

DM

**Utilização de Ferramentas BIM  
na Avaliação da Eficiência Energética**  
Possibilidades e desafios

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Vítor Filipe Fernandes Pereira**  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

*A Nossa Universidade*

[www.uma.pt](http://www.uma.pt)

julho | 2020



**Utilização de Ferramentas BIM  
na Avaliação da Eficiência Energética**  
Possibilidades e desafios

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Vítor Filipe Fernandes Pereira**  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO  
José Manuel Martins Neto dos Santos



***“All wisdom is not new wisdom.”***

Winston Churchill



## **AGRADECIMENTOS**

A elaboração da presente dissertação de mestrado não seria possível sem a contribuição, direta ou indireta, de pessoas que me rodeiam diariamente e a quem um agradecimento não poderia passar em claro.

Ao meu orientador, Professor Doutor José Manuel Martins Neto dos Santos, pela paciência demonstrada no decorrer deste processo, pela confiança em mim depositada, pelo acompanhamento e disponibilidade constantes, pela contribuição para o aprimoramento do meu rigor científico e do meu conhecimento na área da Engenharia Civil.

À minha namorada Sofia, por todo o apoio dado, pela capacidade nata de encontrar o melhor de mim e trazê-lo à superfície, pela paciência inabalável durante todos os momentos e pela confiança nas minhas capacidades para conseguir levar avante todo este processo.

À minha mãe, por me mostrar, desde sempre, que o saber não ocupa lugar, incentivando-me e providenciando condições para chegar o mais longe possível no meu percurso académico, pelo apoio e motivação dados. De igual modo, à minha irmã, por ter a capacidade de conseguir ver e mostra-me o lado positivo, em qualquer situação e sobre qualquer assunto. Aos meus avós, pelo constante apoio, em variadas formas, todas elas de grande importância para a conclusão do Mestrado em Engenharia Civil.

Aos meus colegas de profissão que, direta ou indiretamente, contribuíram com os seus conhecimentos, experiências e disponibilidade.

A todos, o meu muito obrigado!



## RESUMO

O setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações (AECO) é responsável por grande parte do consumo energético global e, conseqüentemente, por alguns impactos ambientais negativos associados à sua laboração. Como tal, a exigência associada à eficiência energética dos edifícios tem aumentado substancialmente na última década, com o objetivo de reduzir o impacto negativo que os mesmos exercem sobre o meio ambiente.

Este trabalho pretende determinar a que nível as ferramentas de *Building Information Modelling* (BIM) são capazes de facilitar o processo de avaliação da eficiência energética no setor da AECO, recorrendo às suas capacidades de modelação e simulação. Estas capacidades permitem uma apreciação de diferentes soluções para edifícios novos na fase inicial de projeto e para edifícios existentes quando se procede à reabilitação dos mesmos.

Assim, através de uma análise cienciométrica, pretende-se explorar o nível de conhecimento científico associado à utilização de ferramentas BIM como plataformas de avaliação energética, através da avaliação de vários fatores quantitativos associados à pesquisa bibliográfica efetuada.

Posteriormente, através de uma revisão sistemática da literatura sobre os temas BIM e eficiência energética em edifícios, pretende-se determinar o estado atual da arte, as barreiras e os desafios futuros associados. Para tal, analisa-se o papel das ferramentas BIM no processo da avaliação de eficiência energética de edifícios, através de uma análise dos tópicos mais relevantes.

Concluiu-se que o nível de conhecimento sobre estes campos científicos é amplo, mas ainda com larga margem de aprendizagem, notando-se uma evolução em crescente de publicações que incidem sobre a avaliação energética em edifícios e a utilização de ferramentas BIM para o efeito.

A revisão sistemática de literatura efetuada permitiu identificar 14 tópicos de informação, agrupados em 5 categorias principais. Concluiu-se que, atualmente, é possível realizar análises energéticas em modelos BIM, embora limitadas por: problemas de interoperabilidade, dificuldades na obtenção de propriedades térmicas de edifícios existentes e limitação das bibliotecas BIM existentes. Adicionalmente, embora não seja possível certificar energeticamente um edifício de modo automático a partir de um modelo BIM, estes podem já ser utilizados para avaliar certos critérios.

**Palavras-chave:** BIM; Cienciométrica; Edifícios; Eficiência Energética; Energia, Revisão Sistemática de Literatura



## **ABSTRACT**

The Architecture, Engineering, Construction and Operations (AECO) industry is responsible for a large part of the global energy consumption and, as such, represents several negative effects on the environment. As such, through the last decade, buildings' energy efficiency requirements have become higher as an effort to reduce these negative environmental effects.

The current work aims to evaluate the role and level in the use of Building Information Modelling (BIM) tools for simplifying the processes associated with the evaluation of the energy efficiency in buildings, making use of its modelling and simulation capabilities. These capabilities enable the assessment of different solutions in the early design stages of buildings, as well as, in retrofitting procedures applied to existing buildings.

Thus, through a scientometrics analysis, it is intended to explore the level of scientific knowledge associated to the use of BIM tools as energy assessment tools, through the evaluation of various quantitative factors associated with the bibliographic research conducted.

After that, through a systematic review of the literature on BIM and energy efficiency in buildings, it is intended to determine the current state of the art, the associated barriers and the future challenges. The role of BIM tools in the process of evaluating energy efficiency in buildings is analysed, through an analysis of the most relevant topics.

It was concluded that the level of knowledge in these scientific fields is wide, but there is a large margin for extending this knowledge, with an increasing number of publications focusing on energy assessment in buildings and the use of BIM tools for this purpose.

The systematic literature review identified 14 information topics, grouped into 5 main categories. It was concluded that it is currently possible to run energy analyses on BIM models, although limited by: interoperability problems, obstacles to the acquisition of thermal properties of existing buildings and limitations of BIM libraries. Additionally, although it is not possible to certify a building automatically from a BIM model, these can already be used to evaluate certain certification criteria.

**Keywords:** *BIM; Building, Energy, Energy efficiency; Scientometrics; Systematic Literature Review*



# ÍNDICE

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	iii
Abstract .....	v
Índice .....	vii
Índice de figuras .....	xi
Índice de tabelas .....	xiii
Nomenclatura .....	xv
1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organização da dissertação.....	2
1.4. Publicações .....	3
2. BIM e Eficiência Energética no setor AECO.....	5
2.1. BIM .....	5
2.2. Eficiência energética .....	10
3. Metodologia.....	15
3.1. Recolha de dados.....	15
3.1.1. Termos de pesquisa.....	16
3.1.2. Bases de dados.....	17
3.1.3. Tipo de referências.....	17
3.1.4. Armazenamento de dados .....	18
3.1.5. Critérios de exclusão.....	18
3.2. Análise cienciométrica.....	20
3.3. Revisão sistemática de literatura .....	21
4. Análise cienciométrica .....	23
4.1. Introdução.....	24
4.2. Número de publicações.....	25
4.3. Tipo de publicação .....	26
4.4. Fonte de publicação .....	27
4.5. Palavras-chave.....	31

4.5.1. Coocorrência de palavras-chave.....	33
4.5.2. Tendência de ocorrência .....	34
4.6. Países .....	35
4.6.1. Distribuição de publicações por país.....	35
4.6.2. Colaboração internacional.....	37
4.7. Citações .....	38
4.7.1. Artigos mais citados .....	39
4.7.2. Rácio de citações .....	40
4.7.3. Número de citações por ano .....	41
4.8. Autores.....	42
4.8.1. Autores mais publicados .....	42
4.8.2. Colaboração entre autores .....	44
4.8.3. Autores mais citados .....	46
4.9. <i>Software</i> .....	47
4.9.1. <i>Software</i> utilizado .....	47
4.9.2. Relação entre <i>software</i> .....	49
4.10. Público-Alvo .....	50
4.11. Considerações finais .....	52
5. Revisão sistemática de literatura .....	57
5.1. Introdução.....	58
5.2. Tecnologias BIM .....	60
5.2.1. Interoperabilidade.....	60
5.2.2. Junção de nuvens de pontos de <i>laser scanner</i> com termografia .....	62
5.2.3. Análises ao nível urbano BIM/SIG .....	64
5.2.4. Monitorização de edifícios .....	65
5.3. Desenvolvimento de aplicações apoiadas no modelo BIM.....	66
5.3.1. Desenvolvimento de <i>softwares / plugins</i> .....	67
5.3.2. Plataformas de visualização de resultados .....	68
5.4. Construção sustentável .....	69
5.4.1. Comparação de soluções e materiais .....	70
5.4.2. Estimativa de consumos.....	71
5.4.3. LCA.....	73
5.4.4. NZEB .....	74
5.5. Projeto higratérmico de edifícios .....	75
5.5.1. Certificação energética.....	76
5.5.2. Conforto térmico .....	77

5.5.3. Reabilitação de edifícios .....	78
5.6. Ensino.....	79
5.7. Considerações finais .....	80
6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros.....	87
6.1. Considerações gerais.....	87
6.2. Conclusões.....	88
6.3. Desenvolvimentos futuros .....	90
Referências .....	93
Anexos .....	111



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Exemplo de um modelo BIM 3D de um edifício [14] .....	7
Figura 2. Relação entre colaboradores em projeto com BIM (adaptado de [15]).....	8
Figura 3. Níveis de informação de BIM (adaptado de [15]) .....	9
Figura 4. Níveis de certificação energética.....	10
Figura 5. Consumo energético em 2018, por setor (Adaptado de IEA [11]).....	11
Figura 6. Emissão de CO <sub>2</sub> em 2018, por setor (Adaptado de IEA [11]).....	11
Figura 7. Processo de aplicação dos critérios de exclusão .....	19
Figura 8. Número de publicações por ano .....	25
Figura 9. Tipo de artigo .....	27
Figura 10. Fonte de publicação.....	28
Figura 11. Fator de impacto .....	30
Figura 12. Palavras-chave principais.....	32
Figura 13. Rede de coocorrência de palavras-chave .....	33
Figura 14. Tendência de ocorrência de palavras-chave, por ano .....	34
Figura 15. Distribuição de publicações por país .....	36
Figura 16. Rede de colaboração internacional .....	37
Figura 17. Artigos mais citados.....	39
Figura 18. Rácio de citações por artigo .....	40
Figura 19. Número de citações por ano.....	41
Figura 20. Rede de coautoria.....	44
Figura 21. Maior rede de coautoria identificada.....	45
Figura 22. Número de citações por autor.....	46
Figura 23. <i>Software</i> utilizado segundo os seus campos de aplicação .....	48
Figura 24. Relação entre <i>software</i> .....	50
Figura 25. Público-Alvo .....	52



## **ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1. Autores com mais publicações .....	43
Tabela 2. Categorias e tópicos identificados na biblioteca, e referências associadas.....	59



## **NOMENCLATURA**

AECO – Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações;

ASCE – *American Society of Civil Engineers*;

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado;

BEM – *Building Energy Modelling*;

BIM – *Building Information Modelling*;

BPS – *Building Performance Simulation*;

CAD – *Computer Aided Design*;

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

FI – Fator de impacto;

ICE – *Institution of Civil Engineers*;

IFC – *Industry Foundation Classes*;

LCA – *Life cycle assessment*;

LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design rating system*;

MVD – *Model View Definition*;

NZEB – *Nearly Zero Energy Buildings*

ÖGNI – *Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft*

PDF – *Personal Data Form*;

PMV – *Predicted Mean Vote*;

PPD – *Predicted Percentage of Dissatisfied*;

SALSA – *Search, Appraisal, Synthesis, Analysis*

SIG – Sistema de Informação Geográfica;

ZEB – *Zero Energy Buildings*;



# 1

## Introdução

### 1.1. Enquadramento

*Building Information Modelling*, ou BIM, é uma tecnologia revolucionária que, aplicada ao setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações (AECO), tem transformado a forma como as edificações são concebidas, projetadas, construídas e mantidas [1].

É definida como sendo uma representação digital das características físicas e funcionais de um edifício, um recurso de partilha de informação sobre esse mesmo edifício, permitindo assim a criação de uma base para tomada de decisões ao longo de todo o ciclo de vida do edifício modelado [2].

Deste modo, a tecnologia BIM, as suas ferramentas e as suas metodologias, deverão ser vistas não apenas como um *software*, mas sim como um processo [3], na medida em que revelam ter a capacidade de atuar em todo o ciclo de vida de um edifício, com a capacidade de aumentar a eficiência desde a fase de projeto [4], até ao seu fim de vida útil.

Esta capacidade de aumentar o grau de eficiência do setor AECO pode ser usada para diversos fins, como a redução do seu impacto ambiental. De facto, atualmente, o setor da construção é responsável por grande parte do consumo energético global [5] e, conseqüentemente, o seu funcionamento quotidiano produz vários impactos ambientais negativos [6]. Como tal, o setor AECO encontra-se sob grande pressão para reduzir os níveis de emissões poluentes [7], sendo

obrigado a aumentar a eficiência energética dos seus métodos atuais (materiais, processos, equipamentos, edifícios).

A eficiência energética, no setor AECO, pode ser definida como o rácio entre a energia consumida pelo setor e o total de energia produzida dedicada à operacionalização do setor. Em termos práticos, e a título de exemplo, poderá indicar o quociente entre a energia gasta na construção de um edifício e o total de energia produzida e faturada para o construir efetivamente.

Em termos históricos, este termo pode ser associado aos processos de substituição de equipamentos antigos por equivalentes mais recentes e mais eficientes energeticamente [8]. No entanto, nos dias de hoje isto não é suficiente. Todo um edifício deve ser eficiente (paredes, lajes, janelas, portas, etc.), assim como dispor de produção local de energia.

A determinação do nível de eficiência energética ao longo do tempo, independentemente do país ou do setor, está rodeada de problemas metodológicos e, conseqüentemente, pode ser considerada de difícil avaliação [9, 10]. Assim, as comparações entre setores ou entre países deve ser vista com cuidado, sendo mais relevante a análise da tendência ao longo dos anos de cada setor ou país para perceber a sua evolução.

## 1.2. Objetivos

Deste modo, a presente dissertação pretende, através de uma revisão da literatura publicada sobre os temas da eficiência energética e BIM, determinar a que nível e extensão estão as tecnologias BIM a facilitar os processos de avaliação de eficiência energética associados aos edifícios construídos pelo setor AECO.

Para atingir este objetivo principal, propõe-se a realização dos seguintes objetivos secundários:

1. Recolher a literatura relevante publicada nos temas do BIM e da Eficiência Energética;
2. Determinar o nível de conhecimento existente sobre estes temas, através de uma análise cienciométrica dos dados da literatura recolhida;
3. Identificar os temas principais abordados na literatura recolhida, assim como os tópicos secundários associados;
4. Elaborar um estado atual da arte, para cada um dos tópicos identificados, incluindo a identificação das principais barreiras e dos desafios futuros associados.
5. Propor possíveis soluções para as barreiras encontradas.

## 1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos diferentes. O primeiro consiste na presente introdução, com o objetivo de enquadrar, definir os objetivos a que se propõe com a

sua elaboração, apresentar a estrutura da dissertação e indicar as publicações associadas já efetuadas.

O segundo capítulo aborda o papel do BIM no setor AECO, ao mesmo tempo que explora o conceito de eficiência energética na construção e operação de edifícios.

O terceiro capítulo incide nas metodologias de pesquisa, análise bibliométrica e de revisão de literatura usadas nos capítulos seguintes. Tem como objetivo definir processos claros e concisos, com rigor científico, de maneira a que o presente trabalho possa ser considerado válido cientificamente.

O quarto capítulo apresenta uma análise bibliométrica relativa à pesquisa efetuada, mais especificamente uma análise cienciométrica, com o objetivo principal de determinar quantitativamente o estado atual do conhecimento científico publicado associado à utilização de ferramentas BIM como plataformas de avaliação energética de edifícios.

O quinto capítulo da presente dissertação apresenta uma revisão sistemática de literatura. Esta revisão permitirá determinar o estado da arte nos campos científicos de investigação relacionada com BIM e eficiência energética, e identificar as perspetivas futuras dos mesmos para o setor AECO.

Por fim, no sexto capítulo proceder-se-á à exposição das conclusões resultantes das análises efetuadas ao longo da presente dissertação.

## **1.4. Publicações**

Com base na informação recolhida durante a elaboração da presente dissertação, foi elaborado e submetido um artigo de conferência que será apresentado no 3.º congresso português de *Building Information Modelling*, denominado por PTBIM 2020. O artigo encontra-se no Anexo I.



# 2

## BIM e Eficiência Energética no setor AECO

O setor da construção, por ser aquele que mais energia consome e emissões produz [11], carece da implementação de novas tecnologias para o aumento da sua eficiência energética. Uma dessas tecnologias é o BIM, que se mostra capaz de revolucionar a maneira como os edifícios são construídos, permitindo que se tomem decisões energeticamente conscientes em fases iniciais de projeto.

Como tal, o presente capítulo aborda o papel do BIM no setor AECO, ao mesmo tempo que explora o conceito de eficiência energética na construção e operação de edifícios, de maneira a contextualizar o tema central da presente dissertação.

