



Artigo Original

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v19n22025p270-286

Submetido em: 30 set. 2025

Aceito em: 02 dez. 2025

Hospitais resilientes e autossuficientes: uma análise da integração entre tecnologias emergentes e sustentabilidade

Resilient and self-sufficient hospitals: an analysis of the integration between emerging technologies and sustainability

Hospitales resilientes y autosuficientes: un análisis de la integración entre tecnologías emergentes y sostenibilidad

João Paulo Lucchetta Pompermaier  <https://orcid.org/0000-0001-5994-5744>

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil.

E-mail: joaopaulopompermaier@gmail.com

Elza Maria Alves Costeira  <https://orcid.org/0000-0002-5635-4989>

Associação Brasileira para o Desenvolvimento do Edifício Hospitalar (ABDEH)

Doutora em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

E-mail: ecosteira@uol.com.br

Patrícia Biasi Cavalcanti  <https://orcid.org/0000-0003-0565-3871>

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Doutora em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Professora Associada do Departamento de Expressão Gráfica, Centro de Comunicação e Expressão, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

E-mail: patibiasi@yahoo.com

Resumo: Diante dos desafios globais decorrentes da degradação ambiental e das mudanças climáticas, torna-se essencial repensar a forma como os hospitais são projetados, construídos e operados, buscando soluções sustentáveis e resilientes que minimizem impactos ambientais sem comprometer a qualidade dos cuidados. Este estudo busca discutir como a integração de tecnologias emergentes e os princípios de sustentabilidade podem contribuir para o desenvolvimento de hospitais resilientes e autossuficientes no futuro. O estudo se divide em revisão bibliográfica da literatura nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus* e estudo de caso teórico do *Al Daayyan Health District*, localizado em Doha, Catar. O projeto exemplifica estratégias importantes para o planejamento de edificações hospitalares sustentáveis, resilientes e autossuficientes. Espera-se que os hospitais do futuro integrem tecnologias emergentes, sustentabilidade e princípios de resiliência para enfrentar desafios globais, garantindo a eficiência operacional e a qualidade na prestação de serviços de saúde em diferentes contextos.

Palavras-chave: Arquitetura hospitalar. Hospital do futuro. Tecnológico. Resiliente. Autossuficiente.

Abstract: In the face of global challenges arising from environmental degradation and climate change, it has become essential to rethink the way hospitals are designed, constructed, and operated, seeking sustainable and resilient solutions that minimize environmental impacts without compromising the quality of care. This study aims to discuss how the integration of emerging technologies and sustainability principles can contribute to the development of resilient and self-sufficient hospitals of the future. The research comprises a literature review conducted in the Web of Science and Scopus databases, as well as a theoretical case study of the Al Daayan Health District, located in Doha, Qatar. The project exemplifies key strategies for planning sustainable, resilient, and self-sufficient hospital facilities. It is anticipated that future hospitals will integrate emerging technologies, sustainability, and resilience principles to address global challenges, ensuring operational efficiency and the quality of healthcare delivery across diverse contexts.

Keywords: Healthcare architecture. Hospital of the future. Technological. Resilient. Self-sufficient.

Resumen: Ante los desafíos globales derivados de la degradación ambiental y del cambio climático, resulta esencial replantear la manera en que los hospitales son diseñados, construidos y operados, buscando soluciones sostenibles y resilientes que minimicen los impactos ambientales sin comprometer la calidad de la atención. Este estudio tiene como objetivo analizar cómo la integración de tecnologías emergentes y los principios de sostenibilidad pueden contribuir al desarrollo de hospitales resilientes y autosuficientes en el futuro. La investigación se estructura en una revisión bibliográfica de la literatura en las bases de datos Web of Science y Scopus, así como en un estudio de caso teórico del Al Daayan Health District, ubicado en Doha, Catar. El proyecto ejemplifica estrategias relevantes para la planificación de edificaciones hospitalarias sostenibles, resilientes y autosuficientes. Se espera que los hospitales del futuro integren tecnologías emergentes, sostenibilidad y principios de resiliencia para enfrentar los desafíos globales, garantizando la eficiencia operativa y la calidad en la prestación de los servicios de salud en diferentes contextos.

Palabras clave: Arquitectura hospitalaria. Hospital del futuro. Tecnológico. Resiliente. Autosuficiente.

1 Introdução

As ações humanas e a globalização descontrolada têm levado muitos ecossistemas globais ao extremo. A humanidade está excedendo os limites de um planeta saudável, resultando em uma série de desafios que incluem: mudanças climáticas, perda da biodiversidade, escassez de recursos naturais, poluição do ar, da água e do solo, degradação dos ecossistemas, insegurança alimentar e hídrica, além do aumento das desigualdades sociais e dos impactos das pandemias.

O conceito de limites planetários proposto por pesquisadores do *Stockholm Resilience Centre* [Centro de Resiliência de Estocolmo] da *Stockholm University* se caracteriza por um conjunto de nove limites seguros para a humanidade. Em 2023, uma equipe de cientistas quantificou, pela primeira vez, os nove processos que regulam a estabilidade e a resiliência do sistema terrestre, e em 2025 sete deles já foram transgredidos. Os nove limites planetários são: mudança climática, integridade da biosfera, mudança no sistema terrestre, uso de água doce, ciclos biogeoquímicos, acidificação dos oceanos, carga de aerossóis atmosféricos, depleção da camada de ozônio estratosférico e novas entidades. Desses, já foram ultrapassados os limites de mudança climática, integridade da biosfera, mudança no sistema terrestre, uso de água doce, ciclos biogeoquímicos, acidificação dos oceanos e novas entidades (SRC, 2025). Ultrapassar esses limites pode elevar o risco de provocar alterações abruptas e irreversíveis em larga escala. Embora essas mudanças não ocorram de forma imediata, a soma desses limites representa um ponto crítico que intensifica os riscos para as populações e para os ecossistemas dos quais dependemos (Richardson *et al.*, 2023; SRC, 2023).

Já o conceito de saúde planetária reconhece que a saúde humana e o bem-estar da civilização dependem diretamente de ecossistemas equilibrados e da gestão responsável dos recursos naturais (Horton; Lo, 2015).

No entanto, a degradação ambiental atinge níveis sem precedentes, comprometendo a estabilidade desses sistemas e ampliando as ameaças à saúde global. Vivenciamos um cenário de incertezas expostos a eventos inesperados, exigindo respostas urgentes e transformadoras para mitigar riscos e garantir a proteção das gerações presentes e futuras (Whitmee *et al.*, 2015).

