°C)	20 – 24	18 – 20 / 24 – 26	< 18 ou > 26
Humidade relativa (%)	40 – 60	35 – 40 / 60 – 70	< 35 ou > 70
Consumo energético (W)	500 – 1450	450 – 500 / 1450 – 2000	< 450 ou > 2000

Parâmetro	Estado Normal	Estado de Alerta	Estado Crítico
Temperatura frigorífico (°C)	3 – 5	2 – 3 / 5 – 6	< 2 ou > 6

Estes *thresholds* tiveram que ser então criados e aplicados tanto no *Python* como no Tandem como explícito na Figura 21.

Thresholds					
Parameter	Name	Threshold values			
Energy consumption (W)	Energy threshold	≤ 450	≤ 500	≥ 1450	≥ 2000
Humidity (%)	Hum threshold	≤ 35	≤ 40	≥ 60	≥ 70
Temp Fridge 1 (°C)	Fridge 1 Temp threshold	≤ 2	≤ 3	≥ 5	≥ 6
Temp Fridge 2 (°C)	Temp Fridge 2 threshold	≤ 2	≤ 3	≥ 5	≥ 6
Temperature (°C)	Temp threshold	≤ 18	≤ 20	≥ 24	≥ 26

Figura 21 - Definição de thresholds no Tandem

No caso da temperatura ambiente, foi considerado como intervalo ideal o intervalo compreendido entre 20 °C e 24 °C, sendo definidos níveis de alerta para desvios moderados e níveis críticos para valores com maior impacto operacional. O mesmo princípio foi aplicado à humidade relativa e ao consumo energético, permitindo identificar tanto desconforto térmico como desperdício energético. Particular relevância foi atribuída à temperatura dos frigoríficos localizados no *backoffice*, uma vez que a conservação inadequada de medicamentos pode comprometer diretamente a segurança operacional da unidade. Neste caso, desvios térmicos assumem maior criticidade, justificando *thresholds* mais restritivos. A classificação é realizada através de uma função dedicada que compara cada valor com os respetivos limites e atribui uma severidade: normal (0), alerta (1) ou crítico (2). Posteriormente, é aplicado um mecanismo de agregação por ambiente, no qual o estado mais severo prevalece sobre os restantes. Assim, se qualquer parâmetro se encontrar em estado crítico, o ambiente assume automaticamente essa classificação; caso contrário, a existência de qualquer alerta conduz à classificação intermédia.

Esta lógica permite simplificar a visualização no Tandem e traduz de forma intuitiva a condição geral de cada espaço. Em vez de exigir a análise isolada de múltiplos parâmetros, o utilizador pode identificar rapidamente os ambientes prioritários, utilizando a classificação global como primeiro nível de interpretação.

4.3.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS CENÁRIOS DE DEMONSTRAÇÃO

Após a definição conceptual dos cenários de estudo apresentada na secção anterior, tornou-se necessário traduzir essas situações operacionais num modelo de demonstração capaz de ser reproduzido de forma controlada no sistema de geração de dados. A implementação em *Python* foi desenvolvida com esse objetivo, funcionando como um mecanismo de simulação simplificada responsável por alimentar o DT com dados representativos da evolução de cada cenário.

Embora numa abordagem mais avançada fosse possível recorrer a funções dinâmicas de interação entre variáveis, optou-se neste trabalho por uma estratégia baseada na definição de estados sucessivos previamente estruturados. Esta opção permite garantir maior controlo sobre a demonstração experimental, assegurando que cada cenário evolui exatamente da forma pretendida e que os efeitos observados no DT correspondem de forma clara aos objetivos de análise definidos. Assim, em vez da geração contínua de valores dependentes de relações matemáticas complexas, foram estabelecidos valores fixos para cada parâmetro em diferentes momentos da simulação, representando a progressão natural de cada situação operacional. Esta abordagem não compromete o objetivo do trabalho, uma vez que o foco principal não reside na modelação física rigorosa dos fenómenos, mas sim na demonstração da capacidade do DT para representar visualmente diferentes estados do sistema e apoiar a interpretação operacional.

Cada cenário foi estruturado em quatro etapas progressivas, correspondendo a quatro momentos distintos da sua evolução. O primeiro passo representa a condição inicial ou estado de referência, enquanto os passos seguintes traduzem o agravamento gradual da situação simulada, permitindo observar a transição entre funcionamento normal, estado de alerta e condição crítica. Esta divisão em etapas facilita a análise visual e torna a

demonstração mais robusta do ponto de vista académico, uma vez que permite associar diretamente cada alteração observada à evolução do cenário em estudo. A implementação foi organizada em três funções principais, correspondentes aos três cenários definidos anteriormente: impacto de evento físico, ineficiência energética e falha de sistema. Cada função contém os valores predefinidos para os diferentes parâmetros e respetivos ambientes, atualizando-os de forma coerente com a lógica operacional pretendida. Esta estrutura modular facilita a manutenção do código, a validação dos resultados e a eventual introdução de novos cenários futuros. No primeiro cenário (evento físico), foram definidos aumentos progressivos da temperatura na zona de atendimento, acompanhados por variações mais moderadas no corredor e no backoffice, simulando a propagação térmica para o interior, com aumento correspondente do consumo energético. No segundo cenário (ineficiência energética), a temperatura foi mantida dentro dos intervalos normais, mas o consumo energético foi progressivamente aumentado, demonstrando desperdício operacional sem degradação do conforto térmico. No terceiro cenário (falha de sistema), a temperatura do frigorífico no backoffice foi aumentada de forma controlada em cada etapa, acompanhada pela redução do consumo energético global, reforçando a perceção de falha e a necessidade de intervenção.

Para além das variáveis físicas e operacionais, foi implementado um mecanismo de classificação automática do estado de cada ambiente com base nos *thresholds* definidos na secção anterior. Cada valor enviado é comparado com os respetivos limites de referência, sendo-lhe atribuída uma classificação de severidade: normal, alerta ou crítico. Posteriormente, é aplicado um critério de agregação em que prevalece sempre a condição mais severa observada, permitindo obter um estado global simplificado para cada zona. Esta classificação é representada através de dois parâmetros adicionais: “General State”, de natureza numérica, e “State”, de natureza textual. Estes indicadores permitem sintetizar a condição geral do ambiente e facilitam significativamente a interpretação visual no Tandem, reduzindo a necessidade de análise isolada de cada variável e permitindo a identificação rápida de situações prioritárias.