### **2.1. BIM**

A metodologia BIM apresenta-se como uma das mais promissoras evoluções no setor AECO. Esta permite a criação de modelos virtuais paramétricos de edifícios, com um nível alto de

precisão, e capaz de conter informação geométrica e restantes dados físicos mecânicos, etc. relevantes para apoiar os responsáveis pelas fases de projeto, construção [12] e manutenção.

O termo BIM apareceu, pela primeira vez, em 1992, na revista científica “*Automation in Construction*”. Contudo, um conceito que pode ser associado ao BIM foi mencionado por Chuck Eastman em 1975, na revista “*AIA Journal*”, denominado, na altura, por “*Building Description System*”.

Assim, desde a década de 70 que se registam progressos no que toca à representação e edição de formas tridimensionais. Através de operações Booleanas de união, intersecção e subtração, tornou-se possível representar objetos 3D, permitindo depois desenvolver um processo denominado por *Constructive Solid Geometry* que, através dessas operações Booleanas, permitiu conceber um diagrama de processos para a criação de determinadas formas tridimensionais.

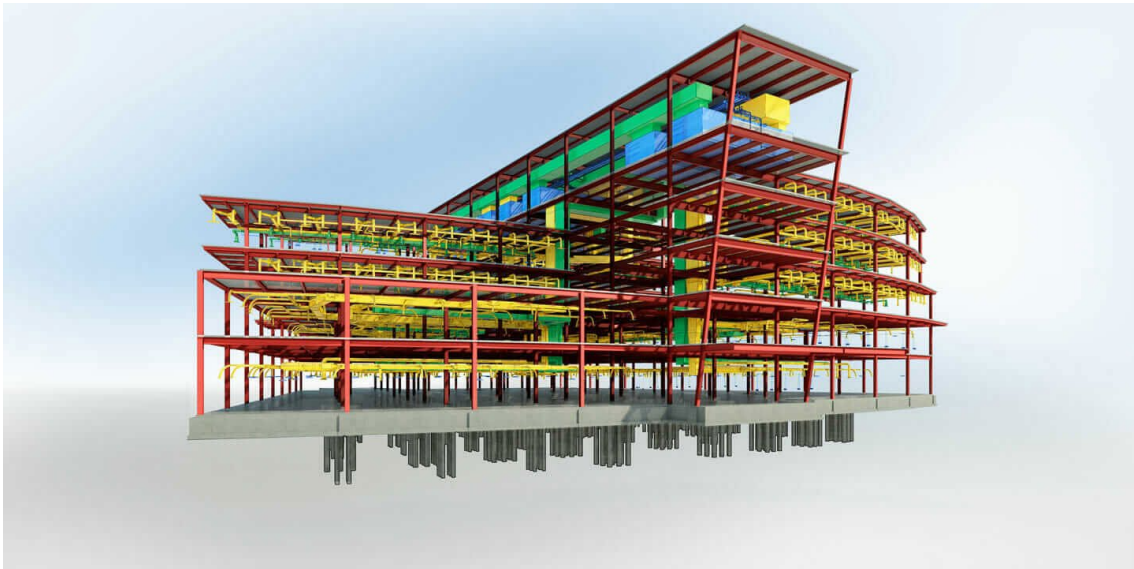
Estes métodos de representação e edição de formas tridimensionais chegou ao setor AECO através de ferramentas de desenho assistido por computador (CAD) no início da década de 80. Embora o setor tenha enveredado pelo caminho da representação geométrica a duas dimensões, utilizando ferramentas como o *AutoCAD*, o potencial inerente à representação de objetos tridimensionalmente acabou por resultar na criação das ferramentas BIM atuais, baseadas na modelação paramétrica de objetos.

Aplicado ao setor da construção, este tipo de modelação permite que se criem modelos de edifícios através da aplicação de regras ou algoritmos, que determinem automaticamente parâmetros associados aos elementos que os constituem. Estas regras paramétricas têm a função de criar relações entre diferentes elementos de edifícios, eliminando manipulações manuais que possam criar imprecisões nos modelos. A título de exemplo, na criação de um elemento de parede, pode-se definir uma regra que determine que esta vai do pavimento de um piso até ao seu teto. Assim, qualquer alteração que seja feita ao pé direito do espaço onde essa parede se insere, este elemento ajustar-se-á automaticamente de maneira a cumprir a regra definida [13].

Esta automatização permite que se cometam menos erros de conceção, normalmente associados à manipulação manual de objetos em modelos tridimensionais. Assim, o processo de conceção de edifícios pode tornar-se mais rápido, e permite a intervenção de vários intervenientes, promovendo a multidisciplinaridade entre os profissionais responsáveis pela conceção, o dono de obra e as empresas de construção, através da representação do modelo BIM criado, resultando em modelos como o exposto na Figura 1.

Então, as ferramentas BIM podem representar diferentes oportunidades para diferentes intervenientes. Assim, Chuck Eastman, no seu livro *BIM Handbook* [12], expôs o papel dos modelos BIM para os diferentes envolvidos na conceção de um edifício. No caso dos donos de obra e proprietários, os modelos podem reduzir tempos associados à conceção do edifício e

obter estimativas de custos mais precisas. Para Engenheiros e Arquitetos, os modelos BIM podem ajudar a tomar decisões conjuntas que melhorem a interação entre a arquitetura e as diversas especialidades de engenharia, evitando que se chegue à fase de construção com conflito de soluções entre estes profissionais. As empresas de construção, por sua vez, podem recorrer aos modelos BIM, durante a sua fase de construção, para efeitos de planeamento de obra, integração dos modelos em ferramentas de controlo de custos, prazos, verificação, orientação e controlo de atividades construtivas.

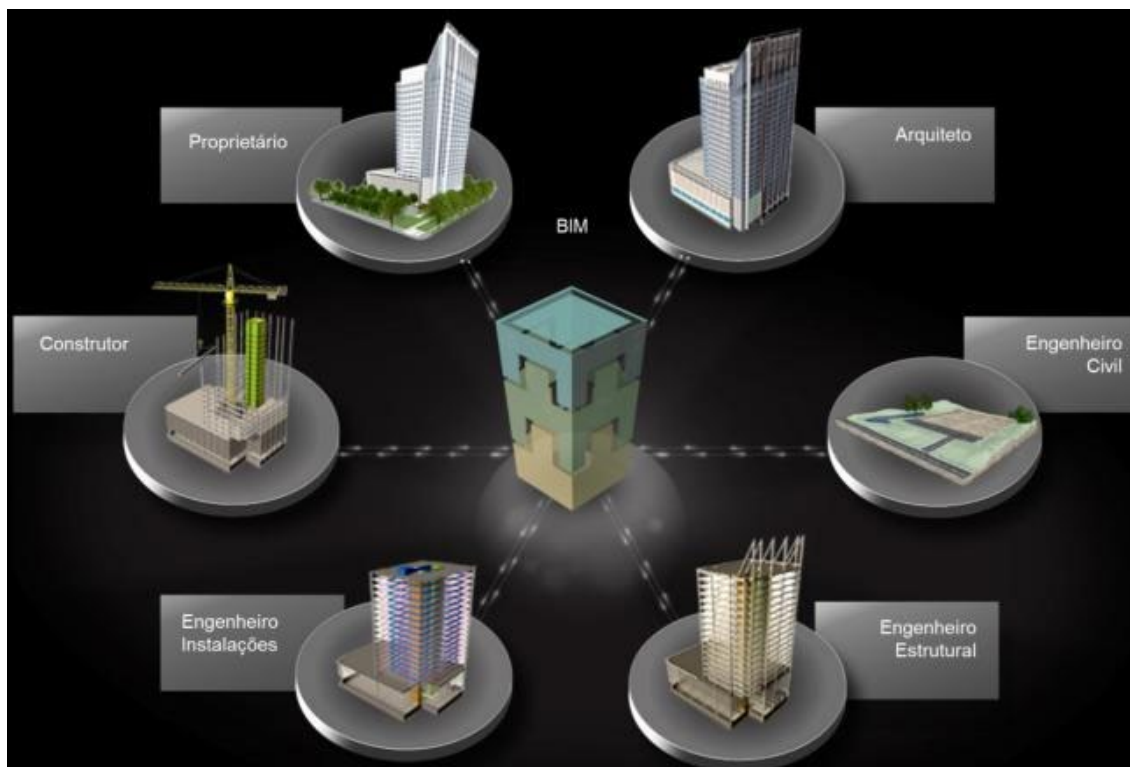


**Figura 1. Exemplo de um modelo BIM 3D de um edifício [14]**

Como tal, o modelo BIM pode apresentar-se como um elemento central na elaboração de um projeto, atuando como um elo de ligação entre todos os intervenientes, facilitando o trabalho em equipas multidisciplinares. A informação adicionada ou alterações implementadas por um interveniente podem ser consultadas pelos restantes, acelerando o processo de obtenção das melhores soluções técnicas, viáveis para todos os profissionais responsáveis pelo projeto.

A Figura 2 representa o papel do BIM e a relação do mesmo com os diferentes intervenientes, responsáveis pela conceção, construção e gestão de edifícios, apresentando esquemas de exemplos de trabalhos específicos.

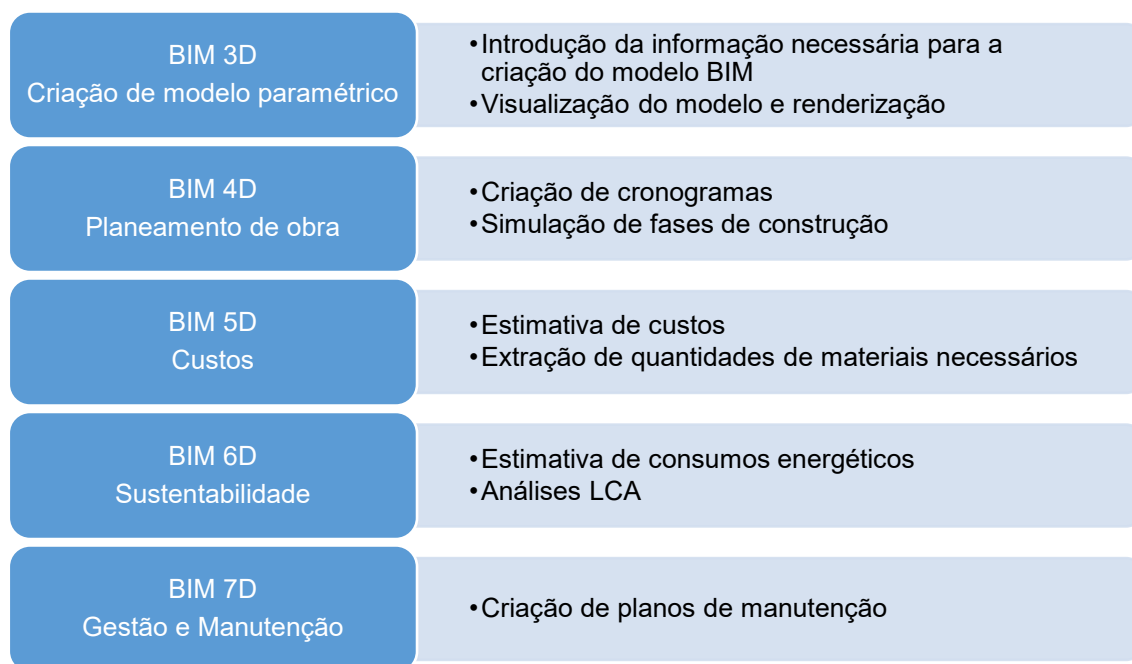
Adicionalmente, as ferramentas BIM contêm funções que se ajustam às diferentes fases de um projeto, com a adição de informação ao modelo ao longo do seu desenvolvimento. Esta informação pode ser decomposta em diferentes dimensões, de acordo com o tipo de informação associada ao modelo. Cada nível de informação adicional pode representar uma nova dimensão, capaz de alargar as capacidades e potencialidades de um modelo BIM. Assim, as diferentes dimensões facilitam a intervenção de cada um dos diferentes intervenientes responsáveis pela conceção, construção e gestão de um edifício., através da adição de informação relevante para intervenientes específicos, conforme a fase do ciclo de vida de uma edificação.



**Figura 2. Relação entre colaboradores em projeto com BIM (adaptado de [15])**

A criação de um modelo tridimensional paramétrico representa a terceira dimensão de informação, designado por BIM 3D. A junção do fator tempo ao modelo criado, que permite a criação de cronogramas de obra, designa-se por BIM 4D, sendo esta a quarta dimensão de informação associado a modelos BIM. O BIM 5D representa a dimensão em que toda a informação sobre custos é introduzida no modelo. No panorama atual, esta dimensão toma particular importância, pois permite criar um sistema de controlo de custos a empregar ao longo de todo o projeto, evitando a ocorrência de trabalhos não previstos na fase de construção. A sexta dimensão de informação BIM refere-se a toda a informação associada à sustentabilidade do projeto e análises LCA (*Life Cycle Assessment*), resultando no BIM 6D. Esta dimensão inclui toda a informação necessária para análises e simulações energéticas do modelo BIM, consumos energéticos e certificações energéticas e / ou ambientais. Por fim, o BIM 7D refere-se à informação de gestão e manutenção do edifício na sua fase de utilização, permitindo criar planos de manutenção a partir do modelo BIM [15]. A Figura 3 representa esquematicamente as dimensões do BIM.

A presente dissertação insere-se na sexta dimensão do BIM, pois explora o impacto das ferramentas BIM na obtenção de uma maior eficiência energética em edifícios, através da componente energética. É de realçar que esta dimensão engloba outras componentes que afetam a sustentabilidade do setor AECO, como os consumos de água, gás, eletricidade, produção de lixo e impacto ambiental.



**Figura 3. Níveis de informação de BIM (adaptado de [15])**

No que toca ao nível de implementação do BIM, este tem crescido a um ritmo gradual [16], e países como a Finlândia e Singapura surgem como líderes [17], por obrigarem o recurso à metodologia BIM para construção de edifícios e por esta assumir já um papel importante em projetos de grandes dimensões nestes países. Contudo, é na América do Norte que o nível de implementação de metodologias BIM no setor de construção é maior, seguido da Oceânia, Europa, Médio Oriente, Ásia e por fim, América do Sul [18, 19].

A União Europeia, através da Diretiva 2014/24/EU e da emissão de um *Handbook* [20], pretende facilitar a integração de BIM em obras públicas, uma vez que permite aos seus Estados-Membros exigir a utilização de ferramentas de modelação de construção ou similares nas empreitadas de obras públicas. Em Portugal, apesar de ainda não ser obrigatório o recurso a BIM para os projetos de construção levados a cabo no seu território, têm sido dado passos em direção à criação de uma Norma nacional de BIM, que regule a utilização destas ferramentas [21], através da organização de várias conferências e congressos focados no tema BIM, como é o caso do congresso PTBIM.

A publicação das normas ISO 19650-1 e 19650-2, em Janeiro de 2019, veio regular a aplicação de metodologias BIM na construção e operação de edifícios. A norma ISO 19650-1 expõe conceitos e princípios e sugere recomendações sobre a forma de gerir a informação digital relacionada com edifícios. A norma ISO 19650-2 apresenta os requisitos de gestão de informação em diferentes fases.

Estas normas aplicam-se a todo o ciclo de vida de um bem imóvel, incluindo planeamento estratégico, conceção inicial, engenharia, desenvolvimento, documentação, construção, operação diária, manutenção, remodelação, reparação e fim de vida útil.

Normas futuras da série 19650 poderão incluir uma parte 3, relacionada com a gestão da fase operacional dos imóveis e uma parte 5 dedicada à modelação da informação de edifícios com vista à segurança [22].

## 2.2. Eficiência energética

Atualmente, a eficiência energética em edifícios é avaliada através de sistemas de classificação energética que, através da atribuição de um nível de eficiência energética, tenta caracterizar energeticamente o edificado. Este processo é já obrigatório para novos edifícios, operações de compra e venda de imóveis em Portugal, entre outros. Contudo, um certificado energético não é suficiente para caracterizar todos os aspetos inerentes à performance energética de um edifício, especialmente no que toca aos valores reais de consumos e emissão de gases de estufa em fases de construção e utilização de edifícios, limitando-se à avaliação da qualidade da envolvente térmica (onde ocorrem as perdas e ganhos), localização do imóvel e eficiência dos equipamentos existentes.



Figura 4. Níveis de certificação energética

O consumo energético e a produção de gases de estufa, associados à construção e operação dos edifícios, segundo o relatório elaborado para o Programa Ambiental das Nações Unidas pela Agência Internacional da Energia (IEA) [11], tem vindo a aumentar, verificando-se um limitado avanço no que toca à implementação de políticas ambientais capazes de os reduzir. Os valores de consumo energético e produção de dióxido de carbono são apresentados nas Figuras 5 e 6, respetivamente.