Diante disso, é necessário repensar não apenas as ações humanas, mas também a forma como as edificações são projetadas, construídas e operadas. Hospitais, em específico, são edificações ambientalmente impactantes, especialmente devido à alta demanda por energia e água, além da geração de resíduos (Eckelman; Sherman; 2016; Lenzen *et al.*, 2020; Zioni, 2019). Entretanto, é inegável que tais locais exercem um papel vital para sustentar e melhorar o bem-estar humano diante dos mais diversos contextos globais. Por isso há um movimento crescente pela busca de alternativas sustentáveis e inteligentes na arquitetura para os hospitais.

Há diversas questões que ainda precisam ser investigadas e aprofundadas em pesquisas científicas, as quais certamente poderão contribuir para o avanço da área, entre elas: Como a arquitetura hospitalar pode equilibrar a complexidade funcional com a redução do impacto ambiental? Como o planejamento dos hospitais pode mitigar seu impacto sobre o meio ambiente e assegurar sua resiliência de operação mesmo em situações ambientais e climáticas adversas? Como a escolha de materiais e técnicas construtivas pode influenciar a eficiência energética e a redução de resíduos hospitalares? Como projetar hospitais resilientes que possam enfrentar crises sanitárias, climáticas e energéticas sem comprometer a qualidade dos cuidados? Não se pretende neste estudo responder a todas elas, mas permeá-las, introduzindo aspectos sobre a relação entre a sustentabilidade e o futuro da arquitetura hospitalar.

Busca-se neste estudo discutir como a integração de tecnologias emergentes e princípios de sustentabilidade podem contribuir para o desenvolvimento de hospitais cada vez mais resilientes e autossuficientes. Será apresentado também um estudo de caso teórico do *Al Daayan Health District* [Distrito de Saúde de *Al Daayan*], localizado em Doha (Catar), a fim de identificar estratégias para concepção de unidades de saúde preparadas para os desafios do presente e do futuro.

2 Revisão da Literatura

Como serão os hospitais do futuro? A resposta para essa pergunta permanece uma incógnita intrigante, desafiando a capacidade de previsão em meio às incertezas da atualidade. Por outro lado, envolve uma abordagem ampla e integrada da sustentabilidade, que contempla desde a concepção e a construção dos edifícios até sua operação a longo prazo e sua capacidade de resistir a crises ambientais e sanitárias. A rápida evolução tecnológica, as mudanças demográficas e ambientais e a crescente demanda por serviços de saúde têm impactado significativamente as edificações hospitalares, que devem assegurar as necessidades das gerações futuras (De Oliveira; De Oliveira, 2022; Lopes *et al.*, 2018).

Nos últimos anos os hospitais têm buscado reduzir sua pegada ambiental implementando iniciativas de desenvolvimento sustentável visando atingir um triplo objetivo: ser socialmente equitativo, economicamente viável e ecologicamente sustentável (Lallemant, 2024). A sustentabilidade deve pautar o desenvolvimento de projetos arquitetônicos visando questões atuais e futuras, buscando minimizar os impactos humanos sobre o planeta e seus recursos. Por meio dela, define-se que uma construção sustentável “teve na sua concepção, construção e operação os conceitos e procedimentos reconhecidos como sustentabilidade ambiental, proporcionando benefícios à saúde e bem-estar das pessoas, gerando economias nos processos” (Bross, 2013, p. 172).

Para atingir esse objetivo, os hospitais do futuro devem ser concebidos como espaços resilientes e autossuficientes, capazes de responder a desafios complexos, como mudanças climáticas, crises sanitárias e pressões econômicas. As emissões de gases de efeito estufa, o aquecimento do planeta, as mudanças climáticas e as ondas de calor estão aumentando em número e intensidade, agravando as condições de habitabilidade e tornando populações mais vulneráveis a problemas de saúde e a desastres ambientais. Em consequência, aumentam também a probabilidade de picos de demanda por serviços de saúde (por exemplo, doenças relacionadas ao calor, surtos de doenças transmitidas por vetores, e vítimas de eventos extremos) e os riscos de interrupção das operações hospitalares (por exemplo, falhas de energia, ruptura de cadeias de suprimento, absenteísmo de profissionais). Por isso, estruturas vitais como hospitais precisam ser repensadas para garantir operação ininterrupta e maior capacidade de resposta em crises, demandas que implicam em soluções de resiliência e autossuficiência no projeto arquitetônico e nas operações (Tuxhari; Veizaj, 2015).

Ao explorar de forma descontrolada os recursos da natureza, a humanidade tem impulsionado padrões altamente injustos, ineficientes e insustentáveis de consumo de recursos (Whitmee *et al.*, 2015). Os sistemas de saúde podem representar de 1% a 5% do impacto global sobre o meio ambiente, sendo que em alguns países esse percentual pode ser ainda superior (Lenzen *et al.*, 2020). Se o setor de saúde fosse um país, seria o quinto maior poluidor do planeta (HCWH, 2019). Não seria lógico pensar que todos os edifícios que cuidam da saúde humana deveriam cuidar também do ambiente natural? (Tuxhari; Veizaj, 2015). “As crises ecológicas têm impacto na saúde pública e, paradoxalmente, a assistência médica também gera danos ambientais prejudiciais à saúde” (Lallemant, 2024, n.p.).

Esse novo paradigma exigirá a redução do uso de materiais convencionais, como concreto e aço, incentivando a adoção de tecnologias emergentes, como a impressão 3D, que possibilitará edificações mais eficientes e com menor impacto ambiental. Além disso, a incorporação de materiais sustentáveis e de baixo carbono pode favorecer a criação de ambientes mais resilientes, ao reduzir a dependência de recursos finitos e ampliar a durabilidade das edificações, mantendo-se alinhada aos princípios da economia circular e ao uso responsável dos recursos naturais (Pascale; Achour, 2024; Sebire *et al.*, 2025a). Essa concepção ampliada dos hospitais do futuro buscará otimizar o equilíbrio entre infraestrutura e eficiência energética, consolidando-se como um modelo de edificação de saúde ambientalmente responsável e regenerativa.

A evolução tecnológica tem possibilitado o aparecimento e o desenvolvimento de novos materiais que surgem com novas aplicabilidades e/ou funções (Carvalho, 2015). Esses materiais são um facilitador, contribuindo com o processo de construção e de acabamento das edificações hospitalares. A nanotecnologia e a impressão 3D desencadearam o desenvolvimento de materiais inteligentes e capazes de atender os requisitos técnicos específicos, impulsionando as práticas sustentáveis.