A execução da demonstração é realizada de forma controlada e sequencial. Após a seleção inicial do cenário pelo utilizador, o primeiro estado é enviado imediatamente para a

plataforma Autodesk Tandem, estabelecendo a condição inicial da simulação. Os passos seguintes são enviados manualmente, permitindo avançar para a etapa seguinte.

Esta abordagem garante maior controle durante a demonstração, permitindo a observação detalhada das alterações em cada fase. Cada envio contém os parâmetros atualizados de todos os ambientes, assegurando a coerência global do sistema e permitindo observar tanto o impacto local do evento simulado como a sua influência sobre as restantes zonas. Desta forma, o script funciona como motor de demonstração operacional, cuja estrutura é compatível com futuras integrações com sensores IoT reais ou motores de simulação avançados, como demonstra a Figura 20.

4.4 RESULTADOS E ANÁLISE

A implementação dos cenários de demonstração e a respetiva integração na plataforma Autodesk Tandem permitiram validar o funcionamento do DT desenvolvido e demonstrar a sua aplicabilidade no contexto da gestão de unidades hospitalares. A visualização contextualizada dos dados no modelo tridimensional possibilitou não apenas a monitorização individual dos parâmetros de cada ambiente, mas também a interpretação espacial das relações entre diferentes zonas da farmácia, evidenciando o potencial da solução como ferramenta de apoio à análise operacional.

Ao contrário de uma abordagem baseada exclusivamente em gráficos ou tabelas isoladas, a utilização do DT permite associar cada valor ao seu espaço físico correspondente, facilitando a identificação imediata da origem de uma anomalia e a compreensão da sua possível propagação para áreas adjacentes. Esta característica constitui uma das principais vantagens da plataforma, uma vez que transforma dados abstratos em informação operacional visualmente interpretável. A análise realizada centrou-se nos três cenários definidos anteriormente, permitindo observar diferentes tipos de comportamento do sistema: perturbações físicas com impacto ambiental, situações de ineficiência energética e falhas operacionais em equipamentos críticos. Em todos os casos, a evolução progressiva dos parâmetros e a atualização do estado global dos ambientes demonstraram a

capacidade do sistema para representar situações distintas e apoiar a identificação de condições prioritárias de intervenção.

4.4.1 CENÁRIO 1 – IMPACTO DE EVENTO FÍSICO

No primeiro cenário foi simulada a abertura prolongada da porta principal da zona de atendimento, promovendo a entrada de ar quente proveniente do exterior e provocando alterações progressivas nas condições térmicas da farmácia. Esta situação permitiu avaliar a sensibilidade da zona de atendimento às condições exteriores e observar a propagação do impacto térmico para os espaços interiores. No estado inicial, correspondente ao primeiro passo da simulação, todos os ambientes se encontravam dentro dos intervalos considerados normais, apresentando condições estáveis de temperatura, humidade e consumo energético. A Figura 22 apresenta esta condição de referência, onde o estado global dos ambientes permanece classificado como normal, mostrando com recurso a este *heatmap* a temperatura de cada ambiente.

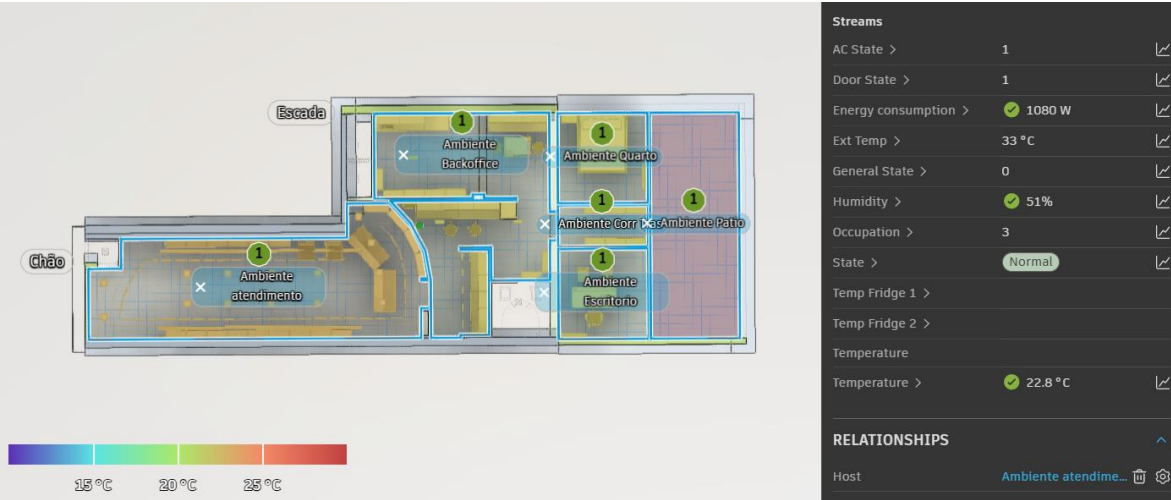


Figura 22 - Temperaturas iniciais do Cenário 1

À medida que a simulação evolui, verifica-se um aumento progressivo da temperatura na zona de atendimento, acompanhado por uma subida moderada no corredor traseiro e no *backoffice*. Esta evolução, evidenciada na Figura 23, reflete a influência da abertura da porta principal e a propagação gradual da carga térmica para os espaços interiores.

Simultaneamente, observa-se um aumento do consumo energético associado ao esforço adicional do sistema de climatização.