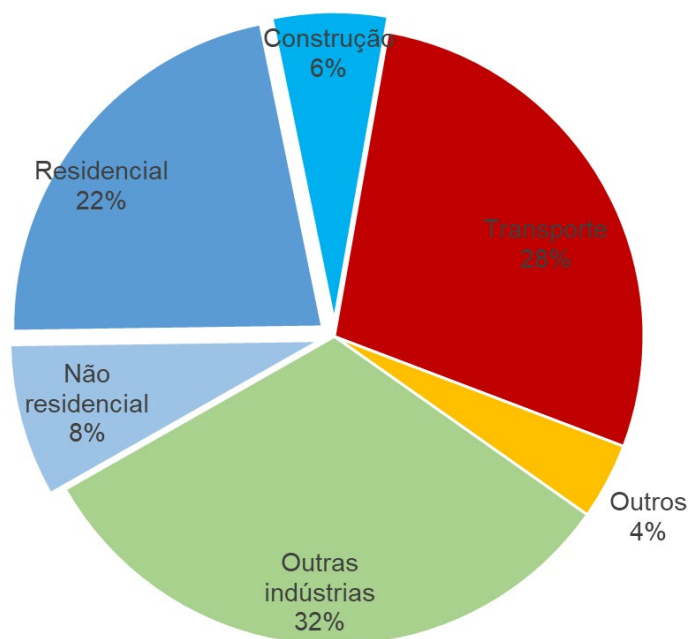


Figura 5. Consumo energético em 2018, por setor (Adaptado de IEA [11])

A construção e operação de edifícios, residenciais e não residenciais, representam 36% do panorama global de consumo energético. O consumo associado aos edifícios residenciais, como seria expectável, apresenta-se como o mais alto, dentro do setor AECO, uma vez que este tipo de edifícios representa a maior parte do edificado existente. Considerando que o consumo energético está diretamente associado à produção e emissão de gases de estufa, como o dióxido de carbono, a IEA fez o levantamento da emissão destes gases, associando-a aos diferentes setores:

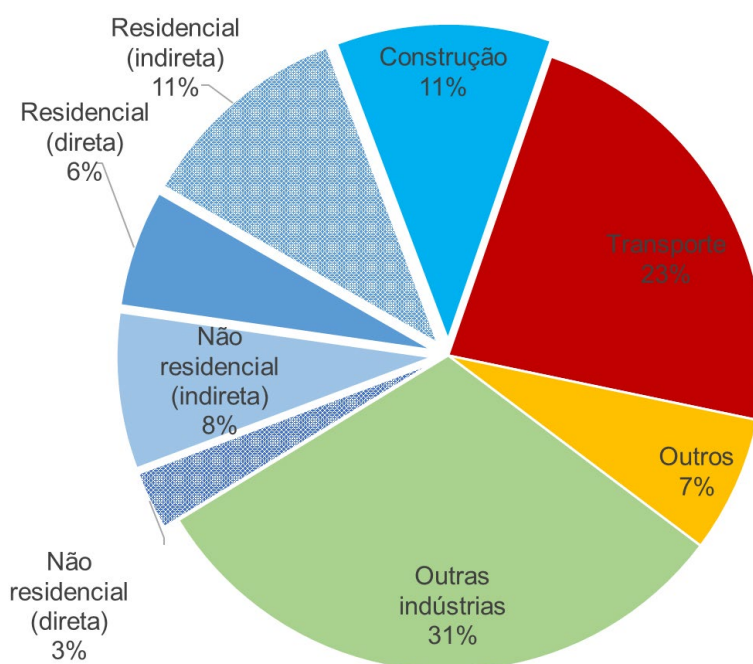


Figura 6. Emissão de CO<sub>2</sub> em 2018, por setor (Adaptado de IEA [11])

Assim, verifica-se que a emissão de CO<sub>2</sub> vai ao encontro dos resultados relativos aos níveis de consumo energético, com a construção e operação de edifícios a serem responsáveis pela emissão de 39% dos gases de estufa, globalmente. Aqui, a construção de edifícios representa a maior porção da produção de gases de estufa associada a todo o setor AECO, com um total de 11%.

Tendo em conta os elevados valores de consumo e emissões associados à construção e operação de edifícios, torna-se necessário proceder a um processo de descarbonização do setor AECO, de maneira a que se atinjam os objetivos delineados no Acordo de Paris [23].

Assim, a IEA [11] delineou estratégias com o objetivo de reduzir os altos consumos e emissões de gases de estufa na construção e operação de edifícios:

### 1. Edifícios novos:

- a. Desenvolver e implementar legislação obrigatória, através da transformação de recomendações atuais para obrigações que estabeleçam uma eficiência mínima para novos edifícios;
- b. Reforçar os regulamentos de construção, através da definição de um período obrigatório de revisão dos regulamentos de desempenho de três a cinco anos, com o objetivo de atingir emissões zero;
- c. Integrar a energia renovável em novos projetos de edifícios para atingir níveis zero de emissões;
- d. Facilitar a conceção e construção generalizada de edifícios sustentáveis, aumentando e facilitando o acesso a financiamento para permitir um maior investimento privado;
- e. Desenvolver políticas que assegurem que todas as novas instalações de carácter público sejam edifícios eficientes e com baixas emissões.

### 2. No caso de edifícios existentes, a IEA sugere:

- a. Aumentar anualmente as taxas de reabilitação de edifícios nos países desenvolvidos para uma média de 2% do edificado existente 2025, e para 3% até 2040. As taxas de reabilitação nos países em desenvolvimento deverão atingir 1,5% até 2025, e 2% até 2040;
- b. Promover reabilitações profundas, que reduzam o consumo de energia do edifício em valores iguais ou superiores a 30-50%;
- c. Promover projetos de reabilitação, através da disponibilização de financiamento específico, para estimular o investimento privado;
- d. Desenvolver políticas que assegurem que as instalações de carácter público existentes sejam reabilitadas para se tornarem edifícios eficientes e com baixas emissões.

3. No que toca às operações, foram definidas as seguintes recomendações:
- a. Instalação de sistemas de gestão energética. Promover a formação e utilização de processos de gestão de energia em todos os edifícios, particularmente os não residenciais;
  - b. Contratar gestores especializados em matérias de sustentabilidade e energia, promovendo o desenvolvimento de capacidades entre eles;
  - c. Implementação de controlos e sensores de temperatura, iluminação e sistema de ventilação, bem como de medição de energia;
  - d. Disponibilizar informação, fornecendo dados e informações que ajudarão os gestores e utilizadores dos edifícios a tomar melhores decisões, a nível energético.

Com estas recomendações, a Agência Internacional da Energia espera conseguir reduzir o impacto ambiental negativo associado à construção e operação de edifícios. Contudo, para uma ampla adoção destas recomendações, será necessário recorrer a legislação específica, de maneira a transformar as atuais recomendações em regulamentos a que o setor AECO terá de se submeter.

Neste campo, a União Europeia emitiu já diretivas direcionadas para o aumento da performance energética de edifícios, como são o caso das Diretivas 2010/31/EU, 2012/27/EU e 2018/844/EU, através das quais a UE espera atingir um edificado altamente eficiente e de emissões zero até 2050. Desde a década de 80 que a criação de legislação de construção nacional, baseada em diretivas europeias, provocou um impacto positivo no consumo energético em edifícios, reduzindo atualmente o mesmo para cerca de metade do que era nessa década [24, 25]. Então, devem os Estados Membro da UE continuar a adaptar a sua legislação específica às Diretivas EU.

Em Portugal, foi aprovado pelo conselho de ministros, em 2008, o Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética que integrou políticas e medidas de eficiência energética a desenvolver entre o ano 2008 e 2015. Em 2011, foi lançado o Programa de Eficiência Energética na Administração Pública – ECO.AP, que visou criar condições para o desenvolvimento de uma política de eficiência energética na Administração Pública, designadamente nos seus serviços, edifícios e equipamentos, com o objetivo de, até 2020, alcançar um aumento de eficiência energética de 20%, indo ao encontro das recomendações da União Europeia, no que toca à gestão de edifício de carácter público.

No que toca a legislação específica para edifícios e a sua performance energética, Portugal deu os primeiros passos em 2006, quando ratificou o Decreto-Lei n.º 78/2006, que aprovou o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios. Em 2009 foi definido o Método de Cálculo Simplificado para Certificação Energética de Edifícios Existentes no âmbito do RCCTE, através do Despacho n.º 11020/2009, facilitando o processo de

certificação energética em edifícios para os quais não exista informação disponível que permita a aplicação integral do cálculo regulamentar daquele regulamento.

Atualmente, o Decreto-Lei n.º 118/2013 regula o Regime de Certificação e Desempenho Energético dos Edifícios, entretanto alterado pelos Decreto-Lei n.º 68-A/2015, Decreto-Lei n.º 194/2015, Decreto-Lei n.º 251/2015, Decreto-Lei n.º 28/2016, Lei n.º 52/2018 e Decreto-Lei n.º 95/2019. O DL 118/2013, na sua atual redação, transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios («Diretiva n.º 2010/31/UE») e veio reformular o regime do Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE) (regulado pelas portarias 349-A/2013 a 349-D/2013), que integra o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), fazendo a transição do antigo RCCTE.

Adicionalmente, e através da série de Despachos n.º 15793-C/2013 a 15793-L/2013, emitidos pelo Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, através da Direcção-Geral de Energia e Geologia, foram publicados modelos, fatores, regras, parâmetros, elementos mínimos e metodologias de cálculo relacionados com a utilização de energia e eficiência energética de edifícios.

Portugal tentou ainda dar o exemplo a investidores privados através de diversas medidas que visaram o aumento da performance energética de edifícios de administração pública. Os despachos n.º 10223/2009, 12875-A/2009, 16123-A/2009 previram investimentos destinados à melhoria da eficiência energética dos edifícios públicos. Adicionalmente, e através do Despacho n.º 16140/2009, foram implementadas medidas energéticas e de alteração de comportamentos de consumo, designadamente no que se refere ao Estado e edifícios públicos.

Pode-se afirmar então que o nosso país tem tomado algumas medidas que visam cumprir as Diretivas Europeias, na esperança de reduzir consumos e emissões decorrentes da construção e operação de edifícios em território nacional.

# 3

## Metodologia

A aplicação de métodos ou de uma metodologia em trabalhos de investigação científica tem por base uma tentativa de normalizar os processos de obtenção, análise e organização de dados. Uma metodologia, quando identificada e clara, aumenta o padrão e rigor de qualquer trabalho onde esta seja aplicada.

O presente capítulo definirá a metodologia a empregar no decorrer das diferentes fases que compõem o presente documento, definindo critérios claros para cada uma delas. A finalidade de tal definição prende-se à necessidade de apresentar resultados fidedignos, obtidos, analisados e expostos com clareza e transparência, para que o presente documento possa ser considerado válido do ponto de vista científico.

### **3.1. Recolha de dados**

O presente trabalho só poderá obter validação se se basear em dados publicados por uma grande variedade de autores, permitindo assim que se consiga perceber o panorama geral associado aos temas aqui em estudo e o estado atual da arte associada à avaliação energética através de ferramentas BIM.

O processo de investigação deverá contemplar três critérios de inclusão para seleção de referências [26] que, depois de selecionadas e armazenadas, darão origem à análise cientiométrica e revisão sistemática de leitura previstas.

Os critérios de inclusão deverão incidir sobre os termos de pesquisas, suas combinações e os conectores lógicos, a seleção de bases de dados a utilizar para a pesquisa e, por fim, o tipo de documentos a incluir neste processo de recolha de informação [26].

Neste trabalho, além de utilizados os três critérios atrás mencionados, e para garantir a permanência na esfera dos temas que se pretende analisar, obtiveram-se ainda documentos adicionais a partir da lista de referências de alguns documentos que se consideraram mais importantes.

Foram considerados como documentos importantes aqueles que incidem diretamente nos temas aqui em análise e que, dessa maneira, poderiam ter contribuições valiosas nas referências a que recorreram.

Aplicados os critérios de recolha de dados apresentados de seguida, foram obtidas 1556 referências a analisar sobre os temas abordados na presente dissertação.

### 3.1.1. Termos de pesquisa

O âmbito temático da presente dissertação tem dois termos principais associados: BIM e Eficiência energética. Contudo, uma pesquisa apoiada apenas nestes dois termos não revelará a interação entre eles. Torna-se então necessário recorrer a conectores lógicos que representem corretamente a interação entre os termos individuais de pesquisa.

Optou-se então pelos seguinte termos de pesquisa:

1. "BIM" AND "Building" AND "Energy efficiency"
2. "BIM" AND "Building" AND "Energy efficiency" OR "Energy performance"
3. "BIM" AND "Building" AND "Green"

Convém salientar que se acrescentou o termo "*Building*" para tentar evitar o desvio que o termo "*Energy Efficiency*" poderia trazer aos resultados, tendo em conta que se trata de um tema com representação em quase todo o quotidiano da vida humana atual, o que poderia retornar resultados sobre a eficiência energética aplicada a temas não relacionados com edifícios, como por exemplo, máquinas, computadores, etc. Assim, ao acrescentar o termo individual "*Building*", garante-se que as referências obtidas estão diretamente relacionadas com o setor da construção. O termo "*Green*" surge como complemento ao conceito de eficiência energética, uma vez que muitos autores se referem a processos de construção eficiente como "*Green Building*", por resultar em impactos ambientalmente amigáveis.

O conector a que se recorreu (AND) garante a ligação entre todos os termos pesquisados, possibilitando assim que se investigue a relação entre os temas representados pelos termos individuais pesquisados. Esta ligação é a base para o trabalho levado a cabo no presente documento, tendo em conta que se pretende investigar a magnitude da avaliação da eficiência

energética com recurso a ferramentas ou metodologias BIM. O conector lógico “OR” foi utilizado para incluir na pesquisa artigos que se refiram a eficiência energética em edifícios como performance energética, permitindo substituir o termo “*Energy efficiency*” por “*Energy performance*”

### 3.1.2. Bases de dados

As bases de dados constituem bibliotecas com grandes quantidades de informação armazenada. Com critérios de pesquisa definidos, torna-se possível obter informação sobre temas específicos.

O termo de pesquisa definido e apresentado anteriormente foi então aplicado nas seguintes bases de dados:

1. *Google Scholar*, de onde se extraíram 400 referências. Apesar desta base de dados apresentar cerca de 12000 resultados, não seria prático proceder à recolha e consulta de todos esses resultados. Optou-se então por recolher as 400 mais relevantes, de acordo com a classificação atribuída pela própria base de dados;
2. *Science Direct*, de onde se extraíram 627 referências. Esta base de dados, que se estabelece como líder de trabalhos sujeitos a revisão de pares [27], permite a opção de extração de todas as referências que uma dada pesquisa retorne, o que justifica o elevado número de publicações lá recolhidas;
3. *ASCE Library*, de onde se extraíram 181 referências. Esta base de dados foi incluída nas pesquisas por se focar exclusivamente em conteúdos relacionados com a prática da Engenharia Civil, pelo que se considerou ser relevante [28];
4. *ICE Library*, de onde se extraíram 63 referências, descreve-se como um líder na publicação de informação de investigação essencial nos campos da Engenharia Civil e Engenharia Ambiental, pelo que foi adicionada a esta lista de bases de dados a consultar [29].

Como referido anteriormente, a consulta de referências de alguns artigos selecionados mais importantes perfeitamente as restantes 285 referências recolhidas.

As pesquisas levadas a cabo nas bases de dados utilizadas, foram efetuadas ao longo dos meses de março e abril de 2020.

### 3.1.3. Tipo de referências

Nas pesquisas levadas a cabo, não foi definido nenhum critério para os tipos de referência a incluir na pesquisa. Como tal, e como exposto no capítulo dedicado à análise cienciométrica, a biblioteca criada inclui diversos tipos de referências, com destaque para artigos de revista, artigos de conferência, livros, teses e relatórios.

### 3.1.4. Armazenamento de dados

Os dados recolhidos foram então armazenados num *software* de gestão de bibliotecas. O *software* utilizado, além de permitir o armazenamento dos metadados de todas as referências recolhidas, é capaz de associar a cada uma delas, o ficheiro PDF correspondente, o que facilita a consulta, leitura e análise das mesmas.

Adicionalmente, existe a opção de criar diferentes grupos dentro da biblioteca criada, para dessa maneira ser possível criar categorias principais e tópicos associados, que se possam identificar dentro dos temas aqui em análise.

### 3.1.5. Critérios de exclusão

Tendo em conta o elevado número de publicações recolhidas (1556), facilmente se poderia admitir que nem todas teriam informação efetivamente relevante para o tema aqui em análise. Como tal, optou-se por definir critérios de exclusão para tentar reduzir o número de documentos e, conseqüentemente, informação desnecessária e/ou não aplicável no presente estudo.

Para tal, e utilizando a opção de criação de grupos disponível no *software* de gestão de bibliotecas aqui utilizado, procedeu-se à criação de dois grupos, denominados respetivamente de “Relevante” e “Irrelevante”. No grupo “Irrelevante”, decidiu-se colocar todas as referências eliminadas pelos critérios de exclusão definidos. As restantes referências foram colocadas no grupo “Relevante”, por se considerar conter informação de natureza pertinente para o estudo aqui realizado.