Além da sustentabilidade na construção, os hospitais do futuro deverão incorporar sistemas inteligentes de gerenciamento que otimizem o uso de energia, racionalizem o consumo de água e minimizem a produção de resíduos hospitalares, ao mesmo tempo, em que promovam a mitigação climática (Sebire *et al.*, 2025b). Espera-se também que os hospitais não apenas incorporem a sustentabilidade e a resiliência climática como valores essenciais, mas também adotem uma abordagem inovadora na gestão hospitalar, alinhada às demandas impostas pelas mudanças climáticas. As edificações deverão ser projetadas para operar com emissões zero de carbono, utilizando exclusivamente fontes de energia renováveis e integrando tecnologias avançadas de coleta e otimização do consumo energético (Pascale; Achour, 2024).

Essas estratégias de eficiência não apenas reduzem o impacto ambiental, como também fortalecem a capacidade dos sistemas de saúde de manter suas operações em situações de crise. Espera-se, portanto, que essas edificações sejam completamente resilientes, reforçando o papel vital dos hospitais nos cuidados de saúde (Sebire *et al.*, 2025b). Nesse sentido, é essencial que a arquitetura permita a flexibilidade necessária para reorganização da estrutura e das instalações quando necessário (Sebire *et al.*, 2025a).

As futuras organizações hospitalares devem promover o bem-estar ao mesmo tempo, em que salvaguardam comunidades por meio de edifícios com capacidades resilientes (Rechel *et al.*, 2009). Os hospitais devem suportar os riscos ambientais e pandemias sem comprometer os cuidados e a segurança dos pacientes durante eventos adversos. Algumas considerações importantes para o projeto de hospitais do futuro incluem o aumento das comorbidades múltiplas e as mudanças no perfil epidemiológico e demográfico, associados às mudanças nas tecnologias que estão alterando o modo como os serviços de saúde são prestados para a população (Sebire *et al.*, 2025b).

Os hospitais existentes deverão ser adaptados para atender aos princípios de baixo carbono e de eficiência energética, tornando seus espaços flexíveis e preparados para futuras transformações, sem a necessidade de novas construções (Pascale; Achour, 2024). Dessa forma, os hospitais do futuro não apenas deverão minimizar seu impacto ambiental, mas também se tornarão modelos de infraestrutura sustentável e adaptável, promovendo um equilíbrio entre inovação, resiliência e preservação dos recursos naturais.

3 Material e Método

O estudo se divide em duas fases metodológicas: (I) revisão bibliográfica da literatura e (II) estudo de caso teórico. A Fase I foi conduzida com o objetivo de responder à seguinte pergunta de pesquisa: Como a

integração de tecnologias emergentes e princípios de sustentabilidade podem contribuir para o desenvolvimento de hospitais resilientes e autossuficientes no futuro?

A busca pelos estudos foi realizada nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, sem delimitação de ano ou idioma, a fim de abarcar a maior quantidade possível de evidências disponíveis. As estratégias de busca foram elaboradas com o uso de operadores *booleanos* e combinações de termos relacionados aos principais eixos da pesquisa: (hospital) AND (technology OR technologies) AND (*sustainability OR sustainable*). A revisão buscou integrar diferentes abordagens teóricas e empíricas, contribuindo para a construção de uma síntese capaz de fornecer subsídios para as discussões sobre o tema.

Na Fase II foi realizado um estudo de caso teórico do *Al Daayan Health District* [Distrito de Saúde de *Al Daayan*], localizado em Doha (Catar). O distrito de saúde projetado pelo *Office for Metropolitan Architecture* (OMA) em parceria com a Buro Happold foi selecionado para estudo por se caracterizar como um hospital do futuro, “um protótipo de hospital que responde à rápida mudança do campo médico por meio do potencial de modularidade, pré-fabricação e automação” (Stouhi, 2022, n.p.).

O estudo de caso teórico foi conduzido com base na análise de informações extraídas de matérias jornalísticas disponíveis na internet e de vídeos de apresentação do projeto publicado no YouTube. Esse processo envolveu a seleção de fontes confiáveis, considerando sites de relevância e conteúdos audiovisuais que detalham a concepção e impacto do projeto estudado. A partir desses materiais, foram identificados e interpretados os principais aspectos do caso.

4 Estudo de Caso

Para repensar o futuro dos hospitais é necessário refletir sobre os modelos existentes e imaginar as novas possibilidades de *design*. Nesse contexto, Buro Happold, um dos idealizadores do projeto do hospital, objeto deste estudo, destaca: “O que deveria ser o hospital do futuro? Deveria ser meramente uma melhoria em modelos existentes, ou deveríamos de fato começar do zero e repensar o *design* do hospital para as necessidades de saúde do amanhã?” (Happold, 2023, tradução nossa).

O vídeo de apresentação da proposta para o *Al Daayan Health District* apresenta algumas reflexões sobre o futuro da arquitetura hospitalar:

A inovação médica está avançando exponencialmente, deixando os hospitais para se atualizarem constantemente. Instalações de última geração estão sendo reconstruídas assim que abrem. A vida útil dos hospitais está se tornando cada vez mais curta. Quanto mais recente for sua conclusão, mais cedo eles ficarão desatualizados. Imaginamos uma nova maneira de construir hospitais. Em vez de um edifício alto, e se o hospital fosse uma estrutura baixa, concebida não como um edifício, mas como um sistema composto por módulos que incorporam jardins onde a natureza pode ser desfrutada por pacientes e funcionários. Um número limitado de elementos acomoda uma série de funções. Uma estrutura que pode ser ampliada ou reduzida, mas que permanece operacional o tempo todo, adaptável às mudanças nas demandas organizadas em torno de uma rede de fluxos. Este é o hospital do futuro. O hospital do futuro se constrói, maximiza o potencial da automação e da impressão 3D e usa seus resíduos como recurso. O hospital do futuro produz o que consome, sua energia, seus alimentos, seus remédios. O hospital do futuro está em toda parte. O hospital do futuro é agora (OMA, 2022, tradução nossa).