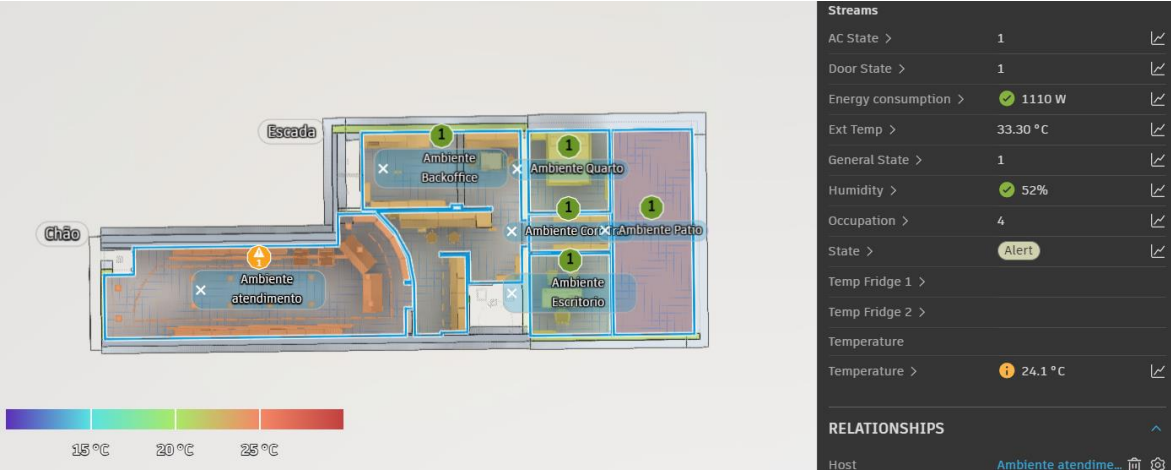


Figura 23 - Etapa Alerta do Cenário 1

Na terceira etapa da simulação, a zona de atendimento atinge o nível de alerta, sendo esta condição refletida tanto nos parâmetros individuais como no estado global do ambiente. A Figura 24 ilustra esta transição, evidenciando a alteração visual no DT e a facilidade de identificação da zona afetada.



Figura 24 - Evolução da Etapa Alerta do Cenário 1

No último passo, ilustrado pela Figura 25, a persistência da condição provoca a aproximação ao estado crítico, reforçando a necessidade de intervenção operacional. Este resultado demonstra como um evento aparentemente simples, como a abertura

prolongada de uma porta, pode gerar impacto relevante no conforto térmico, no consumo energético e na eficiência global da unidade.

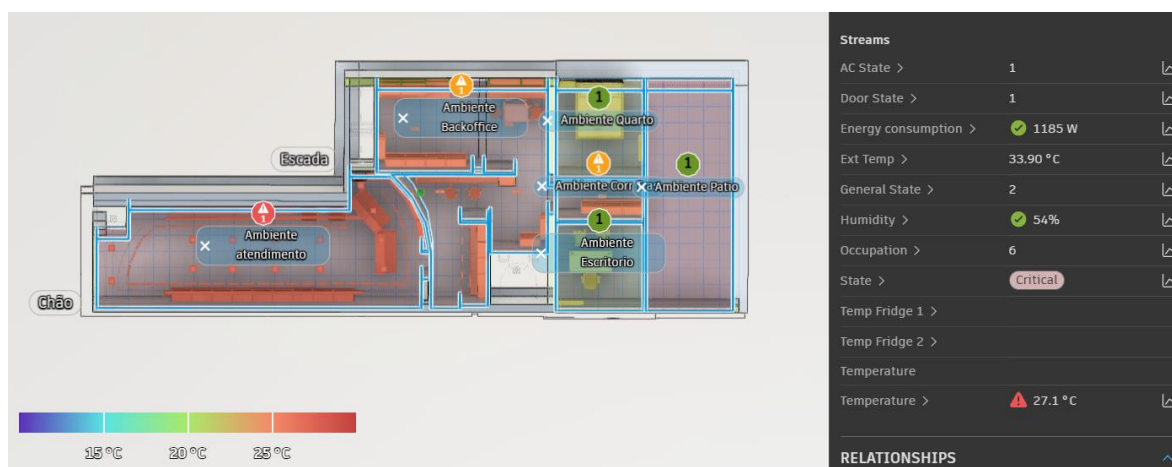


Figura 25 - Etapa Crítica do Cenário 1

A principal contribuição deste cenário reside na demonstração da relação entre causa e efeito e na capacidade do DT para tornar essa relação visualmente evidente, permitindo uma análise espacial que dificilmente seria obtida apenas através de *dashboards* convencionais.

4.4.2 CENÁRIO 2 – INEFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O segundo cenário teve como objetivo demonstrar uma situação de desperdício energético associada ao funcionamento inadequado do sistema de climatização. Neste caso, as condições térmicas mantiveram-se dentro dos intervalos considerados ideais, mas o sistema HVAC permaneceu ativo de forma desnecessária, originando um aumento progressivo do consumo energético. Ao contrário do cenário anterior, não existe aqui uma perturbação física visível no ambiente, mas sim uma ineficiência operacional que apenas se torna evidente através da análise conjunta dos parâmetros. Esta situação evidencia a importância da monitorização contínua e da interpretação integrada da informação. A Figura 26 apresenta o estado inicial deste cenário, onde a temperatura e a humidade permanecem dentro dos valores normais, mas o sistema de climatização já se encontra ativo sem necessidade evidente.

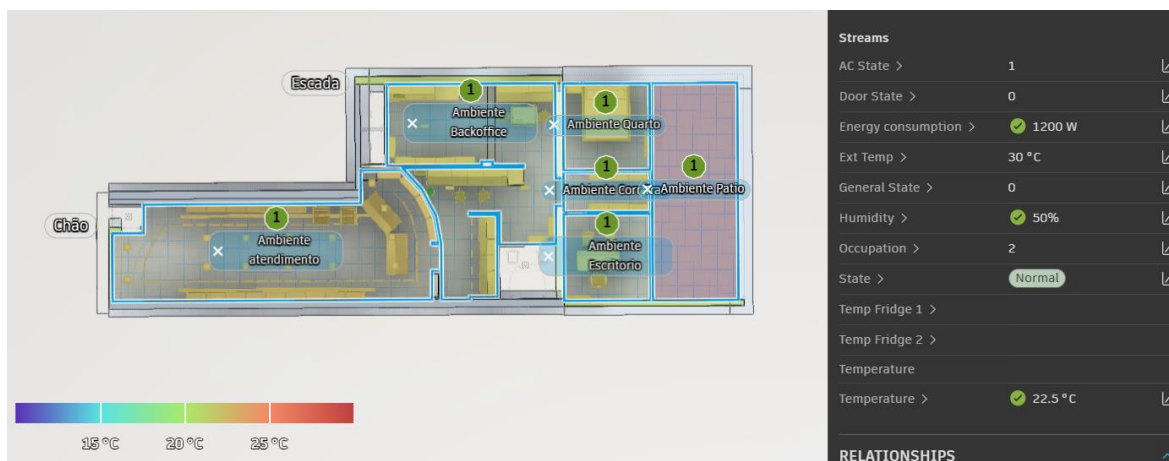


Figura 26 - Estado inicial do Cenário 2

Com a progressão da simulação, o consumo energético continua a aumentar, apesar da estabilidade térmica dos ambientes. Esta discrepância permite identificar uma condição de desperdício que, numa análise exclusivamente térmica, poderia passar despercebida. O estado global do ambiente passa então para alerta, não por desconforto ambiental, mas por ineficiência operacional. A Figura 27 ilustra esta situação, demonstrando como o DT permite cruzar informação de natureza distinta e apoiar decisões relacionadas com otimização energética e redução de custos operacionais.