Em primeira fase, e como ponto de partida, decidiu-se excluir os dados duplicados. A duplicação de dados pode ser justificada pelo uso de diferentes bases de dados para recolha da informação necessária. O mesmo documento pode estar presente em mais do que uma base de dados, pelo que se torna necessário recorrer à depuração deste tipo de referências.

O *software* de gestão de bibliotecas tem como sua parte integrante uma função de identificação de duplicados. Essa opção, além de identificar, permite comparar as referências consideradas duplicadas para que o utilizador possa determinar se são efetivamente congéneres e proceder à escolha sobre qual das referências quer manter na biblioteca.

A aplicação deste primeiro critério de exclusão resultou na eliminação de 215 referências da biblioteca.

O segundo critério de exclusão aplicado passou pela eliminação de referências com conteúdo considerado irrelevante para o tema aqui em análise. Definem-se como irrelevantes as referências que, apesar de terem sido recolhidas a partir dos termos de pesquisa, não apresentem qualquer relação com investigações aprofundadas nos temas. A aplicação deste

critério foi efetuada a partir da leitura dos títulos e *abstracts* dos documentos, excluindo aqueles que não apresentassem informação suficiente sobre BIM e/ou Eficiência energética.

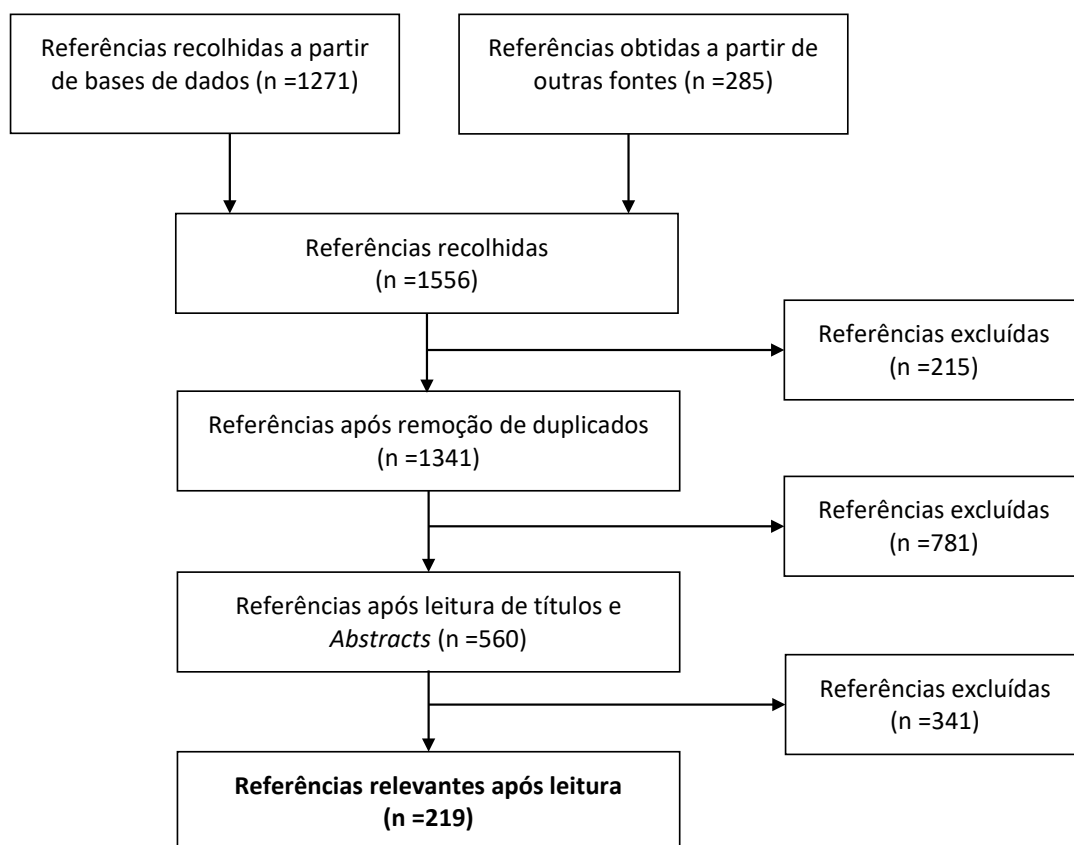
Este segundo critério tornou 781 referências irrelevantes.

O terceiro critério consistiu na leitura das referências restantes após aplicação dos dois primeiros critérios de exclusão. Uma leitura das referências permite que se conheça o seu conteúdo, podendo classificá-lo como irrelevante caso não apresente informações suficientes para contribuir para a elaboração da presente dissertação.

Este passo resultou numa exclusão de 341 artigos da biblioteca.

A biblioteca final ficou organizada nos dois grupos identificados anteriormente, com 219 referências no grupo denominado por “Relevante” e 1122 artigos considerados “Irrelevantes”.

A Figura 7 apresentada de seguida define o processo de exclusão definido e aplicado no decorrer deste estudo:



**Figura 7. Processo de aplicação dos critérios de exclusão**

As referências que, após aplicação dos critérios de exclusão, permaneceram como relevantes na biblioteca criada, foram então utilizadas para se proceder à elaboração de uma análise cienciométrica e uma revisão sistemática de leitura, cujos aspetos gerais de elaboração são

apresentados nas secções seguintes. A lista de referências selecionadas para análise corresponde às referências [4-7, 16-20, 30-239].

### **3.2. Análise cienciométrica**

Uma análise cienciométrica identifica e analisa a evolução da investigação científica sobre determinado tema, ao longo do tempo. Trata-se de um método de análise quantitativa que depende de grandes quantidades de dados bibliográficos para que possa ser aplicada, permitindo assim determinar o estado de desenvolvimento da investigação [43].

Este tipo de análise recorre principalmente a análises de coocorrência e coautoria [43, 78, 145, 228]. No presente trabalho, recorreu-se às análises identificadas para tentar identificar padrões e tendências e determinar a evolução da investigação sobre os campos científicos do BIM e Eficiência Energética.

Para tal, recolheu-se toda a informação quantitativa das 219 referências analisadas, procedendo a uma compilação de toda essa informação. Para uma mais fácil interpretação dos dados, recorreu-se a *softwares*, descritos abaixo, capazes de proceder à agregação e demonstração dos resultados das análises.

O *Microsoft Excel* revelou-se uma ferramenta poderosa para agregar e analisar aspetos quantitativos das referências pertencentes à biblioteca criada. O *software* de gestão de bibliotecas utilizado permite a exportação de dados para este produto *Microsoft*, deixando a cargo do utilizador os campos a extrair de cada referência. As análises efetuadas e resultados correspondentes encontram-se expostas no Capítulo 4, em conjunto com as especificidades associadas a cada uma dessas análises.

Para as análises mais complexas, como são as análises de coocorrência e coautoria, recorreu-se a um *software* de licença livre denominado por *VOSViewer*. Esta ferramenta é descrita pelos seus criadores como uma ferramenta capaz de construir e visualizar redes bibliométricas, assentes sobre informações associadas a bibliotecas de referências bibliográficas [240].

As análises de coocorrência são habitualmente utilizadas para identificar as palavras-chave que mais ocorrem numa determinada biblioteca e as relações entre todas os termos-chave identificados. Contudo, no capítulo seguinte, apresentam-se diversas análises de coocorrência além da tradicional efetuada a palavras-chave. Optou-se por tentar analisar aspetos que poderiam coocorrer em diferentes referências, como o país de origem das referências e as ferramentas informáticas utilizadas pelos autores em cada uma das referências, quando aplicável.

### 3.3. Revisão sistemática de literatura

Uma revisão de literatura consiste na pesquisa e avaliação do material literário publicado sobre um determinado tema, com o objetivo de documentar o estado de arte sobre esse mesmo tópico. Para que tal ocorra, uma revisão deve aglomerar o máximo de informação relevante sobre um dado campo científico e apresentá-la de maneira organizada, recorrendo a um processo sistemático [241].

No Capítulo 5 procede-se à análise da informação científica recolhida. Será feita uma organização dessa mesma informação, com o objetivo de trazer à luz o estado da arte sobre o uso de ferramentas BIM para avaliação da eficiência energética em edifícios, o que irá representar as possibilidades atuais, em forma das práticas correntes identificadas ou levadas a cabo pelos autores das publicações analisadas.

Para cumprir tais objetivos, recorreu-se a uma organização da informação recolhida em categorias principais e tópicos, de acordo com a informação específica de cada uma das referências analisadas. Embora todas estejam diretamente ligadas ao BIM e ao uso das suas ferramentas e metodologias para avaliar a eficiência energética, podem incidir sobre temas díspares, tendo em conta a vasta área que os temas aqui em análise cobrem.

Identificaram-se as categorias principais de informação existentes na biblioteca em análise, aos quais foram associados os tópicos e referências que sobre eles incidem. Feita esta aglomeração de documentos, organizou-se a informação neles identificando, em primeira instância os principais tópicos de informação existentes, aglomerando-os de seguida em categorias principais de informação. Para cada um dos tópicos procedeu-se à análise do seu estado atual da arte e perspectivas futuras.

A aplicação desta metodologia resultou na revisão sistemática de literatura exposta no Capítulo 5.



# 4

## Análise cienciométrica

O presente capítulo incidirá num levantamento dos dados bibliométricos das referências recolhidas. Tem como objetivo identificar padrões nestes dados, que possam levar a conclusões de interesse e que uma revisão de literatura clássica não consideraria.

Aplicando a metodologia exposta na Secção 3.2, foram feitas as seguintes análises:

1. Evolução do número de publicações anuais;
2. Tipo de publicação;
3. Fonte da publicação;
4. Coocorrência de palavras-chave;
5. Tendência de ocorrência de palavras-chave;
6. Distribuição global de publicações;
7. Relação entre países de origem de publicação;
8. Artigos mais citados;
9. Rácio de citações;
10. Evolução do número de citações anual;
11. Autores mais publicados
12. Coautoria
13. Autores mais citados;
14. *Software* utilizado;
15. Relação entre *softwares*;

## 16. Público-alvo

Apresentam-se estas análises de seguida, com metodologia específica para o tratamento de dados e processo de análise explanados individualmente.

### 4.1. Introdução

A evolução científica e das tecnologias de informação permitiu, ao longo dos tempos, um avanço de grandes proporções, com um aumento progressivo de publicações associadas aos diferentes campos de investigação atuais.

A quantidade de informação disponível atualmente, quando associada a metodologias de pesquisa e recolha, como a descrita anteriormente, permite a elaboração de uma análise métrica de todas as publicações, de maneira a tentar encontrar relações e ligações entre literatura, que poderiam ser descuradas numa análise mais tradicional [242].

Desde a década de 60, três termos diferentes aparecem associados a este tipo de análise: Bibliometria, Cienciométrica e Infometria. Embora estas três terminologias apresentem diferentes objetivos, partilham princípios, metodologias e ferramentas [243].

O termo bibliometria aparece como sendo o mais antigo, tendo sido definido originalmente como a aplicação de métodos matemáticos e estatísticos a livros e outras fontes de informação [244]. Após décadas de utilização, este termo foi associado à análise quantitativa de publicações físicas [245], entretanto adaptado para incluir publicações de âmbito escolar e científico [246].

Cienciométrica tem a sua origem no trabalho de Derek de Solla Price e foi primeiramente definida como uma disciplina que estuda a “ciência da ciência”, com recurso a métodos quantitativos [247]. Foca-se principal, mas não unicamente, na análise de citações e o processo de citação na literatura académica [248]. Esta métrica tenta quantificar e revelar os processos associados ao avanço científico [249], centrando-se especificamente no estudo da ciência, incluindo ciências sociais e humanidades. Recentemente, tornou-se numa ferramenta poderosa na avaliação da performance de investigação [248].

Por fim, o termo Infometria define o processo analítico mais abrangente de entre as três métricas, pois tem em conta todos os tipos de informação, independentemente da origem ou plataforma de publicação [250]. É definido como o estudo da aplicação de métodos matemáticos à informação científica [247].

Para a elaboração deste documento, recorreu-se a processos mais próximos dos utilizados e descritos no conceito de análise cienciométrica, pelo que se utiliza este termo para descrever a análise em desenvolvimento no presente capítulo.

Procedeu-se a um levantamento das diferentes propriedades das publicações, com o intuito de caracterizar toda a biblioteca. Recorreu-se a diferentes ferramentas de carácter informático para armazenamento e análise de dados.

Conforme descrito anteriormente, para além de um *software* de criação e gestão de bibliotecas, utilizou-se o *Microsoft Excel* para criação de gráficos e tabelas, com o objetivo de facilitar o processo de interpretação de dados. Para análise de coautoria, coocorrência de palavras-chave e outros processos associados a este tipo de análises, o *VOS Viewer* permitiu a criação de redes visuais, com identificação de grupos (*clusters*), facilitando a identificação de possíveis ligações entre toda a biblioteca.

## 4.2. Número de publicações

O tamanho da biblioteca em análise permite observar tendências em várias frentes da pesquisa levada a cabo pela comunidade científica nos campos científicos associados ao BIM e à eficiência energética.

Uma das análises de maior facilidade de interpretação é o número de publicações por ano. Esta permite que se identifique a existência de alguma tendência no período analisado, quer seja de crescimento, estagnação ou até de decréscimo nos artigos publicados.

Para esta análise organizaram-se as referências existentes na biblioteca por ano de publicação associados a cada uma delas, aglomerando-as através de contagem, de maneira a obter o número total de publicações em cada ano. O período em análise será o compreendido entre os anos 2009 e 2019.

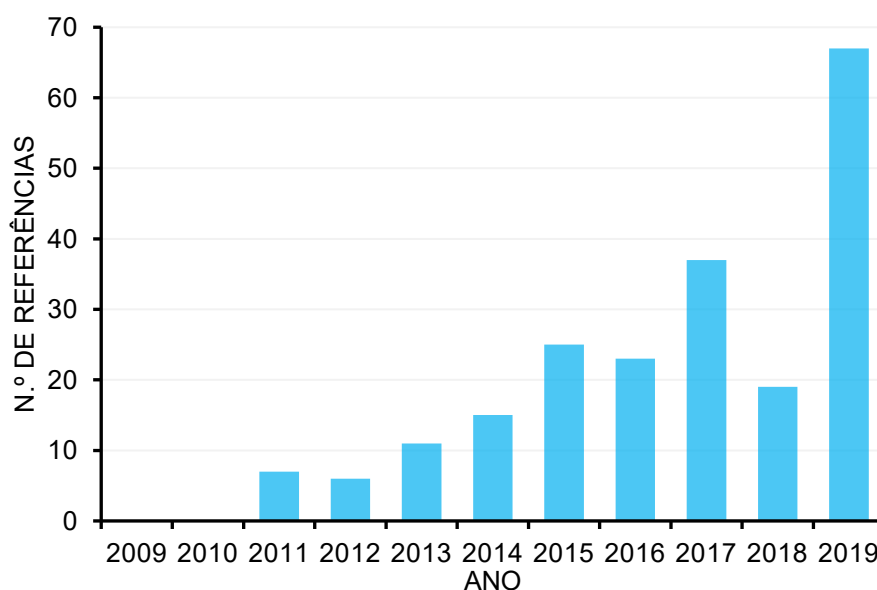


Figura 8. Número de publicações por ano

Observa-se um crescimento não linear de publicações até o ano de 2016, em que se nota uma ligeira redução neste número, de 25 publicações em 2015 para 23 em 2016. Uma ligeira retoma do crescimento é observável em 2017 (37 publicações), com novo decréscimo em 2018, ainda que este número seja de dezanove publicações. O número máximo de referências ocorre em 2019, com 67 publicações. Isto poderá indicar que ainda não se chegou ao pico de interesse nestas áreas científicas, tornando os temas aqui em análise pertinentes e atuais na comunidade.

Nos anos 2009 e 2010 não existe nenhuma publicação na biblioteca em análise. Esta situação explica a não ocorrência de palavras-chave nesses anos, na análise efetuada na Subsecção 4.5.2 e corrobora a possível conclusão lá exposta, no que toca ao interesse da comunidade científica nos temas aqui em análise.