O relatório de engenharia do projeto contextualiza que as necessidades de saúde das populações não são estáticas, sendo constantemente impactadas por diversos fatores globais e locais. Entre os principais impulsionadores de mudança destacam-se o crescimento populacional, especialmente nas áreas urbanas, o acelerado envelhecimento demográfico, e a rápida evolução dos serviços e tecnologias em saúde. Além disso, os efeitos das mudanças climáticas e da perda da biodiversidade representam novos desafios à manutenção da saúde coletiva, ao mesmo tempo em que se intensifica a demanda por ambientes hospitalares capazes de oferecer melhores condições de suporte à cura dos pacientes. Paralelamente, observa-se o aumento contínuo dos custos operacionais, associado ao esgotamento físico e emocional dos profissionais de saúde, fenômeno que tem se tornado cada vez mais comum. Assim, o desenvolvimento de um protótipo de hospital do futuro buscou integrar tais dimensões, propondo soluções arquitetônicas e organizacionais capazes de responder de maneira eficaz e sustentável a essas demandas emergentes (Happold, 2023).

Nessa perspectiva, em 2021, o renomado escritório *Office for Metropolitan Architecture* (OMA) em parceria com a Buro Happold, apresentou a proposta final do projeto para o *Al Daayan Health District* [Distrito de Saúde de *Al Daayan*], localizado em Doha (Catar), caracterizado pela “simbiose entre serviços clínicos, pesquisa e educação – um lugar onde pensar sobre o futuro do hospital se torna o hospital do futuro” (OMA, 2020, n.p.).

Solicitado pela *Hamad Medical Corporation* (HMC), a proposta se destina a um terreno de 1.300.000m² de terra virgem e explora o potencial da modularidade, pré-fabricação e automação em relação às rápidas mudanças que ocorrem nas ciências médicas (Figura 1 e 2) (OMA, 2021). Reinier de Graaf, sócio do OMA e líder do projeto, explica que historicamente a arquitetura hospitalar tem sido concebida como uma tipologia rígida, pautada por modelos padronizados que sugerem uma única maneira de se construir hospitais. Este projeto adota uma perspectiva oposta, fundamentando-se na ideia de conceber um hospital como uma tipologia dinâmica e em constante evolução, como um organismo vivo que procura se adaptar ao espaço e ao tempo.

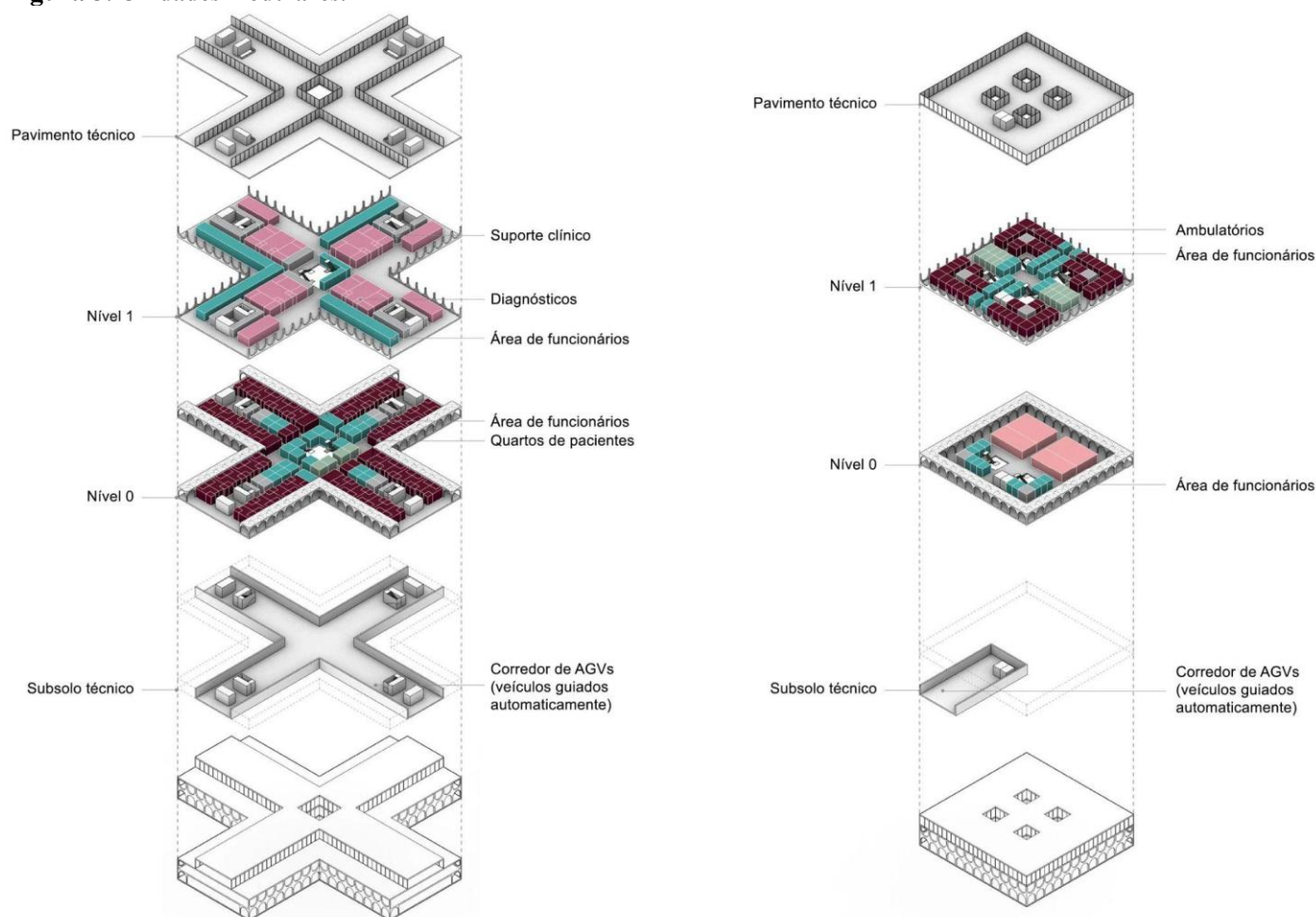
Figura 1 e 2. *Al Daayan Health District*.



Fonte: OMA (2021).

A proposta contempla uma estrutura de dois pavimentos abrigando hospital universitário, hospital infantil, centro para a saúde da mulher e centro de diagnóstico ambulatorial, com área construída de 629.000m² e capacidade total de 1.400 leitos reunidos em uma única estrutura. As áreas de suporte clínico e diagnóstico, por exemplo, estão previstas para o pavimento superior, enquanto os ambientes destinados ao atendimento dos pacientes serão posicionados no pavimento térreo. Essa organização espacial visa integrar de maneira eficiente os espaços de tratamento com os jardins que se distribuem ao longo do complexo hospitalar, promovendo benefícios terapêuticos por meio do contato visual com a natureza. Além disso, essa configuração contribui para a otimização da circulação interna, ao minimizar a dependência de sistemas de circulação vertical – elevadores (Figura 3) (Stouhi, 2021; Stouhi, 2022).