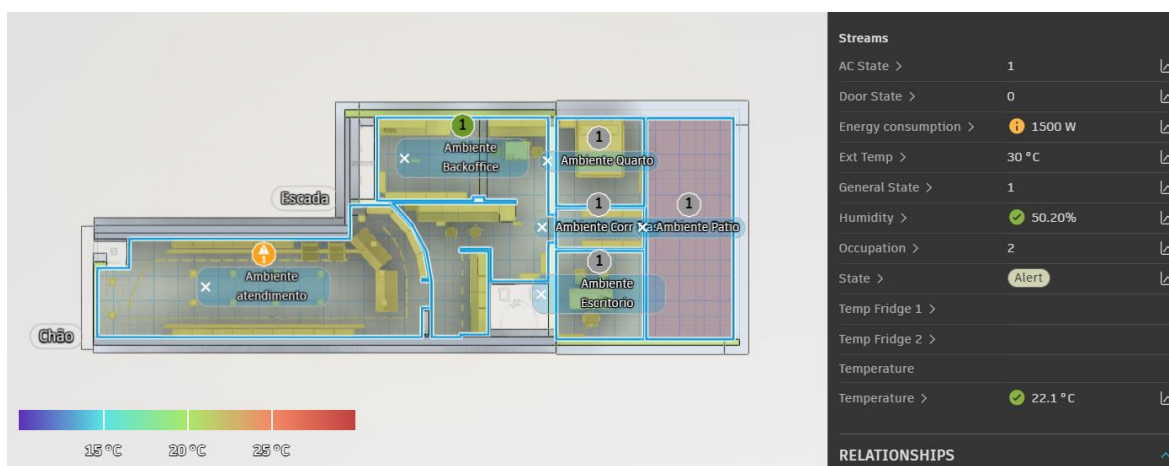


Figura 27 - Identificação de ineficiência energética no Cenário 2

Este cenário reforça a ideia de que a gestão eficiente de uma unidade hospitalar não depende apenas da manutenção de condições ambientais adequadas, mas também da utilização racional dos recursos energéticos disponíveis. A capacidade de identificar desperdícios antes que estes se traduzam em custos significativos representa uma das principais vantagens da abordagem proposta.

4.4.3 CENÁRIO 3 – FALHA DE SISTEMA E MANUTENÇÃO

O terceiro cenário corresponde à simulação de uma falha progressiva num frigorífico localizado no *backoffice*, utilizado para armazenamento de produtos farmacêuticos sensíveis à temperatura. Este cenário assume particular relevância no contexto hospitalar, uma vez que a degradação das condições de conservação pode comprometer diretamente a segurança e a qualidade dos produtos armazenados. No estado inicial, o equipamento encontra-se em funcionamento normal, com temperatura dentro dos limites definidos e sem qualquer indicação de anomalia. A Figura 28 apresenta esta situação de referência no ambiente do *backoffice*.

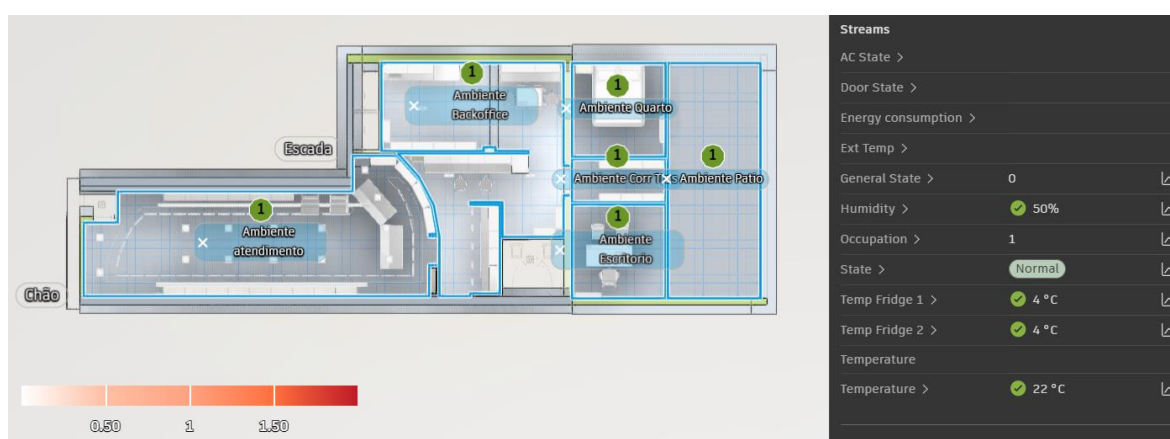


Figura 28 - Estado inicial do Cenário 3 no *backoffice*

Com o avanço da simulação, a temperatura do frigorífico aumenta progressivamente, ultrapassando primeiro o intervalo de normalidade e posteriormente o limite de alerta, até atingir condição crítica. Esta evolução permite observar claramente a deterioração do equipamento e a alteração do estado global do ambiente. A Figura 29 mostra o momento em que o sistema entra em alerta, permitindo identificar visualmente a necessidade de monitorização reforçada e possível intervenção preventiva.

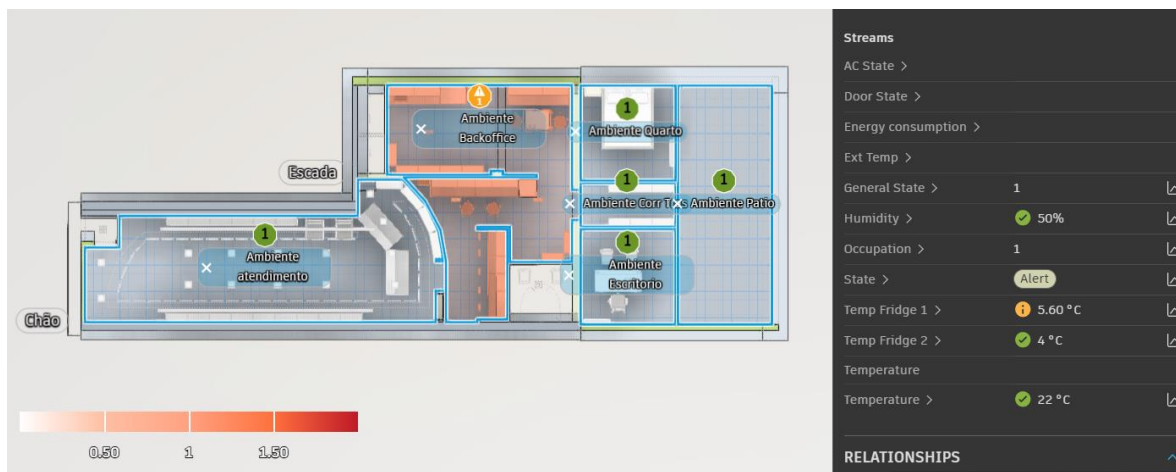


Figura 29 - Estado de alerta no frigorífico 1

Na etapa final, a ultrapassagem do *threshold* crítico conduz à classificação do ambiente como crítico, sinalizando a urgência de atuação. A Figura 30 representa esta condição final e demonstra como o DT pode funcionar como ferramenta de apoio à manutenção e prevenção de falhas.