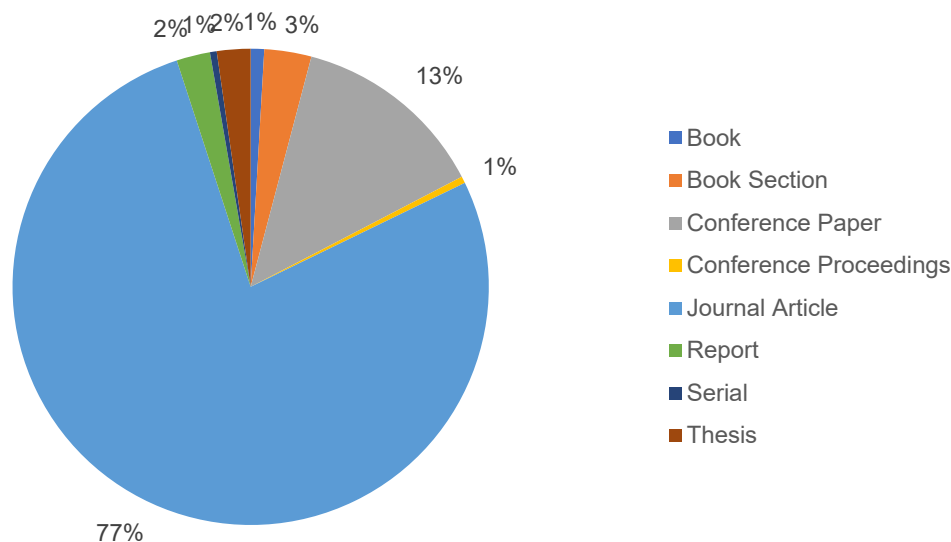
### 4.3. Tipo de publicação

As publicações que constituem a biblioteca em análise foram distribuídas segundo o seu tipo. Para tal, verificou-se o campo '*Type of reference*' existente no *software* de gestão de bibliotecas, corrigindo-o ou completando-o, quando necessário, de acordo com a publicação em causa, permitindo aferir e documentar o tipo de cada uma das referências.

As 219 referências existentes na biblioteca foram distribuídas por 8 tipos de publicações:

1. "*Book*": Identifica livros que sejam parte integrante da biblioteca em análise;
2. "*Book Section*": Fazem parte deste tipo de artigo todas as secções de livros identificadas na biblioteca;
3. "*Conference paper*": Artigos elaborados com o intuito de serem aceites e apresentados em conferências, que podem ou não vir a ser parte integrante do tipo de referência identificada no número anterior;
4. "*Conference proceedings*": Este tipo de referência diz respeito a uma coleção de artigos académicos apresentados em contexto de conferência;
5. "*Journal Article*": Habitualmente, o artigo de revista científica contém a informação mais recente sobre um dado campo científico. Este tipo de publicação passa por um processo de revisão de pares, além de empregar um processo metuculoso de citações, tornando-o no tipo de artigo com a informação mais fiável [251];
6. "*Report*": Este tipo de artigo representa os relatórios, normalmente anuais, que fazem parte das 219 referências que constituem a compilação de publicações aqui apresentada;
7. "*Serial*": Representa um tipo de referência que é publicado numa sucessão de partes discretas, por vezes numerada ou datada [252].
8. "*Thesis*": Refere-se a documentos apresentados para a obtenção de grau académico, apresentados por mestrados ou doutorandos;

Os resultados desta análise são apresentados na Figura 9:



**Figura 9. Tipo de artigo**

De acordo com a Figura 9, facilmente se depreende que, na sua maioria (169 referências, 77%), as publicações presentes nesta análise são artigos de revista científica.

Os artigos apresentados em conferências representam a segunda porção de maior relevância existente na biblioteca. Com 29 publicações, representa, aproximadamente, 13% dos artigos catalogados.

Os restantes tipos de artigo representam uma pequena parte da biblioteca (10%), com destaque para as teses e para os relatórios, com 5 publicações cada. Fazem ainda parte da lista de publicações realizada, 7 documentos representativos de secções de livros, 2 livros, 1 publicação em série e 1 coletânea de artigos de conferência que, neste caso específico, e cumprindo os critérios de pesquisa já descritos anteriormente, representa artigos relevantes para os temas em estudo nesta dissertação.

O facto da biblioteca ser, na sua maioria, representada por artigos publicados em revistas de carácter científico, poderá significar que esta tem uma grande porção de informação fiável, contribuindo para a qualidade da mesma. Adicionalmente pode-se concluir que o conhecimento e desenvolvimento científico nas áreas de BIM e eficiência energética encontra-se num nível já avançado, com resultados consolidados.

#### **4.4. Fonte de publicação**

Entende-se por fonte de publicação de uma referência a revista ou conferência no qual o documento foi publicado e/ou apresentado. A motivação principal que suporta esta análise passa

por tentar identificar as revistas e conferências que mais publicaram artigos relacionados com os temas principais desta dissertação.

Considerou-se apenas os artigos publicados em revistas e em conferências, por serem aqueles que têm, efetivamente, uma plataforma de publicação identificável e que poderá resultar no reconhecimento de um possível padrão de publicação.

Esta análise foi efetuada com recurso à extração de informação constante dos campos denominados por “*Journal Name*” ou “*Conference Name*”, presentes no *software* de gestão de bibliotecas e conforme aplicável, a cada uma das referências.

A Figura 10 representa os resultados desta análise:

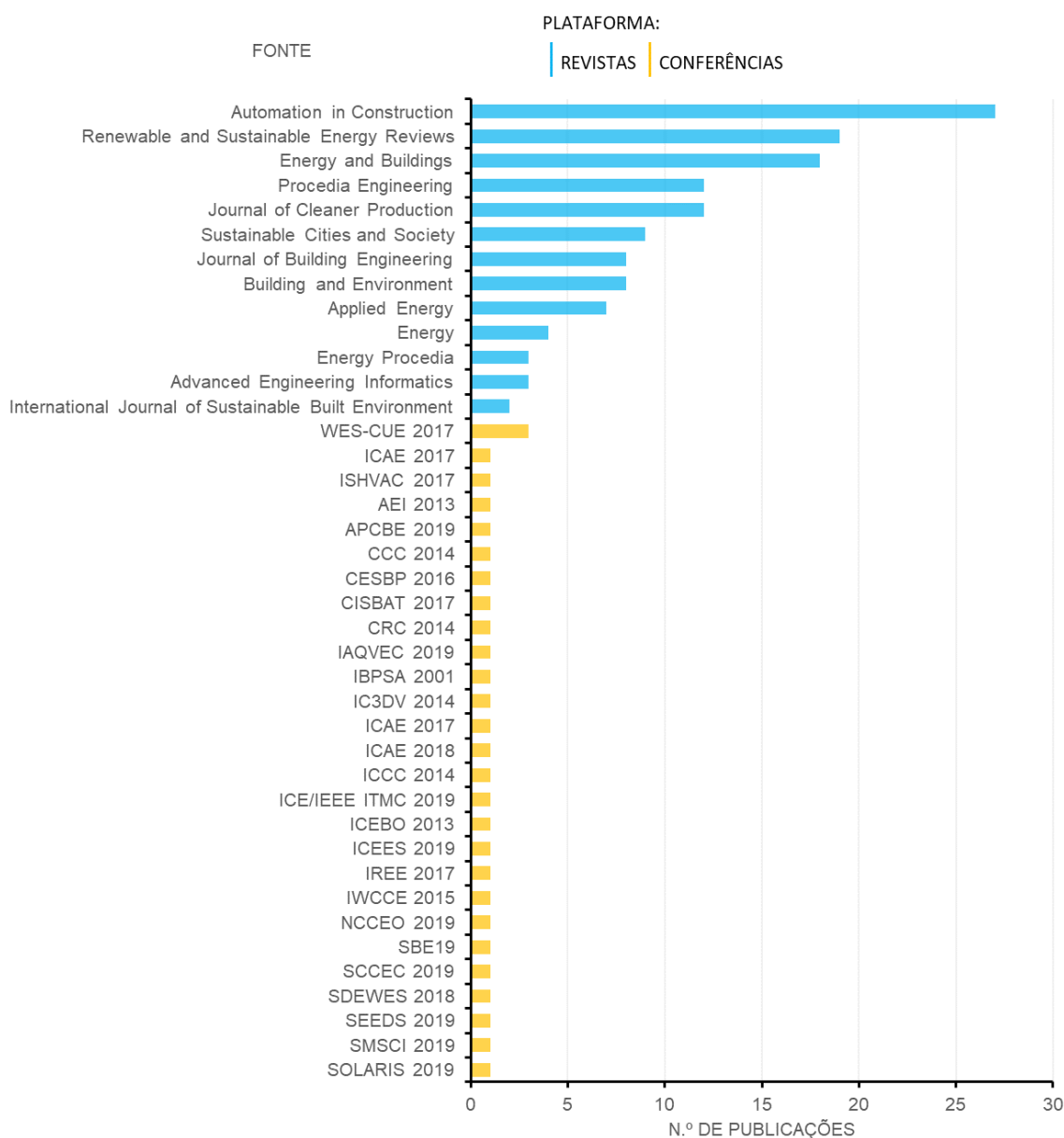


Figura 10. Fonte de publicação

Foram identificadas 50 revistas científicas com publicações, e 27 conferências. Na Figura 10, encontram-se representadas todas as revistas científicas que apresentam mais do que uma publicação na biblioteca em análise, representadas a azul, e todas as conferências identificadas, a amarelo.

No caso das revistas científicas com publicações na biblioteca em análise, convém salientar que 37 delas (74%) apresentam apenas uma publicação associada, podendo isto significar que não serão plataformas de referência nos campos científicos em estudo nesta dissertação.

Como exposto na Figura 9, um total de 169 artigos foram publicados nestas 50 revistas de carácter científico.

A revista que mais publicações representa nesta biblioteca denomina-se por “*Automation in Construction*”, com 27 artigos publicados. A “*Automation in Construction*” é uma revista científica, editada pela *Elsevier*, que se descreve como uma revista internacional para publicação de artigos de pesquisa original [253]. Os principais tópicos de publicação centram-se à volta dos processos de automatização no contexto do mundo da construção, como CAD, simulação, robótica, sistemas de controlo inteligentes, entre outros.

Com 19 artigos na biblioteca, surge a revista “*Renewable and Sustainable Energy Reviews*”, também editada pela *Elsevier*. Esta tem como missão partilhar o pensamento crítico mais interessante e relevante no contexto da energia renovável e sustentável. Com isto, pretende partilhar problemas, soluções, novas ideias e tecnologias de maneira a respeitar as metas de emissão global de carbono [254].

A terceira revista mais publicada é a “*Energy and Buildings*”, com 18 artigos publicados. É descrita como uma revista internacional com ligações ao uso energético em edificações. Tem como objetivo apresentar pesquisas com provas práticas de redução de uso energético, de maneira a promover um aumento da qualidade do ambiente interior [255].

As revistas “*Journal of Cleaner Production*” e “*Procedia Engineering*” aparecem a fechar as 5 principais revistas, com 12 artigos publicadas, respetivamente.

Conclui-se então que as revistas “*Automation in Construction*”, “*Renewable and Sustainable Energy Reviews*” e “*Energy and Buildings*” englobam o maior conhecimento científico nos campos da eficiência energética e BIM, podendo ser consideradas referências no avanço científico nestes âmbitos de pesquisa.

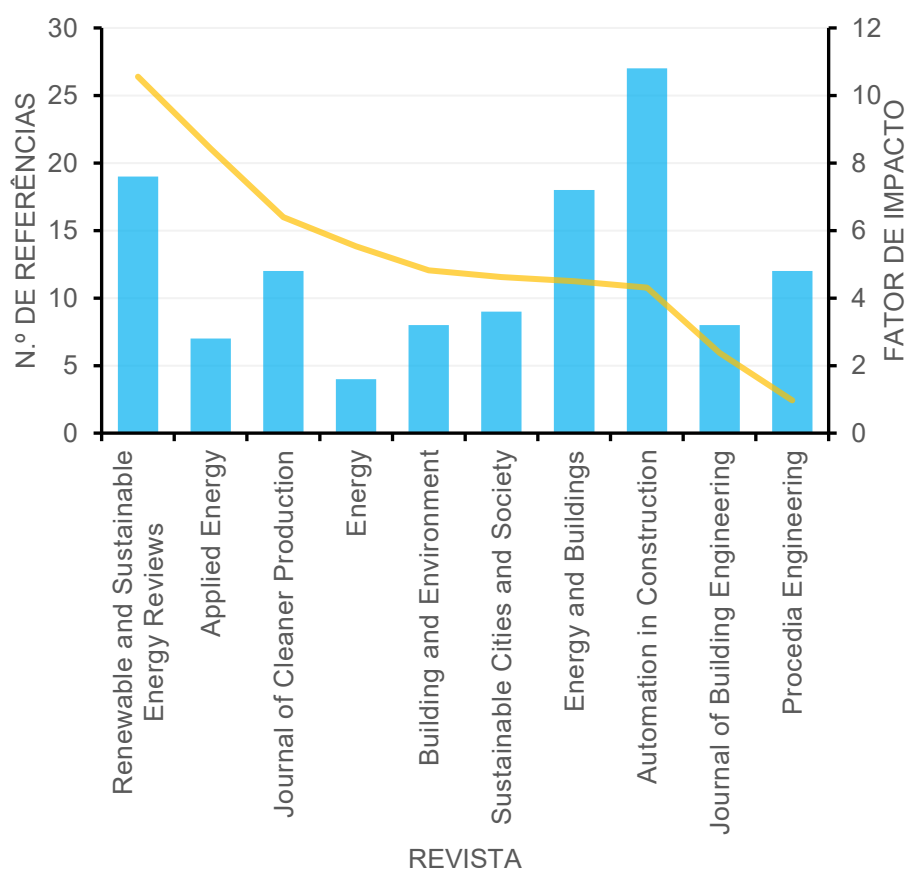
No que toca às 27 conferências identificadas, 26 delas apresentam apenas uma publicação a elas afeta, respetivamente. Como destaque, com 3 publicações, encontra-se a “*World Engineers Summit 2017: Low Carbon Cities & Urban Energy*”.

Um total de 29 artigos da biblioteca em análise foram apresentados em conferências, conforme o disposto na Figura 9.

Nota-se ainda que, nesta biblioteca, as conferências identificadas com artigos nelas apresentados são, na sua maioria, muito recentes, com as suas edições a serem organizadas entre 2017 e 2019.

Analisou-se ainda o fator de impacto das 10 revistas científicas com mais publicações e identificadas na Figura 10. O fator de impacto avalia a importância de revistas científicas no âmbito da sua área de investigação. Este fator foi criado por Eugene Garfield, fundador do *Institute for Scientific Information*, e é dado como sendo o número médio de citações dos artigos publicados em determinada revista durante os dois anos anteriores ao atual. É calculado através do quociente entre o número de citações e o número de documentos citáveis publicados nesse período [256], habitualmente 2 anos.

Para as revistas para as quais se analisou, este fator foi obtido nos sítios do editor *Elsevier*, e referem-se ao ano de 2018. Comparando o número de publicações com o fator de impacto das 10 principais revistas, obtém-se a Figura 11:



**Figura 11. Fator de impacto**

Observa-se então na Figura 11, representado no eixo vertical primário, o número de publicações de cada revista científica e num eixo vertical secundário, o valor do Fator de Impacto de cada uma delas. Embora não se consiga relacionar diretamente o número de publicações com o valor

do fator de impacto, nota-se que 9 das 10 revistas apresentadas apresentam valores de FI superiores a 2. Isto indica que estas revistas são amplamente utilizadas como fontes de informação em investigações de carácter científico. Tem-se então neste fator um bom indicador da qualidade da informação recolhida através dos critérios de pesquisa utilizados.

## 4.5. Palavras-chave

As palavras-chave representam, no âmbito da pesquisa académica e científica, descrições do conteúdo geral dos artigos a que se associam. São então um elemento essencial na fase de pesquisa de trabalhos científicos sobre campos específicos. Como já referido anteriormente, a angariação de documentos para a biblioteca em análise foi efetuada a partir de pesquisas por estes termos-chave.

Tendo em conta o número de documentos analisados, houve a necessidade de compatibilizar vários termos homónimos em outro termo mais convencional, tendo em conta as diferentes grafias ou abreviações adotadas pelos respetivos autores para o mesmo termo. Optou-se por adotar as seguintes compatibilizações:

1. BIM (*Building information modelling*) → BIM;
2. *Building information model* → BIM;
3. *Building information modeling* → BIM;
4. *Building information modelling* → BIM;
5. *Buildings* → *Building*;
6. *Early design stages* → *Early design stage*;
7. *Green buildings* → *Green building*;
8. *Industry foundation class* → IFC;
9. *Industry foundation classes* → IFC;
10. *Laser scanner* → *Laser scanning*;
11. *Life cycle* → LCA;
12. *Life cycle assessment (LCA)* → LCA;
13. *Life cycle assessment* → LCA;
14. *Life cycle cost* → LCC;
15. *Life cycle costing* → LCC;
16. *Life cycle costing assessment* → LCC;
17. *Nearly zero energy building* → NZEB;
18. *Net-zero-energy* → NZEB;
19. *Residential buildings* → *Residential buildings*;
20. *Retrofitting* → *Retrofit*;
21. *Scientometric analysis* → *Scientometric*;
22. *Scientometrics* → *Scientometric*;

23. *Sustainability practices* → *Sustainability*;
24. *Sustainability ranking* → *Sustainability*;
25. *Sustainable building* → *Sustainability*;
26. *Sustainable design* → *Sustainability*;
27. *Zero energy buildings* → NZEB;
28. *Zero-energy buildings* → NZEB.