Figura 3. Unidades modulares.



Fonte: OMA (2021). Tradução nossa.

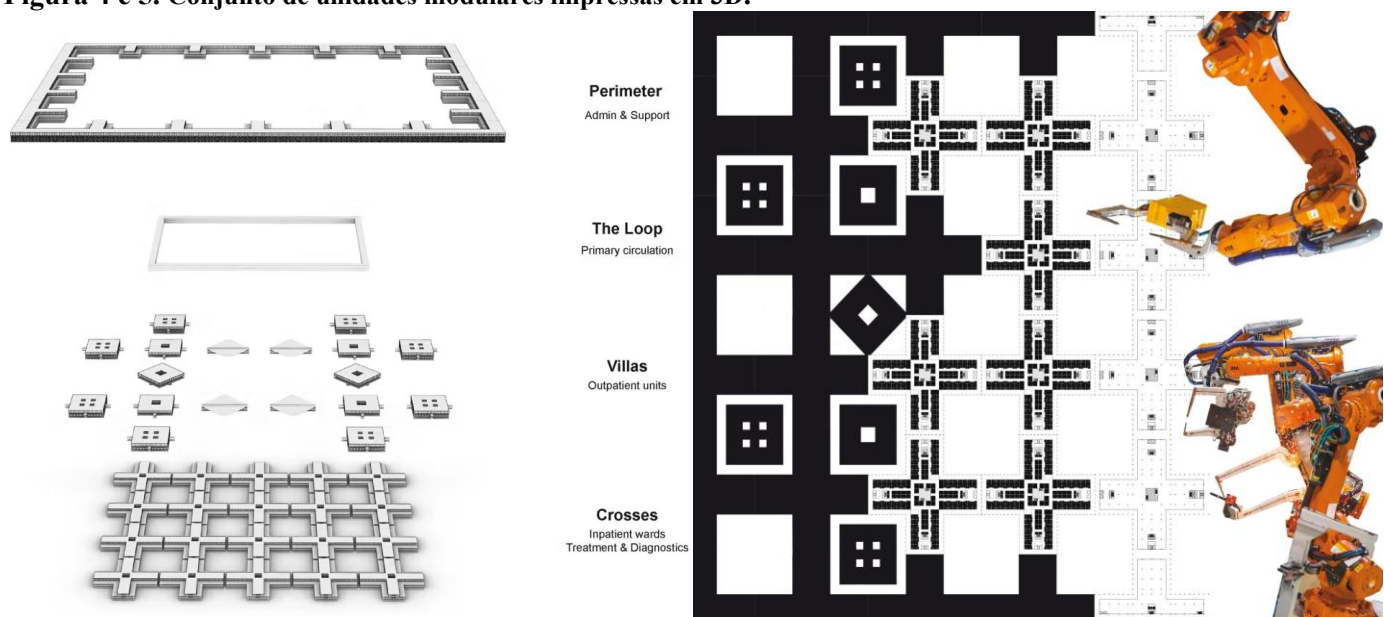
Nos modelos hospitalares atuais, as áreas de internação costumam ser posicionadas nos andares superiores. Já no *Al Daayan Health District*, as enfermarias com leitos individuais são realocadas para níveis inferiores, abaixo das áreas de alta complexidade. Essa configuração é acompanhada por um conjunto de estratégias projetuais que visam otimizar recursos, aumentar a eficiência operacional e garantir maior

flexibilidade ao longo do tempo. Entre elas, destacam-se a escolha de terrenos com valores mais baixos, possibilitando uma maior área de ocupação do solo, e a adoção de um crescimento modular, ágil e adaptável às constantes mudanças do setor da saúde. Do ponto de vista estrutural, o projeto busca reduzir a carga suportada pelos elementos construtivos, minimizando a necessidade de paredes de cisalhamento, além de adotar processos de construção industrializada, simples e seguros. Essa abordagem permite encurtar o programa de obra, já que diferentes atividades podem ocorrer simultaneamente, enquanto os módulos são implementados de forma micro faseada, conforme demanda e orçamento disponível. A fabricação em ambiente controlado contribui para a redução do desperdício e assegura maior qualidade, ao mesmo tempo em que estratégias inovadoras, como a manutenção, adaptação e desmontagem por meio de fábricas móveis, ampliam a sustentabilidade do ciclo de vida da edificação. Por fim, o programa arquitetônico é continuamente redefinido, garantindo que o hospital permaneça alinhado às necessidades atuais e futuras da sociedade (Happold, 2023).

O distrito incluirá ainda uma extensa área destinada ao cultivo de plantas medicinais, vegetais e hortaliças, cuja produção será voltada tanto para o abastecimento alimentar quanto para atividades de pesquisa e desenvolvimento de novos fármacos. Ademais, contará com um centro de geração de energia solar, possibilitando o funcionamento autônomo e sustentável do distrito, com redução da dependência de fontes externas de energia (Stouhi, 2021).

O projeto propõe a utilização de unidades modulares pré-fabricadas, concebidas em formato de cruz e produzidas localmente, com o objetivo de reduzir custos e minimizar a dependência de cadeias de suprimentos globais. Esses módulos serão totalmente impressos em 3D no próprio local, permitindo flexibilidade no *design* e a experimentação com diferentes soluções de acabamento e ornamentação. A adoção de materiais locais visa reduzir a pegada ambiental do empreendimento, promovendo maior sustentabilidade. Além disso, as unidades modulares podem ser facilmente reconfiguradas e expandidas sem comprometer as atividades em andamento, assegurando a continuidade operacional (Figura 4 e 5) (OMA, 2021).

Figura 4 e 5. Conjunto de unidades modulares impressas em 3D.



Fonte: OMA (2021).

Em entrevista para a *DAMN^o Magazine*, Reinier de Graaf explicou que a discussão sobre a possibilidade ou a necessidade de hospitais serem autossustentáveis surge da constatação de sua elevada dependência de cadeias de suprimentos externas. Embora essa dependência varie conforme o contexto geográfico, ela se torna particularmente relevante para hospitais localizados em regiões mais distantes dos principais centros de distribuição. No caso do Catar, por exemplo, grande parte dos recursos essenciais - como alimentos, medicamentos, materiais de construção e até profissionais de saúde - é importada. Assim, o projeto desenvolvido para o país busca explorar alternativas para a produção local desses insumos, considerando suas condições ambientais específicas. Apesar de ser predominantemente desértico e possuir recursos naturais limitados, o Catar dispõe de abundante incidência solar e acesso à água do mar. Com as tecnologias atuais, a energia solar pode ser eficientemente convertida em eletricidade, enquanto a dessalinização torna a água do mar adequada para uso agrícola. Esses dois recursos são fundamentais para reduzir a dependência de importações, possibilitando a produção local de energia (um dos principais custos operacionais dos hospitais), alimentos e até medicamentos. A questão da autossuficiência hospitalar está centrada na capacidade de identificar e aproveitar os recursos disponíveis localmente, promovendo um sistema mais resiliente e policêntrico, capaz de responder de forma autônoma às demandas essenciais para o seu funcionamento (Kennedy, 2021).