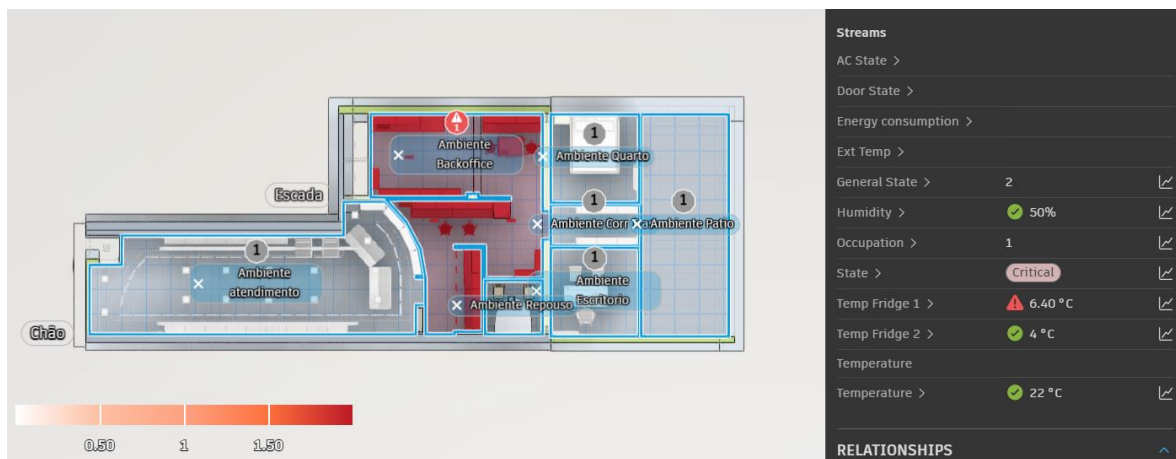


Figura 30 - Estado crítico e necessidade de intervenção no Cenário 3

Este cenário evidencia particularmente o potencial do sistema para suporte à manutenção preventiva, permitindo identificar tendências de degradação antes da ocorrência de falhas irreversíveis. A visualização contínua e contextualizada contribui para reduzir riscos operacionais e aumentar a fiabilidade da infraestrutura.

4.5 DISCUSSÃO E APOIO À DECISÃO

A análise conjunta dos três cenários permite concluir que o valor do DT reside sobretudo na contextualização espacial dos dados operacionais, associando cada indicador diretamente ao ambiente correspondente. Esta capacidade, que supera as limitações de *dashboards* convencionais, assume particular importância em unidades hospitalares, onde a rapidez de resposta e a correta priorização das intervenções podem ter impacto direto na continuidade do serviço e na segurança operacional.

No cenário de impacto de evento físico, verificou-se a capacidade de identificar relações de causa-efeito entre perturbações externas e alterações nas condições interiores. A abertura prolongada da porta principal da zona de atendimento permitiu observar a propagação progressiva da carga térmica para os espaços interiores e o consequente aumento do esforço do sistema de climatização. Esta visualização torna evidente a forma como um evento localizado pode produzir efeitos indiretos noutras áreas da farmácia, permitindo uma análise espacial que dificilmente seria obtida através de ferramentas convencionais de monitorização. No cenário de ineficiência energética, foi possível demonstrar que situações críticas nem sempre estão associadas a desconforto térmico visível. Mesmo mantendo as condições ambientais dentro dos intervalos considerados adequados, o funcionamento desnecessário do sistema HVAC originou um aumento progressivo do consumo energético, revelando uma condição de desperdício operacional. Este cenário reforça a importância da monitorização integrada de diferentes variáveis e evidencia o potencial do DT como ferramenta de apoio à otimização energética e à redução de custos operacionais. Por sua vez, no cenário de falha de sistema, evidenciou-se o potencial da monitorização contínua na deteção precoce de anomalias e no suporte à manutenção preventiva. A degradação progressiva da temperatura do frigorífico localizado no *backoffice* permitiu observar a transição entre estado normal, alerta e condição crítica, demonstrando como a antecipação de falhas pode reduzir riscos operacionais e evitar perdas associadas ao armazenamento inadequado de produtos farmacêuticos sensíveis. Esta capacidade assume elevada relevância em ambientes hospitalares, onde a fiabilidade dos sistemas técnicos é frequentemente determinante para a segurança dos processos.

A utilização de *thresholds* e da classificação automática de estados revelou-se particularmente importante para simplificar a interpretação operacional do sistema. A implementação dos parâmetros “General State” e “State” permitiu converter múltiplas variáveis técnicas numa leitura mais direta e imediata, possibilitando que o utilizador identifique rapidamente quais os ambientes prioritários sem necessidade de análise individual de todos os parâmetros monitorizados. Esta funcionalidade aproxima o sistema de uma solução prática de gestão e não apenas de uma ferramenta de visualização, reforçando a sua utilidade em contextos reais de operação.

Importa, no entanto, reconhecer as limitações já identificadas na Secção 4.1: o Tandem não constitui um motor de simulação, e os resultados baseiam-se em dados sintéticos. Contudo, estas limitações não comprometem o objetivo principal, uma vez que o DT funciona como camada integradora, permitindo a futura substituição do gerador sintético por sensores IoT, motores de simulação energética ou sistemas de manutenção assistida, sem alterações estruturais à arquitetura. O foco do trabalho reside na validação desta arquitetura integradora e na demonstração da sua aplicabilidade prática.