Esta compatibilização permite ainda aumentar a consistência das palavras-chave encontradas na biblioteca, evitando ambiguidades que poderiam distorcer a análise. Ressalve-se que as substituições foram estudadas criteriosamente e apenas efetuadas quando garantida a manutenção do significado dos termos originais.

Efetuada todas as substituições aplicáveis, obteve-se um conjunto de 565 palavras-chave diferentes, com destaque para as 10 principais, representadas na Figura 12:

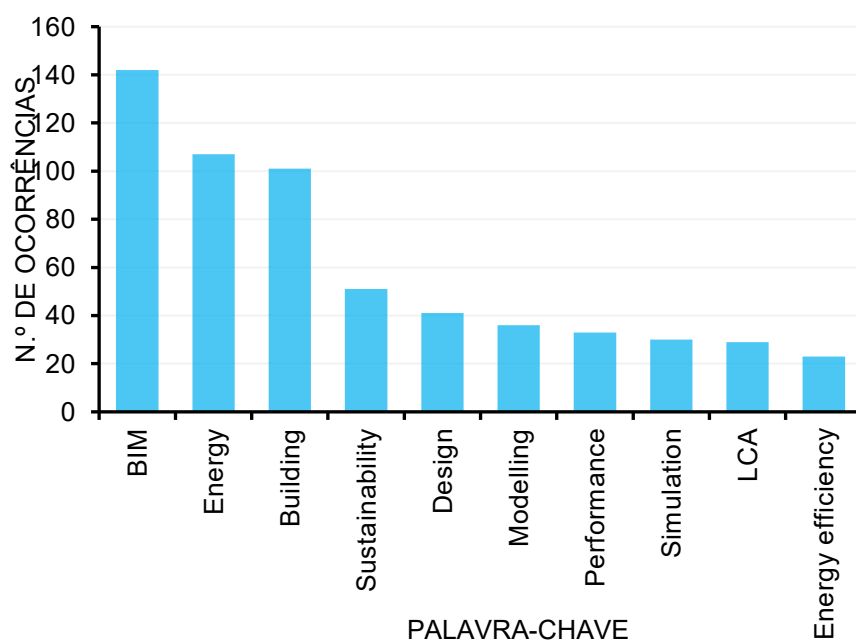


Figura 12. Palavras-chave principais

Estes termos-chave principais revelam o conteúdo geral da biblioteca em análise em forma de resumo. A partir deles, é possível depreender que esta conterá muita informação sobre o tema BIM, tendo em conta a presença das palavras-chave “BIM”, “Building”, “Modelling”, “Design”, pois todas estas estão relacionadas com as tecnologias BIM. Nota-se também a existência de muito conteúdo relacionado com os temas da energia e da eficiência energética, pelas várias ocorrências das palavras-chave “Energy”, “Sustainability”, “Performance”, “Simulation”, “LCA” e “Energy efficiency”.

Pode-se concluir então que o conteúdo da biblioteca vai ao encontro dos temas em análise ao longo desta dissertação e que os critérios de seleção adotados estão corretos.

### 4.5.1. Cooocorrência de palavras-chave

Através das funções de análise de texto existentes no *software* VOSViewer, extraiu-se da biblioteca todas as palavras-chave identificadas. Aqui, com recurso às funções de análise presentes no *software*, criou-se uma rede de coocorrência de palavras-chave, que a representa num mapa a duas dimensões em forma de nós e ligações entre nós. Diz-se que dois termos-chave apresentam coocorrência quando ambos aparecem juntos no mesmo documento. No mapa exposto na Figura 13 e através dos métodos utilizados pelo *software* responsável pela sua criação, as palavras-chave com maior coocorrência tendem a estar numa posição mais aproximada [257]:

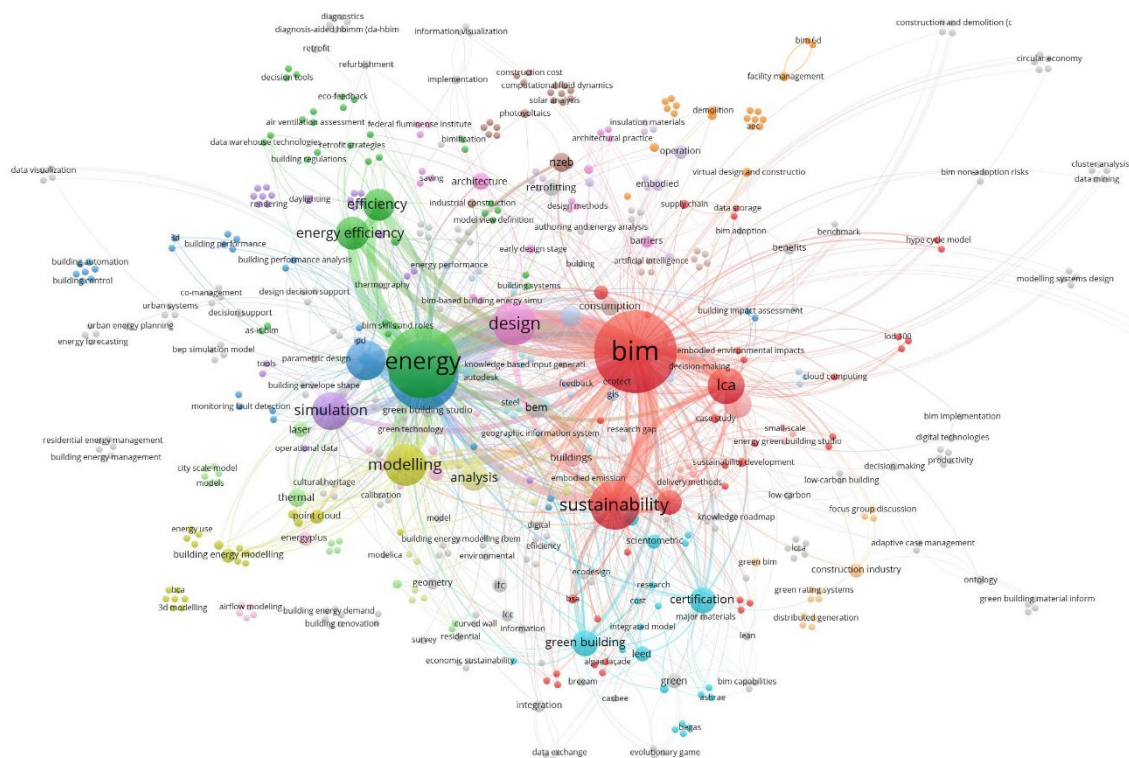


Figura 13. Rede de coocorrência de palavras-chave

A Figura 13 representa a nuvem de palavras-chave criada, através de um processo de *clustering* ou aglomeração. Foram identificados 60 *clusters*, compostos por quantidades a variar entre os 26 itens e *clusters* individuais. Estas aglomerações são criadas automaticamente de acordo com o grau de coocorrência dos termos identificados [257].

Na nuvem de palavras-chave anterior representam-se visualmente dois aspetos: o número de ocorrências de cada um dos termos e a ligação entre eles, o que permite aferir a relação entre todas as diferentes palavras-chave identificadas.

O número de ocorrências é representado visualmente através do tamanho dos nós atribuídos a cada palavra-chave. Quantas mais ocorrências de determinado termo, maior o tamanho do nó a

ele associado. Já no que toca às ligações, a espessura das linhas que as representam, indicam o grau de relação entre diferentes palavras-chave.

Tendo em conta o exposto na Secção 4.5, era expectável uma clara identificação dos termos-chave principais no mapa, o que efetivamente se revela, tendo em conta o tamanho dos nós atribuído aos mesmos. Tem-se então com os nós de maior dimensão os termos “BIM” e “Energy”. Considerando a proximidade entre os nós dos termos-chave principais e a espessura da ligação, pode-se concluir que existe um elevado grau de coocorrência entre todos eles, o que poderá significar que estes coocorrem em grande número das referências da biblioteca em análise.

#### 4.5.2. Tendência de ocorrência

A análise que incide sobre a tendência de ocorrência de palavras-chave tenta identificar a existência de algum pico associado ao sentido de pesquisa da comunidade científica que, neste caso, organizou-se por ano, entre os anos 2009 e 2019. Escolheu-se um período de 10 anos, de maneira a tentar identificar uma possível tendência clara do sentido de pesquisa mais recente.

Esta análise foi efetuada associando os termos-chave de cada referência ao seu ano de publicação, recorrendo a funções de contagem do *software Excel* para um correto levantamento do número de ocorrência de cada termo.

A figura seguinte representa visualmente as tendências de ocorrências das 20 principais palavras-chave identificadas nas referências analisadas:



Figura 14. Tendência de ocorrência de palavras-chave, por ano

A escala de cores apresentada na figura anterior representa o grau de ocorrência de cada uma das palavras, por ano, relativamente ao ano em que ocorre o pico de ocorrências para cada uma das palavra-chave, em percentagem. Quanto mais escura a cor, maior a ocorrência de determinado termo num ano específico. Por outro lado, a cor cinza representa uma baixa ocorrência desses termos.

A grande maioria dos picos de ocorrência destes termos principais surgem entre os anos 2017 e 2019, com um aumento elevado de ocorrências a partir do ano 2015 para a maioria das palavras-chave. Alguns termos apresentam um aumento de ocorrência a partir de 2011, ainda que não se identifique nenhum pico antes do ano 2014, em que o termo “*Thermal*” tem o seu máximo de ocorrência. Conclui-se então que o interesse nos campos científicos em análise no presente documento está em voga e ainda não se pode identificar um pico geral, podendo este encontrar-se num futuro próximo.

Nos anos de 2009 e 2010, não se identifica a ocorrência de nenhuma palavra-chave, pelo que se pode concluir que estes anos representam um período em que a pesquisa nestes campos científicos foi escassa, de baixo interesse para a comunidade científica.

## 4.6. Países

O fenómeno da globalização e o avanço tecnológico mudaram a forma como as pessoas, governos e negócios interagem entre si [258]. Isto poderá indicar que, possivelmente, este fenómeno terá tido influência na distribuição do avanço e conhecimento científico.

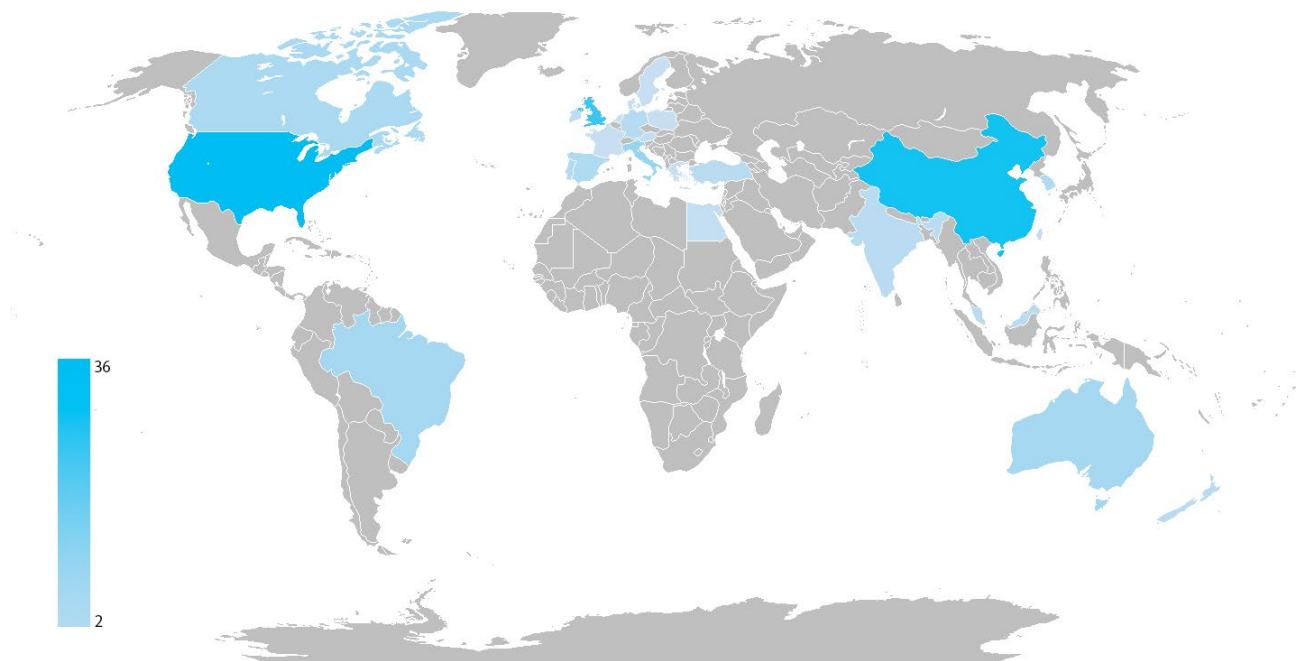
Torna-se então pertinente proceder a uma análise em relação aos países representados por publicações na biblioteca em análise nesta dissertação, para que se possa concluir se a globalização também se pode fazer sentir nos temas aqui abordados.

Proceder-se-á, em primeira instância, a uma análise que incide diretamente na distribuição das publicações por país de origem. Numa segunda fase, analisar-se-á a colaboração entre todos esses países.

### 4.6.1. Distribuição de publicações por país

Para esta análise, considerou-se como país de origem a nação onde se encontra a instituição representada pelo autor principal de cada referência presente na biblioteca. Associou-se esse país a cada uma das publicações e procedeu-se a uma contagem, para que se obtivesse o número total de publicações por cada nação representada.

A presente análise originou a Figura 15:



**Figura 15. Distribuição de publicações por país**

Apesar de terem sido identificados 37 países diferentes, escolheu-se representar na Figura 15 apenas os países com 2 ou mais publicações, para melhor interpretação dos dados levantados. Eliminando os países com 1 publicação, encontram-se representados os restantes 26.

Pode-se então observar que existe efetivamente uma distribuição de publicações pelo mundo, o que poderá ser um indicador do efeito da globalização, aliado ao avanço tecnológico.

A escala de cores apresentada à esquerda da imagem facilita a interpretação do mapa apresentado. O número de publicações varia entre 2 e 36, com uma média de 7,7 documentos publicados por nação identificada.

Nota-se desde logo um destaque de 3 países, com os Estados Unidos da América (36 publicações) a emergir como o líder nos campos científicos aqui em análise. Com 31 publicações, surge a China, seguida pelo Reino Unido, com 27 publicações, todos estes muito acima da média apresentada anteriormente.

De seguida encontra-se a Itália, com 12 publicações, e a Austrália, com 9. As restantes nações apresentam entre 8 e 2 publicações. Portugal conta com um total de 6 publicações, apresentando-se um pouco abaixo da média de referências publicadas mundialmente.

Identificam-se então as duas grandes potências económicas mundiais como líderes nestes campos científicos, o que poderá indicar que o avanço tecnológico de cada país permite uma maior e melhor investigação nestas áreas, facto corroborado pela falta de publicações dos países com menos desenvolvimento tecnológico, como são os casos das nações africanas, aqui apenas

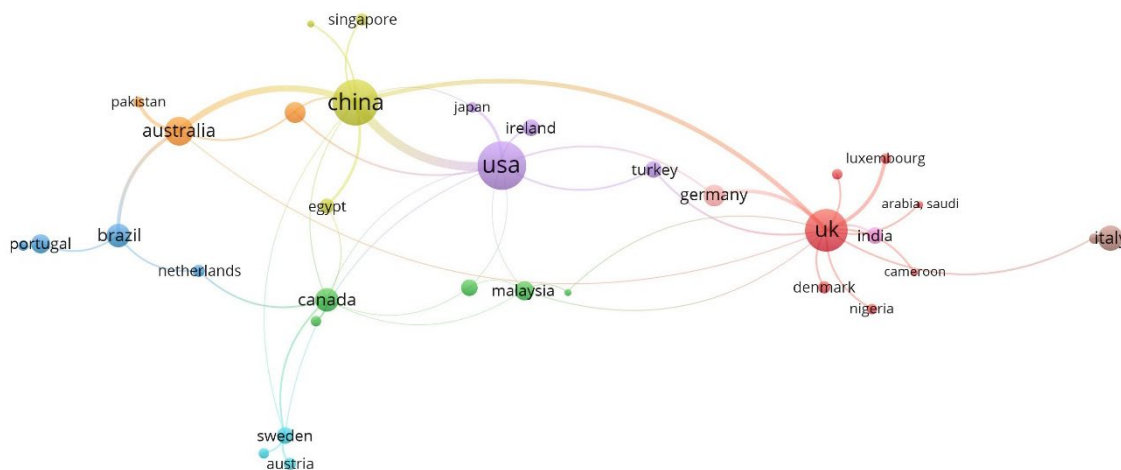
representadas pelo Egípto (3 publicações). Por outro lado, vemos vários países europeus comprometidos com o desenvolvimento do conhecimento nestas áreas científicas.

#### 4.6.2. Colaboração internacional

Embora a análise anterior forneça um indicador sobre o conhecimento e avanço científico de cada país nas áreas aqui em análise, pouco diz sobre a colaboração entre eles, tendo em conta que se considerou apenas a nação da instituição representada pelo autor principal de cada referência.