Ao explorar os conceitos do projeto podemos associar as rápidas transformações globais com questões como a degradação ambiental, o desmatamento e a proximidade, cada vez maior, entre seres humanos e ecossistemas de forma descontrolada, refletindo na necessidade premente de se buscar soluções inteligentes para minimizar esses problemas e planejar um futuro efetivamente sustentável.

No contexto das cadeias de suprimentos, reconhece-se que hospitais são sistemas complexos, sustentados por uma ampla gama de recursos que, em muitos casos, dependem de redes de abastecimento

internacionais. Considerando um cenário global caracterizado por crescente volatilidade, incerteza, complexidade e rapidez nas transformações, o projeto buscou abordar estratégias para mitigar e gerenciar essas vulnerabilidades. Além disso, a escassez progressiva de recursos reforça a necessidade de soluções que promovam maior resiliência e autonomia operacional (Happold, 2023).

O fornecimento de energia no projeto se baseia em fontes de baixo ou zero carbono, alinhado com estratégias de infraestrutura e metas de redução de emissões. O design horizontal do edifício favorece a instalação de até 380.000 m² de painéis solares fotovoltaicos no telhado, capazes de suprir 35% da demanda energética. A resiliência energética é sustentada por uma combinação de soluções atuais e emergentes que visam integrar, de forma eficiente, diferentes fontes e sistemas de energia. O projeto dá ênfase a utilização de energia solar fotovoltaica, aproveitando o contexto desértico para garantir o abastecimento diurno, enquanto sistemas de armazenamento em baterias asseguram abastecimento noturno e reserva de energia. O excedente de energia sazonal é convertido em hidrogênio, possibilitando o armazenamento de longo prazo e o fornecimento de energia 100% verde durante os períodos de alta demanda, como o verão. Além disso, reservatórios térmicos contribuem para a estabilidade dos sistemas de aquecimento e resfriamento, enquanto sistemas inteligentes de energia otimizam a gestão dos recursos, promovendo maior eficiência e redução das emissões de carbono (Happold, 2023).

A gestão dos recursos hídricos será orientada pelos princípios da economia circular, buscando reduzir a demanda e otimizar o uso da água de forma mais eficiente, em comparação aos modelos hospitalares tradicionais. Essa abordagem visa minimizar o desperdício e a poluição, promovendo o reuso e a reciclagem da água, sempre que possível. A estratégia propõe um ciclo sustentável em que a água é mantida em uso por mais tempo, reduzindo a dependência de fontes externas e contribuindo para a resiliência hídrica do hospital em diferentes contextos. A redução da demanda de água será alcançada por meio de uma abordagem integrada que foca em quatro áreas principais: estratégias de sombreamento e conforto térmico externo, eficiência nas instalações internas e nos acessórios, mudança de comportamento dos usuários, e práticas de reciclagem e reutilização da água, além da otimização da irrigação. Isso inclui tecnologias de resfriamento mais eficientes, sistemas de reuso de água para fins não potáveis e estratégias de paisagismo que demandem menos irrigação, promovendo um uso mais racional e sustentável dos recursos hídricos (Happold, 2023).

O hospital foi projetado para operar de forma autossuficiente por quase uma semana, funcionando de maneira isolada (modo ilha). Após esse período, a produção de alimentos se torna um desafio, embora os sistemas de energia, água e gestão de resíduos ainda tenham capacidade para continuar operando. Em um cenário de um mês, a capacidade de armazenamento de resíduos atingiria seu limite, tornando inviável manter os resíduos no local, especialmente por questões de controle de infecção. Ainda assim, desde que os sistemas operem em plena capacidade, haja espaço disponível para armazenamento e não ocorram interrupções nos serviços externos, o hospital continuaria a contar com fornecimento suficiente de energia e água para suas

operações (Happold, 2023). O Quadro 1 apresenta uma síntese das principais características sustentáveis do projeto.

Quadro 1. Principais características sustentáveis do projeto.

	COMPONENTES		
	Sistemas circulares e de baixa demanda (energia, água e resíduos)	Produção de recursos no local	Operação em modo ilha integrado
PRINCIPAIS BENEFÍCIOS	<ul style="list-style-type: none"> - A demanda por água foi reduzida em 72% e o lençol freático foi drenado - Redução do impacto ambiental - Custos operacionais reduzidos - Baixa demanda permite que o hospital resista a choques por mais tempo 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução da dependência das redes de serviços públicos da cidade - Maior capacidade de recuperação após um evento de choque de oferta - A produção farmacêutica poderia ser integrada com programas de pesquisa 	<ul style="list-style-type: none"> - Totalmente autossuficiente por uma semana - Os sistemas de energia, água e resíduos podem operar de modo ilha indefinidamente - Todos os sistemas projetados para permitir uma rápida mudança para o modo ilha para fornecer cuidados intensivos contínuos

Fonte: Adaptado de Happold (2023).

Retomando-se a pergunta inicial proposta por Buro Happold: “O que deveria ser o hospital do futuro?”. A resposta segundo o escritório é que o hospital do futuro não deve ser concebido apenas como uma melhoria incremental dos modelos existentes, mas como uma instituição em constante evolução, capaz de incorporar mudanças demográficas, tecnológicas, operacionais e ambientais ao longo de toda a sua vida útil. Em vez de uma estrutura fixa e definitiva, trata-se de um sistema aberto, flexível e interativo, cujo processo de planejamento, projeto e construção deve permitir adaptações contínuas sem comprometer a operação. Assim, mais do que um edifício, o hospital do futuro configura-se como uma plataforma dinâmica, permanentemente ajustada ao seu propósito, capaz de absorver transformações com neutralidade de custos e iniciar sua construção mesmo antes da conclusão total do planejamento clínico, garantindo resiliência diante de cenários incertos e de crescente complexidade (Happold, 2023). Nesse sentido, a proposta apresenta uma série de componentes que tornam o hospital adaptável a diferentes contextos, conforme sintetizado no Quadro 2.