Assim, os resultados obtidos validam a proposta desenvolvida e demonstram que, mesmo numa implementação simplificada, é possível utilizar o DT como ferramenta relevante para a melhoria da gestão de unidades hospitalares. A principal contribuição do trabalho reside precisamente na demonstração de que a combinação entre modelação BIM, DT e monitorização operacional pode constituir uma base sólida para sistemas mais evoluídos, capazes de integrar dados reais, simulação avançada e mecanismos automáticos de apoio à decisão, reforçando o potencial desta abordagem no contexto da gestão hospitalar do futuro.

5. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo principal o desenvolvimento e a avaliação de um modelo de *Digital Twin* aplicado à gestão de espaços de uma farmácia. Através da integração entre modelação BIM, a plataforma Autodesk Tandem e um sistema externo de geração de dados em *Python*, foi possível criar uma arquitetura funcional capaz de representar digitalmente o comportamento operacional de uma farmácia hospitalar e demonstrar a aplicabilidade desta abordagem no apoio à tomada de decisão.

O trabalho desenvolvido permitiu cumprir os objetivos específicos estabelecidos. Em primeiro lugar, procedeu-se ao mapeamento e modelação digital de uma área específica da farmácia, recorrendo ao Autodesk Revit para a construção do modelo BIM e ao Autodesk Tandem como plataforma de *Digital Twin*. Esta modelação constituiu a base estrutural do

sistema, permitindo associar informação operacional a localizações físicas concretas e garantir a contextualização espacial dos dados. Em segundo lugar, realizou-se a integração de dados simulados no modelo digital, através de um sistema externo desenvolvido em *Python*, que gerou e enviou dados representativos de diferentes condições operacionais para a plataforma Tandem via pedidos HTTP. Embora os dados utilizados tenham sido sintéticos, a arquitetura modular implementada demonstrou a viabilidade do fluxo de informação entre sistemas externos e a plataforma de *Digital Twin*, estabelecendo uma base para a futura integração de sensores IoT e fontes de dados reais.

Em terceiro lugar, a avaliação dos benefícios da aplicação do *Digital Twin* foi realizada através da implementação e análise de três cenários de demonstração, que abrangeram diferentes dimensões da gestão hospitalar. O cenário de impacto de evento físico demonstrou a capacidade do sistema para identificar relações de causa-efeito entre perturbações externas e alterações nas condições interiores, evidenciando a sua utilidade na análise do conforto térmico e da eficiência dos sistemas de climatização. O cenário de ineficiência energética revelou que situações críticas de desperdício operacional podem não estar associadas a desconforto térmico visível, reforçando a importância da monitorização integrada de múltiplas variáveis para a otimização dos consumos energéticos. O cenário de falha de sistema demonstrou o potencial da monitorização contínua na deteção precoce de anomalias e no suporte à manutenção preventiva, particularmente relevante em contextos onde a fiabilidade dos equipamentos é determinante para a segurança operacional.

Em todos os cenários, a evolução progressiva dos parâmetros e a classificação automática de estados — normal, alerta e crítico — demonstraram a capacidade do sistema para representar situações distintas e apoiar a identificação de condições prioritárias de intervenção. A utilização de *thresholds* e dos parâmetros "General State" e "State" revelou-se particularmente eficaz na simplificação da interpretação operacional, convertendo múltiplas variáveis técnicas numa leitura direta e imediata.

Relativamente às questões de investigação formuladas, os resultados obtidos permitem apresentar as seguintes respostas. No que respeita à primeira questão — como os *Digital Twins* podem melhorar a gestão e utilização dos espaços de saúde — o trabalho

demonstrou que o principal valor do DT reside na contextualização espacial da informação operacional. Ao contrário de abordagens tradicionais baseadas em *dashboards*, folhas de cálculo ou relatórios isolados, onde os dados surgem frequentemente desagregados do seu contexto físico, o DT permite associar cada informação diretamente ao ambiente correspondente. Esta associação reduz significativamente o esforço de interpretação por parte do utilizador, permitindo identificar de forma imediata onde ocorre uma determinada anomalia, quais os espaços potencialmente afetados e quais as consequências operacionais dessa situação. A representação tridimensional integrada possibilita ainda a análise de relações espaciais entre diferentes zonas, tornando visíveis interações que dificilmente seriam detetadas através de ferramentas convencionais de monitorização.

Quanto à segunda questão — que indicadores devem ser monitorizados em tempo real para apoiar a decisão — os cenários implementados evidenciaram a necessidade de uma abordagem multidimensional. A monitorização isolada de um único parâmetro, como a temperatura, revelou-se insuficiente para captar a totalidade das condições operacionais. Os resultados demonstraram que a combinação de indicadores ambientais (temperatura e humidade relativa), energéticos (consumo do sistema HVAC) e de estado de equipamentos (temperatura de frigoríficos) permite uma avaliação mais completa e fiável do desempenho do sistema. Adicionalmente, a implementação de classificações automáticas de estado, baseadas em *thresholds* predefinidos, revelou-se essencial para transformar dados técnicos em informação interpretável, possibilitando a identificação rápida de situações prioritárias sem necessidade de análise individual de cada parâmetro.

Importa, contudo, reconhecer as limitações inerentes ao trabalho desenvolvido. A principal limitação reside na utilização de dados sintéticos, gerados pelo sistema externo em Python, em substituição de medições provenientes de sensores reais ou de simulações físicas rigorosas. Esta opção, justificada pelo carácter exploratório e demonstrativo da investigação, implica que os valores utilizados não refletem com precisão o comportamento físico real dos sistemas monitorizados. Adicionalmente, a plataforma Autodesk Tandem, embora adequada como camada de integração e visualização, não constitui um motor de simulação autónomo, não dispondo de capacidades nativas de

previsão, análise preditiva ou controlo automatizado. O seu valor reside na agregação e representação contextualizada da informação, sendo necessária a existência de sistemas externos complementares para funcionalidades mais avançadas. Não obstante estas limitações, os resultados obtidos não comprometem o objetivo principal do trabalho, que consistiu em demonstrar a viabilidade da integração entre BIM, *Digital Twin* e monitorização operacional como base para sistemas futuros mais evoluídos.

No que diz respeito a desenvolvimentos futuros, a arquitetura modular do sistema permite a sua evolução em múltiplas direções. A integração de sensores IoT reais constituiria o passo mais imediato, permitindo substituir o gerador de dados sintéticos por fontes de informação contínuas e representativas do comportamento real dos sistemas. Esta transição possibilitaria a validação dos cenários desenvolvidos com dados empíricos e a calibração dos *thresholds* definidos. Paralelamente, a incorporação de motores de simulação energética, como o EnergyPlus, permitiria realizar análises preditivas sobre o impacto de diferentes configurações operacionais no desempenho do edifício. A implementação de algoritmos de aprendizagem automática para deteção de padrões e previsão de falhas representaria um avanço significativo na capacidade de apoio à decisão do sistema. Adicionalmente, a extensão do modelo a outras áreas da farmácia e a integração com plataformas de gestão de manutenção assistida por computador (CMMS) ou sistemas de gestão técnica de edifícios (BMS) permitiriam consolidar o *Digital Twin* como infraestrutura central de gestão operacional.