Para corretamente se aferir a existência de colaboração entre nações na investigação, considerou-se o país das instituições de todos os autores de cada referência, com o objetivo de identificar padrões ou particularidades nas relações entre países representados na biblioteca em análise.

Criou-se então, nos mesmos moldes apresentados em 4.5.1, uma rede de colaboração internacional, representada na Figura 16:



**Figura 16. Rede de colaboração internacional**

Como seria expectável, os nós de maior dimensão representam os países que mais referências publicaram, corroborando a análise anterior. A China apresenta-se como a nação com mais colaborações internacionais, destacando-se a ligação com os Estados Unidos da América, Austrália e Reino Unido, tendo em conta a espessura das linhas representativas dessas colaborações.

Os Estados Unidos da América, além da ligação com a China, apresentam várias colaborações, incluindo com o vizinho Canadá, com a Irlanda, com o Japão e Malásia.

O Reino Unido apresenta várias ligações internacionais, embora com menos expressão no volume de referências publicadas. Destacam-se as ligações com a Alemanha, Luxemburgo, Dinamarca e Índia.

Destaca-se ainda a falta de colaboração internacional que a Itália apresenta. Apesar de contar com 12 referências publicadas na biblioteca em análise, apenas uma delas contou com colaboração investigadores de outra nacionalidade, nomeadamente, Britânicos.

Portugal apresenta apenas colaboração internacional com outro país, o Brasil.

Pode-se então identificar dois fatores que parecem ser impulsionadores de colaboração internacional entre países.

Em primeira instância, o fator geográfico, tendo em conta a proximidade entre países que colaboraram entre si, como são os casos dos Estados Unidos da América e o Canadá, a China e Singapura, o Reino Unido e a Alemanha.

Outro fator que parece ser evidente como impulsionador de colaboração internacional é o idioma oficial dos países. Os Estados Unidos da América partilham o seu idioma com o Canadá e República da Irlanda, embora não seja a única língua oficial no Canadá. O Reino Unido também apresenta este fator na sua relação com a Índia que, embora não exclusivamente, apresenta a língua inglesa como oficial. Este fator é ainda evidente na colaboração entre Portugal e Brasil, países com língua materna oficial portuguesa.

## 4.7. Citações

Um dos objetivos principais dos investigadores de qualquer campo científico passa pela publicação dos seus trabalhos [259]. A quantidade de citações é frequentemente utilizada como um indicador da importância e influência de artigos, autores, revistas científicas ou até campo científico. Um grande número de citações sugere que um artigo possa ter alguma influência no campo científico a que se refere, embora seja reconhecido que o número de citações não tem uma relação direta com a qualidade de um artigo [260].

Posto isto, se um artigo não for citado por pares do seu autor, a sua importância, originalidade e consequente contribuição para o avanço científico no seu campo de investigação poderão ser postas em causa [259].

Torna-se então relevante recorrer ao levantamento do número de vezes que foram citados os artigos que fazem parte da biblioteca de referências. Procedeu-se a diversas análises relacionadas com este tema, mas todas elas têm como base comum o número absoluto de citações que cada artigo apresenta.

### 4.7.1. Artigos mais citados

A análise mais básica a que se pode recorrer no tema das citações passa pelo apuramento dos artigos da biblioteca mais vezes citados. O levantamento do número de citações foi efetuado a partir da base de dados *Google Scholar* para todos os 219 artigos presentes na biblioteca. Estes números foram obtidos em abril de 2020 e associados a cada um dos artigos através de uma tabela criada em folha de cálculo. A comparação direta entre todos os artigos torna-se possível por se ter recorrido à mesma base de dados para todos os documentos, no período compreendido entre 2009 e 2019.

Gerou-se então a Figura 17 para esta análise:

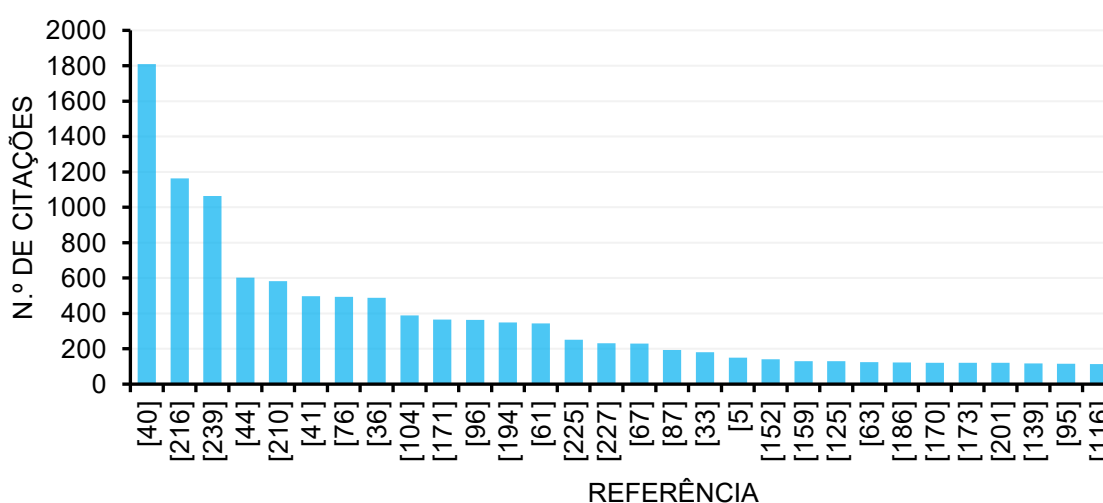


Figura 17. Artigos mais citados

A Figura 17 apresenta os resultados desta análise para os 30 artigos mais citados. A biblioteca apresenta 39 artigos sem citações. Dos restantes 180 documentos, 122 apresentam menos de 50 citações, 26 apresentam entre 51 e 100 citações, 16 apresentam entre 101 e 200 citações, 13 apresentam entre 201 e 1000 citações e 3 apresentam mais de 1000 citações.

O artigo mais citado intitula-se “*Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry.*”, publicado em 2011 por Salman Azhar [49]. Este apresenta um total de 1809 citações.

Em segundo lugar, encontra-se o artigo “*Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs.*”, da autoria de Rebekka Volk, Julian Stengel e Frank Schultmann [216], publicado em 2014, com um total de 1163 citações.

Em terceiro lugar, com 1064 citações, aparece o artigo intitulado por “*A review on the prediction of building energy consumption*”, publicado em 2012 por Hai-xiang Zhao e Frédéric Magoulès [239].

Os restantes artigos representados na figura anterior apresentam um número de citações entre 602 e 113.

A biblioteca apresenta um número total de 15169 citações, o que representa uma média aproximada de 69 citações por cada referência em análise. O número total de citações poderá indicar então que grande parte das referências analisadas suscitaram interesse no meio científico, contribuindo para avanço do conhecimento nos campos científicos por elas investigadas.

#### 4.7.2. Rácio de citações

Um dos fatores que afeta diretamente o número de citações é a idade da referência [261]. Um artigo lançado em 2009 apresenta melhores condições para obter um número elevado de citações quando comparado com outro lançado 10 anos mais tarde, tendo em conta o tempo decorrido desde a publicação de cada um desses artigos. Uma segunda análise a este tema tornou-se então necessária, com o objetivo de tentar neutralizar este fator.

Para tal, criou-se um rácio de citações, em que se dividiu o número de citações pelo número de anos desde que o artigo foi publicado. Optou-se por considerar o ano de publicação como um ano inteiro, ignorando o mês de publicação. O efeito prático deste rácio pode ser interpretado como o número de publicações por ano de existência de cada artigo.

A Figura 18 apresenta os resultados obtidos nesta análise:

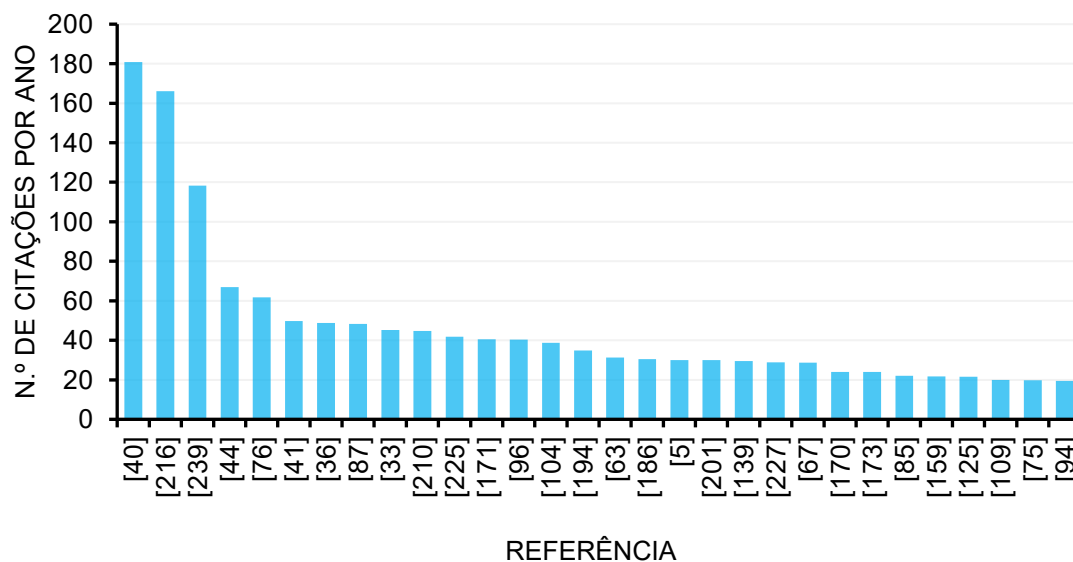


Figura 18. Rácio de citações por artigo

Curiosamente, os quatro artigos mais citados, identificados na Subsecção 4.7.1, mantêm as suas posições inalteradas. Nos mesmos moldes que nessa subsecção apresentam-se apenas os 30 artigos com o maior rácio de citação.

Na análise efetuada na Subsecção 4.7.1, o ano médio de publicação, quando arredondado à unidade, foi 2013. Tendo em conta que na presente análise este valor aumentou para 2014, pode-se concluir que existem artigos recentes com potencial para obter um maior número absoluto de citações que outros mais antigos e atualmente mais citados.

### 4.7.3. Número de citações por ano

Uma terceira análise no campo das citações foi efetuada. Esta incide no número de publicações absoluto de toda a biblioteca distribuído na década entre 2009 e 2019. Uma vez que o número de citações pode ser relacionado com o interesse e influência que os artigos suscitam no mundo da investigação [260], torna-se pertinente tentar retirar conclusões associadas à evolução do número de citações da biblioteca em análise, num panorama geral.

Recorreu-se novamente à base de dados académicos *Google Scholar* para levantamento dos dados associados às citações anuais de cada artigo. Esta aquisição de dados foi efetuada durante o mês de maio de 2020. Para cada artigo da biblioteca, registou-se o número de citações por ano, utilizando a opção de filtragem por ano disponibilizado pela base de dados utilizada.

A evolução de citações de toda a biblioteca entre 2009 e 2019 é representada pela Figura 19:

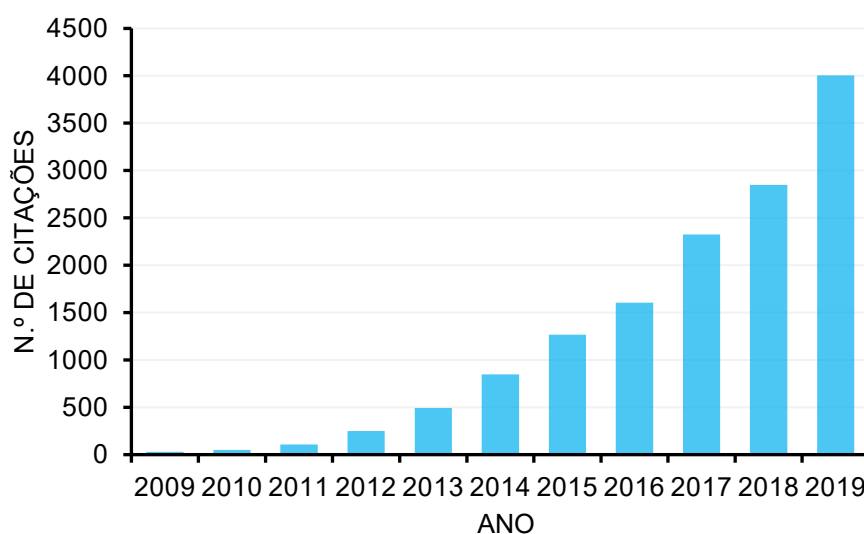


Figura 19. Número de citações por ano

Um total de 13826 citações foram identificadas neste período. Este número difere do número total de citações apresentado na Subsecção 4.7.1 por se ter ignorado os documentos anteriores a 2009 e também pelo período de aquisição de dados diferir do utilizado nessa subsecção (abril de 2020 vs. maio de 2020).

Na Figura 19 verifica-se um crescimento claro do número de citações de 2009 e 2019. Este facto pode ser um bom indicador do interesse em torno dos campos científicos dos artigos pertencentes à biblioteca em análise.

Nada se pode concluir sobre um possível pico de citações, tendo em conta que o crescimento não abrandou em nenhum ano analisado. Isto poderá significar que o interesse de investigação nos campos científicos relacionados com BIM e eficiência energética está a aumentar, o que vai ao encontro da hipotética conclusão assinalada na Secção 4.2.

## **4.8. Autores**

Um autor pode ser definido como aquele que cria ou produz algo, como a pessoa que escreve uma obra ou mesmo aquele que inventa [262]. A importância do papel do autor para o avanço do conhecimento científico é inegável, tendo em conta que todos os autores constituem a comunidade científica responsável pelo desenvolvimento da ciência.

Todas as referências pertencentes à biblioteca aqui em análise constituem trabalhos originais de autoria de um ou mais sujeitos. Como tal, torna-se pertinente proceder a uma análise que incida diretamente sobre estes.

Tentar-se-á, através de diversas análises, encontrar um padrão que possa ser associado diretamente aos autores de todas as referências da biblioteca. Adicionalmente, investigar-se-á a hipótese de existir uma elevada colaboração entre todos eles. Recorrer-se-á ainda a um levantamento do número de citações associado a cada autor que, como já referido anteriormente, tem peso na importância e relevância da investigação científica.

### **4.8.1. Autores mais publicados**

O número de publicações associadas a um determinado autor, sobre algum tema específico pode revelar o interesse e o nível de conhecimento do mesmo associado a essa área de investigação. Como tal, procedeu-se a uma contagem de documentos existentes na biblioteca que cada autor publicou.

A Tabela 1 expõe todos os autores com 3 ou mais documentos que integram a biblioteca criada para esta análise cienciométrica, além de representar o número de referências e identificá-las:

Tabela 1. Autores com mais publicações

Autor	N.º de documentos	Referências
Cho, Y.	4	[70]; [217]; [218]; [219]
Wang, C.	4	[70]; [217]; [218]; [219]
Azhar, S.	3	[49]; [50]; [96]
Chen, Y.	3	[117]; [118]; [222]
Figueiredo, K.	3	[160]; [161]; [162]
Garwood, T.	3	[91]; [92]; [93]
Haddad, A.	3	[160]; [161]; [162]
Ham, Y.	3	[108]; [109]; [139]
Hughes, B.	3	[91]; [92]; [93]
Lee, S.	3	[116]; [117]; [234]
Najjar, M.	3	[160]; [161]; [162]
O'Connor, D.	3	[91]; [92]; [93]
Oates, M.	3	[91]; [92]; [93]
Rezgui, Y.	3	[115]; [7]; [182]
Tae, S.	3	[102]; [140]; [183]
Wong, J.	3	[224]; [225]; [226]
Wu, Z.	3	[141]; [144]; [208]

Os autores com mais referências são então Yong Cho e Chao Wang, pertencentes à *School of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology*, situada em Atlanta, Estados Unidos da América, com 4 publicações associadas a cada um. É aceitável concluir-se que estes autores formam uma dupla de investigação pois, além de pertencerem à mesma instituição de investigação académica e científica, as publicações que subscrevem são as mesmas.

Destacam-se outras equipas de investigação, como é o caso do grupo constituído por Mohammad Najjar, Assed Naked Haddar e Karoline Figueiredo que apresentam os mesmos 3 artigos publicados e pertencem à Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

Um outro aglomerado de autores que parece formar um grupo de investigação foi identificado e é constituído por Tom Lloyd Garwood, Dominic O'Connor, Ben Richard Hughes, membros do *Department of Mechanical Engineering, The University of Sheffield*, Reino Unido, e Michael Oates, membro do *Advanced Manufacturing Research Centre with Boeing, The University of Sheffield*. Este grupo apresenta os mesmos três documentos.

Apesar de terem sido identificados 620 diferentes autores, não foi possível identificar um autor que tenha publicado uma quantidade de documentos que o faça destacar-se dos restantes. Isto

poderá indicar que não se está na posição de identificar um autor como sendo uma referência nesta biblioteca.