Quadro 2. Componentes que caracterizam o hospital do futuro.

Adaptar, expandir e contrair rapidamente	Pisar na Terra com leveza e resistir a um evento de choque	Ambiente curativo	Melhor uso da automação
- Estrutura industrializada e adaptativa	- Demanda energética extremamente baixa e sistemas circulares	- Pátios confortáveis para climas extremos	- Armazenagem repensada e sistema de distribuição sob demanda

<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas MEP <i>plug-and-play</i> (mecânico, elétrico e hidráulico) - Fábrica móvel no local 	<ul style="list-style-type: none"> - Produção de recursos no local - Funcionamento em modo “ilha” integrado 	<ul style="list-style-type: none"> - Rede de mobilidade integrada 	<ul style="list-style-type: none"> - Plataforma digital resiliente para o campus - Gêmeo digital para operação e planejamento
---	---	--	---

Fonte: Adaptado de Happold (2023).

Por fim, embora ainda não haja uma previsão definida para a construção do *Al Daayan Health District*, é relevante enfatizar que o projeto apresenta uma abordagem arquitetônica inovadora, com potencial para redefinir o conceito de *design* e a funcionalidade dos ambientes hospitalares em um mundo em constante transformação.

O projeto reflete alguns dos questionamentos levantados no início deste estudo, explorando a possibilidade de hospitais atuarem como comunidades autossustentáveis, capazes de se regenerar e manter sua operação diante de desafios globais. Mais do que propor um modelo arquitetônico a ser replicado, a proposta do OMA e do Buro Happold apresenta um conjunto de conceitos e estratégias projetuais que podem inspirar e informar futuros projetos hospitalares em diferentes partes do mundo. Ainda assim, a transposição dessas estratégias exige adaptação cuidadosa aos contextos específicos, considerando fatores como recursos disponíveis, geografia, clima, cultura, legislação e condições urbanas. Nesse sentido, o projeto não se configura como uma solução universal, mas como um referencial estratégico para a concepção de hospitais mais resilientes, tecnológicos e alinhados aos princípios da sustentabilidade.

5 Considerações finais

Neste trabalho buscou-se discutir como a integração de tecnologias emergentes e princípios de sustentabilidade podem contribuir para o desenvolvimento de hospitais resilientes e autossuficientes no futuro. Percebe-se, por meio da revisão de literatura e do estudo de caso teórico apresentado, que os hospitais do futuro devem incorporar diversos conceitos arquitetônicos para a qualificação dos espaços, priorizando a sustentabilidade do empreendimento associada aos princípios de resiliência e autossuficiência, incorporando a tecnologia como uma aliada.

As mudanças climáticas e as crises sanitárias estão remodelando as estruturas de todos os países do mundo, levando instituições, governos e sociedade em geral a refletirem sobre as ações e soluções para mitigar os efeitos associados. As edificações hospitalares se caracterizam pela sua complexidade e alta necessidade de recursos para seu pleno funcionamento, contribuindo com os problemas globais recorrentes em muitos setores econômicos. Apesar disso, os hospitais possuem um papel importante na prestação dos cuidados de saúde que devem ser mantidos mesmo diante das adversidades. Nesse sentido, a partir da grande demanda de suas estruturas em consumo energético e potencial de interferências no equilíbrio ecológico do local de sua

implantação, torna-se primordial o aprofundamento de pesquisas e estudos de alternativas dos seus sistemas, para que sua operação garanta a eficácia de ações de proteção e promoção da saúde sem danos ao equilíbrio do sistema local.

Assim, em vez de serem apenas grandes consumidoras de recursos, as edificações de saúde do futuro precisam se tornar modelos de sustentabilidade, resiliência e autossuficiência. Com base nos achados e discussões deste estudo, percebe-se que a transição para esse novo modelo exige a integração de soluções inovadoras em três frentes principais: a construção, o funcionamento e a preparação para crises.

A fase de construção é o primeiro passo para garantir a sustentabilidade de um hospital. A escolha de materiais de baixo impacto ambiental é fundamental. Em vez de usar concreto e aço em excesso, por exemplo, hospitais do futuro podem incorporar materiais de origem local e impressão 3D, reduzindo a pegada de carbono do transporte. Estruturas modulares e pré-fabricadas também se destacam, pois minimizam o desperdício no canteiro de obras e aceleram o processo de construção, o que é vital em situações de emergência ou expansão rápida.

Com relação à fase de operação, esta consome enormes quantidades de energia e água. Para mitigar esse impacto, é essencial adotar estratégias de eficiência e uso de fontes renováveis. A implementação de painéis solares e sistemas de energia eólica, por exemplo, permite que o hospital gere sua própria eletricidade. No que se refere à eficiência, o uso de iluminação natural maximiza o conforto dos pacientes e economiza energia elétrica. Além disso, sistemas de gestão inteligente de água podem tratar e reutilizar a água cinza, enquanto a coleta da água da chuva reduz a dependência de fontes externas.

E, por fim, a capacidade de um hospital funcionar plenamente durante catástrofes é o que o define como resiliente. Isso vai além da simples sustentabilidade. Para isso, o projeto deve considerar a geração distribuída de energia e sistemas de armazenamento (como baterias), garantindo o fornecimento mesmo quando a rede principal falha. Outro aspecto fundamental é a autossuficiência em água, por meio de sistemas de captação e purificação, e até mesmo a produção de alimentos em hortas verticais ou telhados verdes, fortalecendo a segurança alimentar. Essas medidas não apenas garantem a continuidade dos serviços de saúde, mas também transformam o hospital em um centro de resiliência para a comunidade ao seu redor, capaz de prestar socorro mesmo em cenários de escassez.

A transição para hospitais resilientes e autossuficientes não é apenas uma opção, mas uma necessidade urgente. Ao focar em soluções concretas para a construção, operação e resiliência, o setor da saúde pode se posicionar como um agente de transformação, garantindo a prestação de serviços de qualidade e seguros para a população, independentemente dos desafios futuros.