Em síntese, o presente trabalho contribui para o conhecimento na área dos *Digital Twins* aplicados à gestão de infraestruturas de saúde, demonstrando que, mesmo numa implementação simplificada e exploratória, é possível utilizar esta tecnologia como ferramenta relevante para a melhoria da gestão operacional. A principal contribuição reside na validação de uma arquitetura integradora que combina modelação BIM, plataforma de *Digital Twin* e monitorização operacional, estabelecendo uma base sólida para sistemas mais avançados capazes de incorporar dados reais, simulação física e mecanismos automatizados de apoio à decisão. Os resultados obtidos reforçam o potencial transformador dos *Digital Twins* no contexto da gestão hospitalar, promovendo uma

abordagem mais inteligente, integrada e orientada por dados para a operação e manutenção de infraestruturas de saúde.

Referências

Agnusdei, G. P., Elia, V., & Gnoni, M. G. (2021). Is digital twin technology supporting safety management? A bibliometric and systematic review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/APP11062767>

Alfahmi, M. Z., Elmorsey, S. A., Aburzaizah, R. M., & Almowallad, W. O. (2023). Opportunities and Barriers in the Planning of Hospital Bed Capacity in a Tertiary Care Hospital in Makkah, Saudi Arabia. *Saudi Journal of Health Systems Research*, 3(1–4), 75–84. <https://doi.org/10.1159/000530235>.

Bayraktar Sari, A. O., & Jabi, W. (2024). Architectural spatial layout design for hospitals: A review. *Journal of Building Engineering*, 97, 110835. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.110835>

Carvalho, R., & da Silva, A. R. (2021). Sustainability requirements of digital twin-based systems: A meta systematic literature review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(12), 5519. <https://doi.org/10.3390/APP11125519>

Cespedes-Cubides, A. S., & Jradi, M. (2024). A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. *Energy Informatics*, 7(1), 1–31. <https://doi.org/10.1186/S42162-024-00313-7/FIGURES/7>

Crowe, S., Cresswell, K., Robertson, A., Hubby, G., Avery, A., & Sheikh, A. (2011). The case study approach. *BMC Medical Research Methodology*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-11-100/TABLES/9>

Cumo, F., Anna, |, Giovenale, M., Pennacchia, E., & Tiburcio, V. A. (2025). Towards a Healthier Hospital Environment: The Role of Digital Twins in Achieving Optimal Environmental Comfort. *Digital Twins and Applications*, 2(1), e70002. <https://doi.org/10.1049/DGT2.70002>

de Masi, R. F., del Regno, N., Gigante, A., Ruggiero, S., Russo, A., Tariello, F., & Vanoli, G. P. (2023). The Importance of Investing in the Energy Refurbishment of Hospitals: Results of a

Case Study in a Mediterranean Climate. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 11450, 15(14), 11450. <https://doi.org/10.3390/SU151411450>

de Oliveira El-Warrak, L., & Miceli de Farias, C. (2025). Could digital twins be the next revolution in healthcare? *European Journal of Public Health*, 35(1), 19–25. <https://doi.org/10.1093/EURPUB/CKAE191>

de Vries, K. (2020). Case study methodology. *Critical Qualitative Health Research: Exploring Philosophies, Politics and Practices*, 41–52. <https://doi.org/10.4324/9780429432774-2/CASE-STUDY-METHODOLOGY-KAY-DE-VRIES>

Digital Twins: A New Era for ICU Decision-Making | ORS. (n.d.). Retrieved October 26, 2025, from <https://www.theorsociety.com/ORS/ORS/About-OR/News/New-Era-Decision-Making.aspx>

Directive - 2022/2555 - EN - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved October 19, 2025, from <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2555/oj>

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>

Grieves, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, 1(2014), 1-7.

Han, Y., Li, Y., Li, Y., Yang, B., & Cao, L. (2023). Digital twinning for smart hospital operations: Framework and proof of concept. *Technology in Society*, 74, 102317. <https://doi.org/10.1016/J.TECHSOC.2023.102317>

Harode, A., Thabet, W., Jamerson, W. E., & Dongre, P. (2023). A tool-based system architecture for a digital twin: A case study in a healthcare facility. *Journal of Information Technology in Construction*, 28, 107–137. <https://doi.org/10.36680/J.ITCON.2023.006>

Iadanza, E., & Luschi, A. (2019). An integrated custom decision-support computer aided facility management informative system for healthcare facilities and analysis. *Health and Technology* 2019 10:1, 10(1), 135–145. <https://doi.org/10.1007/S12553-019-00377-6>

Inamdar, A., van Driel, W. D., & Zhang, G. (2024). Digital Twin Technology—A Review and Its Application Model for Prognostics and Health Management of Microelectronics. *Electronics* 2024, Vol. 13, Page 3255, 13(16), 3255. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS13163255>

Index - FHIR v5.0.0. (n.d.). Retrieved October 19, 2025, from <https://hl7.org/FHIR/>

ISO 19650-1:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles. (n.d.). Retrieved October 19, 2025, from <https://www.iso.org/standard/68078.html>

ISO/IEC 27001:2022 - Information security management systems. (n.d.). Retrieved October 19, 2025, from <https://www.iso.org/standard/27001>

Jiang, F., Xie, H., Gandla, S. R., & Fei, S. (2025). Transforming Hospital HVAC Design with BIM and Digital Twins: Addressing Real-Time Use Changes. *Sustainability* 2025, Vol. 17, Page 3312, 17(8), 3312. <https://doi.org/10.3390/SU17083312>

Johansson, R. (2007). On Case Study Methodology. *Open House International*, 32(3), 48–54. <https://doi.org/10.1108/OHI-03-2007-B0006>

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/J.CIRPJ.2020.02.002>

Kibira, D., & Shao, G. (2023). Data Requirements for A Digital Twin of A Robot Workcell. *Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference*, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10408428>

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2018.08.474>

Kuruppu Appuhamilage, G. D. K., Hussain, M., Zaman, M., & Ali Khan, W. (2025). A health digital twin framework for discrete event simulation based optimised critical care

workflows. *Npj Digital Medicine*, 8(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/S41746-025-01738-4>;SUBJMETA