Referências

- BROSS, J. C. **Compreendendo o edifício de saúde**. Série gestão em saúde, vol. 2. São Paulo: Atheneu, 2013.
- CARVALHO, R. A. F. **Materiais emergentes na arquitetura**. 2015. Dissertação (Mestrado Integrado em Arquitetura) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo – Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa, 2015.
- DE OLIVEIRA, K. B.; DE OLIVEIRA, O. J. Making hospitals sustainable: towards greener, fairer and more prosperous services. **Sustainability**, v. 14, n. 15, p. 9730, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159730>. Acesso em: 12 fev. 2025.
- ECKELMAN, M. J.; SHERMAN, J. Environmental impacts of the U.S. health care system and effects on public health. **PLOS ONE**, v. 11, n. 6, e0157014, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157014>. Acesso em: 11 fev. 2025.
- HAPPOLD, B. **Hospital of the Future: an engineering summary**. Reino Unido, 2023. Disponível em: <https://www.burohappold.com/wp-content/uploads/2023/07/Hospital-of-the-Future-An-engineering-summary.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- HAPPOLD, B. **The Hospital of the Future**. Reino Unido, 2023. Disponível em: <https://www.burohappold.com/projects/hospital-of-the-future/>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- HCWH. Health Care Without Harm. **Health care’s climate footprint: how the health sector contributes to the global climate crisis and opportunities for action**. Bruxelles, set. 2019. Disponível em: https://noharm-global.org/sites/default/files/documents-files/5961/HealthCaresClimateFootprint_092319.pdf. Acesso em: 13 fev. 2025.
- HORTON, R.; LO, S. Planetary health: a new science for exceptional action. **The Lancet**, v. 386, n. 10007, p. 1921-1922, 2015. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)61038-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)61038-8). Acesso em: 13 fev. 2025.
- KENNEDY, G. OMA Space and Time: The Hospital of the Future. **DAMN° Magazine**, 2021. Disponível em: <https://www.damnmagazine.net/oma-space-time-hospital-future>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- LALLEMANT, F.; MARTIN, C. L’hôpital du futur: quand le développement durable rencontre «one health» et la santé planétaire pour des soins de santé durables. **Anesthésie & Réanimation**, v. 10, n. 2, p. 77-81, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anrea.2024.02.003>. Acesso em: 13 fev. 2025.
- LENZEN, M. *et al.* The environmental footprint of health care: a global assessment. **The Lancet Planetary Health**, v. 4, n. 7, p. e271–e279, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30121-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30121-2). Acesso em: 11 fev. 2025.
- LOPES, C. M. *et al.* Perspective of business models and innovation for sustainability transition in hospitals. **Sustainability**, v. 11, n. 1, p. 5, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11010005>. Acesso em: 12 fev. 2025.
- OMA – Office for Metropolitan Architecture. **OMA / Reinier de Graaf and Buro Happold Reveal Design for Health District in Doha**. Rotterdam, 18 out. 2021. Disponível em: <https://www.oma.com/news/oma-reinier-de-graaf-and-buro-happold-reveal-design-for-health-district-in-doha>. Acesso em 10 fev. 2025.
- OMA – Office for Metropolitan Architecture. **OMA / Reinier de Graaf and Buro Happold Complete First Phase of Al Daayan Health District Project**. Rotterdam, 2 abr. 2020. Disponível em:

<https://www.oma.com/news/oma-reinier-de-graaf-and-buro-happold-complete-first-phase-of-al-daayan-health-district-project>. Acesso em 10 fev. 2025.

OMA – Office for Metropolitan Architecture. **The Hospital of the Future**. YouTube, 11 abr. 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=YlpYdLh0N58>. Acesso em: 8 fev. 2025.

PASCALE, F.; ACHOUR, N. Envisioning the sustainable and climate resilient hospital of the future. **Public Health**, v. 237, p. 435-442, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2024.10.028>. Acesso em: 13 fev. 2025.

RECHEL, B. *et al.* **Investing in hospitals of the future**. Bruxelles: Observatory on Health Systems and Policies, 2009. Disponível em: <https://eurohealthobservatory.who.int/publications/i/investing-in-hospitals-of-the-future-study>. Acesso em: 13 fev. 2025.

RICHARDSON, K. *et al.* Earth beyond six of nine planetary boundaries. **Science Advances**, v. 9, eadh2458, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>. Acesso em: 11 fev. 2025.

SEBIRE, N. J. *et al.* The Future Hospital in Global Health Systems: The Future Hospital Within the Healthcare System. **The International Journal of Health Planning and Management**, 2025a. DOI: <https://doi.org/10.1002/hpm.3891>. Acesso em: 13 fev. 2025.

SEBIRE, N. J. *et al.* The Future Hospital in Global Health Systems: The Future Hospital as an Entity. **The International Journal of Health Planning and Management**, 2025b. DOI: <https://doi.org/10.1002/hpm.3893>. Acesso em: 13 fev. 2025.

SRC – Stockholm Resilience Centre. **Planetary boundaries**. Stockholm, 2023. Disponível em: <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>. Acesso em: 11 fev. 2025.

SRC – Stockholm Resilience Centre. **Seven of nine planetary boundaries now breached**. Stockholm, 4 set. 2025. Disponível em: <https://www.stockholmresilience.org/news--events/general-news/2025-09-24-seven-of-nine-planetary-boundaries-now-breached.html>. Acesso em: 30 set. 2025.

STOUHI, D. OMA / Reinier de Graaf and Buro Happold Reveal Autonomous Design for Health District in Qatar. **ArchDaily**, 19 out. 2021. Disponível em: <https://www.archdaily.com/970437/oma-reinier-de-graaf-and-buro-happold-reveal-autonomous-design-for-health-district-in-qatar>. Acesso em: 8 fev. 2025.

STOUHI, D. OMA and Squint/Opera Release Video of Qatar's Autonomous "Hospital of the Future". **ArchDaily**, 12 abr. 2022. Disponível em: <https://www.archdaily.com/980062/oma-and-squint-opera-release-video-of-qatars-autonomous-hospital-of-the-future>. Acesso em: 8 fev. 2025.

TUXHARI, M.; VEIZAJ, D. Sustainable development of hospital structures. In: PISCITELLI, M. (Org.). **Heritage and Technology: Mind Knowledge Experience**. Napoli: Scuola Pitagora Editrice, 2015. v. 56, p. 953-959.

WHITMEE, S. *et al.* Safeguarding human health in the Anthropocene epoch: report of The Rockefeller Foundation–Lancet Commission on planetary health. **The Lancet**, v. 386, n. 10007, p. 1973-2028, 2015. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60901-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60901-1). Acesso em: 13 fev. 2025.

ZIONI, E. C. Eficiência e sustentabilidade nos ambientes de saúde. In: MARTINS, B. C. (org.). **Arquitetura e Urbanismo: planejando e edificando espaços**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.528191007>. Acesso em: 11 fev. 2025.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).