Lavy, S., & Shohet, I. M. (2004). Integrated maintenance management of hospital buildings: a case study. *Construction Management and Economics*, 22(1), 25–34. <https://doi.org/10.1080/0144619042000186031>

Lee, Y. ;, Choi, M. H. ;, Song, Y.-S. ;, Lee, J.-G. ;, Park, J. Y. ;, Li, K.-J., Lee, Y., Choi, M. H., Song, Y.-S., Lee, J.-G., Park, J. Y., & Li, K.-J. (2024). Building an Indoor Digital Twin—A Use-Case for a Hospital Digital Twin to Analyze COVID-19 Transmission. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2024, Vol. 13, Page 460, 13(12), 460. <https://doi.org/10.3390/IJGI13120460>

Lee, E. L. S., Barrett, M., Prince, K., Oborn, E., Li, O., & Thomas, P. (n.d.). Digital Twins and Service Innovation in Designing the Hospital of the Future.

Lei n.o 58/2019 | DR. (n.d.). Retrieved October 19, 2025, from <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/lei/58-2019-123815982>

Li, C., Wang, J., Wang, S., & Zhang, Y. (2024). A review of IoT applications in healthcare. *Neurocomputing*, 565, 127017. <https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2023.127017>

Liu, A., Ma, Y., Miller, W., Xia, B., Zedan, S., & Bonney, B. (2022). Energy Analysis and Forecast of a Major Modern Hospital. *Buildings* 2022, Vol. 12, Page 1116, 12(8), 1116. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12081116>

Moretti, N., Chan, Y. C., Nakaoka, M., Mukherjee, A., Merino, J., & Parlikad, A. K. (2025). Data integration for space-aware Digital Twins of hospital operations. *Automation in Construction*, 176, 106276. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2025.106276>

Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2017.07.198>

Noeikham, P., Buakum, D., & Sirivongpaisal, N. (2024). Architecture designing of digital twin in a healthcare unit. *Health Informatics Journal*, 30(4). <https://doi.org/10.1177/14604582241296792>

Park, H. S., Kim, S. H., Bong, M. R., Choi, D. K., Kim, W. J., Ku, S. W., Ro, Y. J., & Choi, I. C. (2020). Optimization of the Operating Room Scheduling Process for Improving Efficiency in a Tertiary Hospital. *Journal of Medical Systems*, 44(9). <https://doi.org/10.1007/S10916-020-01644-0>

Peng, Y., Zhang, M., Yu, F., Xu, J., & Gao, S. (2020). Digital Twin Hospital Buildings: An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1), 8846667. <https://doi.org/10.1155/2020/8846667>

Popa, E. O., van Hilten, M., Oosterkamp, E., & Bogaardt, M. J. (2021). The use of digital twins in healthcare: socio-ethical benefits and socio-ethical risks. *Life Sciences, Society and Policy* 2021 17:1, 17(1), 1–25. <https://doi.org/10.1186/S40504-021-00113-X>

Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*, 6, 3585–3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>

Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2019). Digital Twin: Values, Challenges and Enablers. <https://arxiv.org/pdf/1910.01719>

Regulation - 2016/679 - EN - gdpr - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved October 19, 2025, from <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj>

Regulation - 2017/745 - EN - Medical Device Regulation - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved October 19, 2025, from <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/745/oj>

Regulation - EU - 2024/1689 - EN - EUR-Lex. (n.d.). Retrieved October 19, 2025, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024R1689>

Rovati, L., Gary, P. J., Cubro, E., Dong, Y., Kilickaya, O., Schulte, P. J., Zhong, X., Wörster, M., Kelm, D. J., Gajic, O., Niven, A. S., & Lal, A. (2023). Development and usability testing of a

patient digital twin for critical care education: a mixed methods study. *Frontiers in Medicine*, 10, 1336897. <https://doi.org/10.3389/FMED.2023.1336897/BIBTEX>

Sieve, R., Kobialka, P., Slaughter, L., Schlatter, R., Johnsen, E. B., & Tarifa, S. L. T. (2025). BedreFlyt: Improving Patient Flows through Hospital Wards with Digital Twins. *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science, EPTCS*, 418, 1–15. <https://doi.org/10.4204/EPTCS.418.1>

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchey, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation* 2021, Vol. 4, Page 36, 4(2), 36. <https://doi.org/10.3390/ASI4020036>

Slama, D. (2023). Digital twin 101. *The Digital Playbook: A Practitioner's Guide to Smart, Connected Products and Solutions with AIoT*, 33–44. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88221-1_4/FIGURES/10

Song, Y., & Li, Y. (2022). Digital Twin Aided Healthcare Facility Management: A Case Study of Shanghai Tongji Hospital. *Construction Research Congress 2022: Computer Applications, Automation, and Data Analytics - Selected Papers from Construction Research Congress 2022*, 2-B, 1145–1155. <https://doi.org/10.1061/9780784483961.120>

Sustainability Practices in Hospitals - Health Procurement Africa. (n.d.). Retrieved November 8, 2025, from <https://portal.healthprocurementafrica.org/learning/knowledge-library/sustainability-practices-in-hospitals>

Tahmasebinia, F., Lin, L., Wu, S., Kang, Y., & Sepasgozar, S. (2023). Exploring the Benefits and Limitations of Digital Twin Technology in Building Energy. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 8814, 13(15), 8814. <https://doi.org/10.3390/APP13158814>

Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 5(4), 653–661. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2019.01.014>

Trauer, J., Schweigert-Recksiek, S., Engel, C., Spreitzer, K., & Zimmermann, M. (2020). What is a digital twin? - Definitions and insights from an industrial case study in technical product

development. Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, 1, 757–766.
<https://doi.org/10.1017/DSD.2020.15>

Turgay, S., Güneş, A., Torkul, Y. E., & Torkul, B. (2023). Designing and Implementing Effective Hospital Capacity Management Systems with SEM Analysis. *Social Medicine and Health Management*, 4(4), 37–46. <https://doi.org/10.23977/SOCMHM.2023.040406>

Vahdat, V., Namin, A., Azghandi, R., & Griffin, J. (2019). Improving patient timeliness of care through efficient outpatient clinic layout design using data-driven simulation and optimisation. *Health Systems*, 8(3), 162–183.
<https://doi.org/10.1080/20476965.2018.1561160;ISSUE:ISSUE:DOI>

Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2013.10.023>