#### 4.8.2. Colaboração entre autores

Uma análise que incida sobre o tema da colaboração poderá revelar o estado atual da interação mundial entre autores que publicam sobre os temas aqui explorados. Através de uma rede de coautoria, torna-se possível retirar conclusões sobre o nível de cooperação existente atualmente.

Apesar de visualmente idênticas às redes de coocorrência de palavras-chave, como a representada na Figura 13, as redes de coautoria diferem dessas no significado dos seus elementos. Nestas, os nós representam autores individuais e as ligações entre esses nós representam colaborações diretas em trabalhos de carácter científico [263].

Este tipo de rede não representa apenas a existência de sociedades académicas, mas também a estrutura do conhecimento associado aos temas explorados pelos autores [264], sendo então pertinente analisar o nível de colaboração existente entre os autores que compõem a biblioteca em análise.

A rede de coautoria criada para esta análise encontra-se representada na Figura 20:

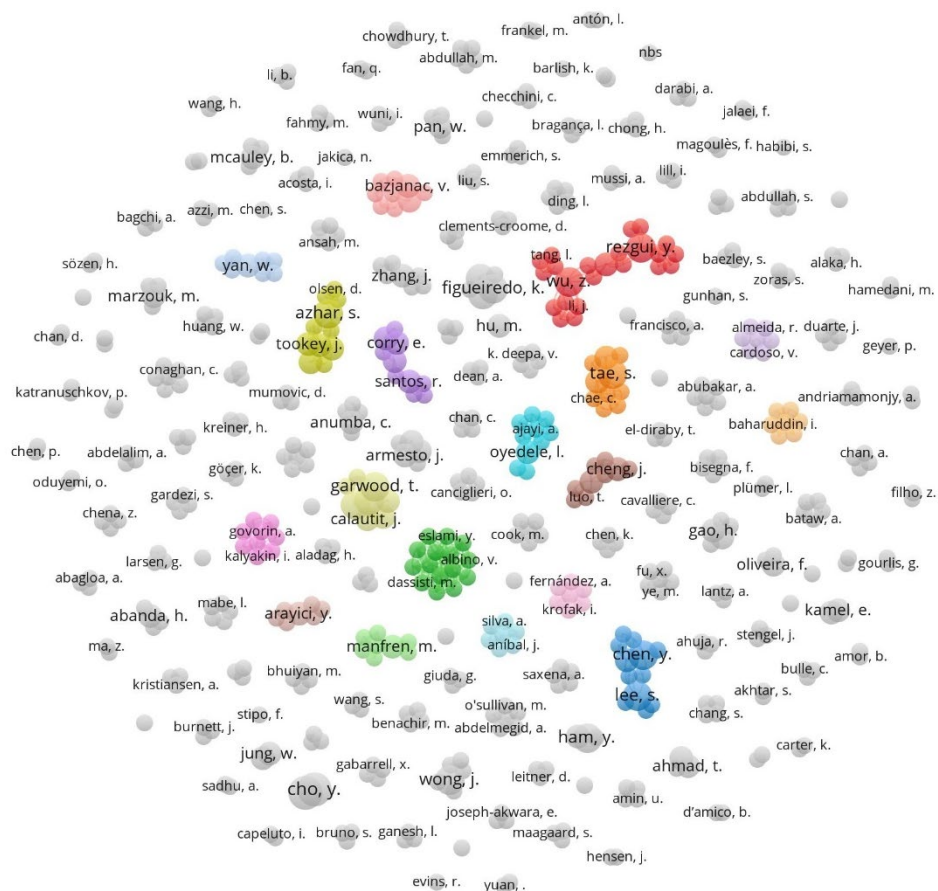
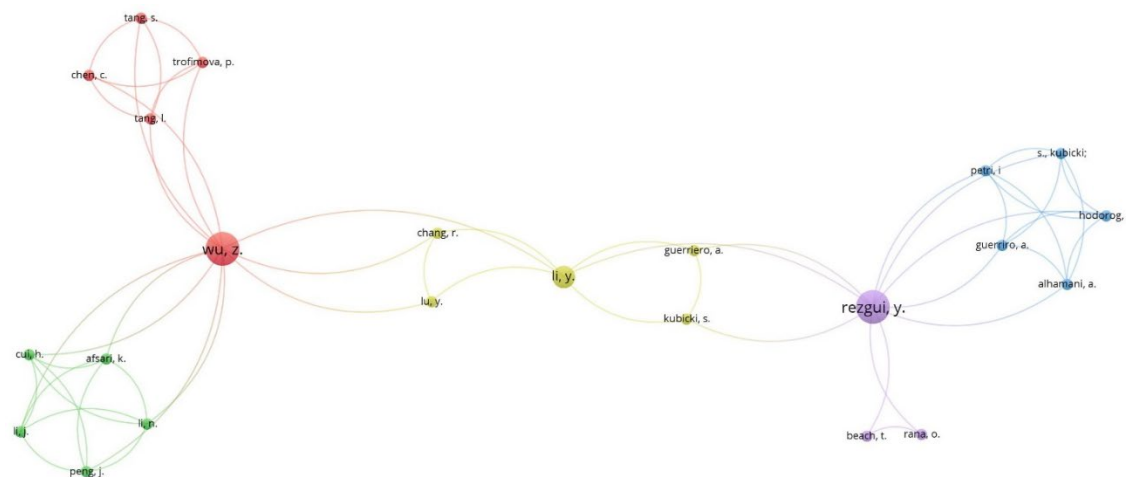


Figura 20. Rede de coautoria

Como já referido, cada nó representa um autor individual, pelo que esta rede apresenta 620 nós, sendo este o número total de autores identificados. Apesar deste número poder ser considerado elevado, a falta de representação de ligações na figura anterior revela uma baixa colaboração entre os intervenientes. Apesar de não se ter identificado uma grande rede de colaboração, o *software* utilizado para gerar esta rede identificou 18 aglomerados de colaboração, que representam grupos em que existiu efetivamente colaboração entre diversos intervenientes.

A maior rede identificada é representada na Figura 21:



**Figura 21. Maior rede de coautoria identificada**

A rede apresentada na Figura 21 é composta por 23 autores individuais e apresenta ligações entre grande parte dos intervenientes. Estas ligações representam, como já referido anteriormente, colaboração em trabalhos de carácter científico.

Neste tipo de análise, é possível identificar o autor central de uma rede de coautoria pois apresentará o maior número de ações de colaboração [265]. Nesta rede foram identificados 3 autores centrais:

1. Y. Li, membro do *Luxembourg Institute of Science and Technology*, com 6 ações de colaboração;
2. Y. Rezgui, membro da *School of Engineering, Cardiff University*, com 10 ações de colaboração;
3. Z. Wu, membro da *College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha*, com 12 ações de colaboração.

Podem ser identificadas 5 redes de menor magnitude dentro da rede representada na Figura 21, representadas a vermelho, verde, amarelo, roxo e azul.

Os 23 autores que compõem a maior rede de colaboração identificada e apresentada na figura anterior representam apenas, aproximadamente, 4% de todos os 620 autores identificados, o

que vem sustentar a ideia já apresentada que não existe uma colaboração internacional que possa ser considerada considerável.

### 4.8.3. Autores mais citados

Levantou-se o número de citações que cada autor apresenta nas referências pertencentes à biblioteca aqui analisada. Este valor representa o somatório do número de citações atribuído pela base de dados *Google Scholar* atribuída a cada artigo da autoria de determinado indivíduo, no mês de abril de 2020, resultando na Figura 22:

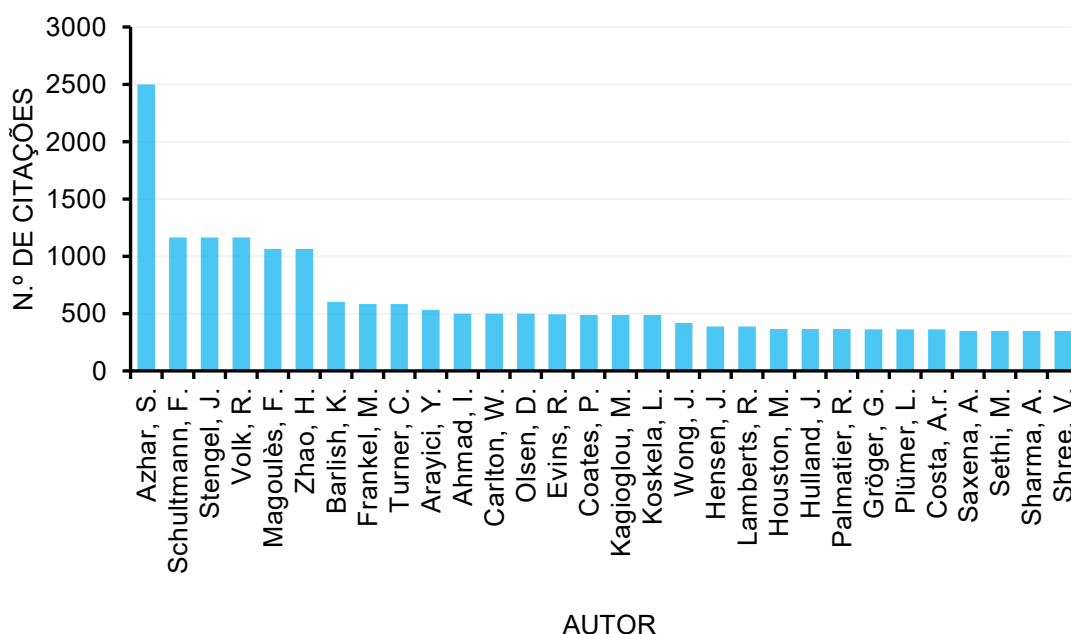


Figura 22. Número de citações por autor

Apresentam-se, na Figura 22, os 30 autores mais citados na biblioteca. Salman Azhar, membro da *McWhorter School of Building Science, Auburn University*, revela-se como o autor mais citado, com 2500 citações. Os artigos a que deu autoria incidem maioritariamente sobre o tema de BIM e pode ser considerado uma referência neste campo.

Frank Schultmann, Julian Stengel e Rebekka Volk, membros do *Institute for Industrial Production (IIP), Karlsruhe Institute of Technology (KIT)*, apresentam 1163 citações, que são atribuídas ao mesmo artigo, a que todos dão autoria e incide sobre o tema de BIM.

O número total de citações por autor nesta biblioteca é de 40398. Este número difere do total apresentado em 4.7.1 por se associar ao autor, ao invés do artigo. O facto de vários artigos com citações apresentarem vários autores amplifica este valor total de citações.

Calculou-se uma média aproximada de 65 citações por autor nesta biblioteca, embora 103 destes autores não apresentem alguma citação. Excluindo-os desta média, o número de citações por

autor aumenta para, aproximadamente, 78. Este elevado número médio de citações por autor poderá então ser um bom indicador do nível de interesse nos autores de artigos de carácter científico que incidem sobre os temas explorados na presente dissertação.

## 4.9. Software

A criação de modelos de informação com o objetivo de aumentar a eficiência energética é um processo complexo. Aliado a isto, a própria natureza do BIM exige que se recorra a *softwares* específicos, com capacidades e funções que permitam reduzir o impacto ambiental associado ao setor AECO.

Optou-se por recorrer a um levantamento de todos os *softwares* utilizados pelos autores dos artigos presentes na biblioteca em análise neste capítulo. O objetivo desta análise passa pela tentativa de identificar ferramentas de referência nos campos científicos associados ao BIM e à eficiência energética.

Efetou-se o levantamento do número de vezes que cada *software* é mencionado nas referências pertencentes à biblioteca aqui em análise, e tentou-se interpretar e retirar conclusões acerca da como estes se relacionam entre si.

### 4.9.1. Software utilizado

Para esta análise, percorreu-se toda a biblioteca e associou-se a cada referência, quando aplicável, os nomes das ferramentas digitais utilizadas para o sucesso da investigação por elas apresentadas.

O principal objetivo deste levantamento consiste na tentativa de identificar os *softwares* de referência nas áreas de investigação e atuação do BIM e eficiência energética. Como tal, procedeu-se à exposição dos programas informáticos identificados e separou-se os mesmos de acordo com os seus campos de publicação, no âmbito das referências nos quais foram utilizados, conforme a Figura 23

Identificaram-se três campos de aplicação diferentes segundo as utilizações dadas aos *softwares* utilizados nas referências analisadas, e representaram-se, na figura anterior, os 30 *softwares* mais referidos, embora se tenham identificado 93 diferentes programas informáticos presentes na biblioteca.

Os campos de aplicação identificados foram os seguintes:

1. BIM, no âmbito da modelação;
2. Energia, no âmbito da análise energética;
3. Desenvolvimento de *software*.

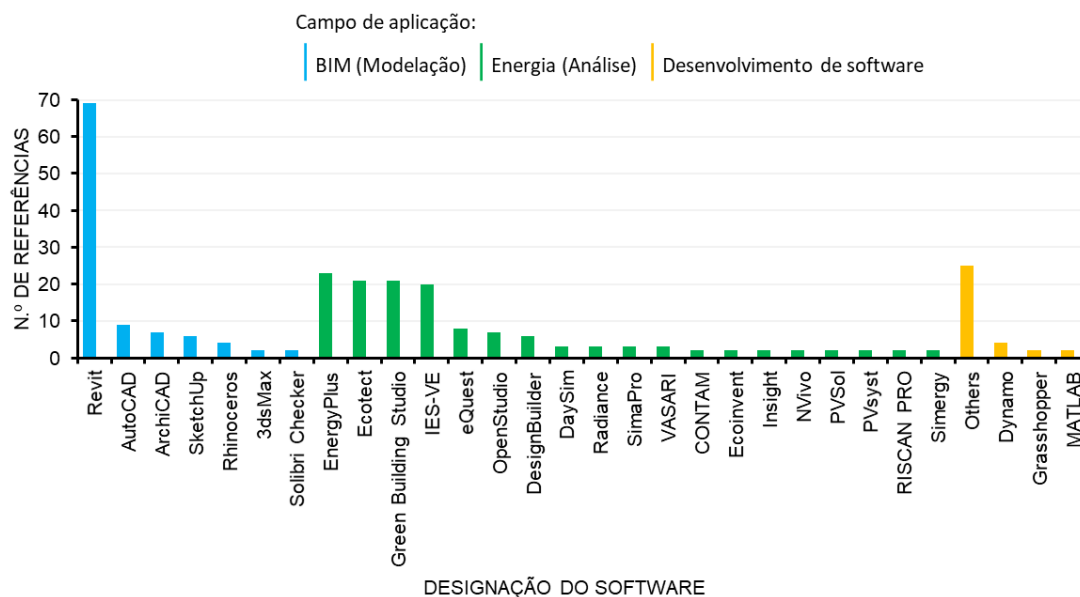


Figura 23. Software utilizado segundo os seus campos de aplicação

Estes 3 campos são identificados por cores e posição na Figura 23. Na porção esquerda do gráfico de colunas, representados a azul, situam-se os *softwares* associados à modelação em ambiente BIM, com 7 diferentes programas informáticos identificados. A zona central, representada a verde, foi reservada para os *softwares* associados à análise energética, com um número total de 19 programas informáticos levantados nesta análise. Por fim, as colunas representadas a amarelo exibem os *softwares* associados a desenvolvimento de ferramentas ou até outros novos *softwares* como parte da investigação levada a cabo por esses autores.

No grupo associado à modelação, destaca-se o *Revit*, da *Autodesk*, com 69 ocorrências. Tendo em conta que os 7 principais *softwares* associados a este campo representam 7,5% de todos os outros identificados, e dentro destes, o *Revit* representa cerca de 70% de todos os principais programas utilizados no âmbito de aplicação de modelação em BIM.

No grupo da análise energética, foram identificados 4 *softwares* com 20 ou mais utilizações nas referências analisadas, sendo estes o *EnergyPlus* (23 utilizações), o *Ecotect* e o *Green Building Studio* (21 utilizações cada) e o *IES-VE* (20 utilizações).

No grupo associado ao desenvolvimento de novo *software*, foram identificados 3 programas (*Dynamo*, *Grasshopper* e *MATLAB*), maioritariamente utilizados para desenvolvimento de linguagem informática avançada, razão pela qual foram relacionados com esta categoria.

Nesta terceira categoria foram também introduzidas todas as ferramentas desenvolvidas pelos autores, no decurso da sua investigação. Na biblioteca aqui em análise, identificaram-se 25 novas ferramentas, criadas para vários fins, mas com o objetivo comum do avanço do conhecimento nos campos científicos associados a BIM e a eficiência energética.

A partir desta análise, identificaram-se 5 *softwares* como sendo referências nos seus campos de aplicação, tendo em conta o número de utilizações dos mesmos nos vários documentos analisados.

No campo de aplicação associado à modelação em BIM, o *Revit* surge como uma referência clara, tendo em conta o número de vezes que foi utilizado nos artigos analisados. Este programa, segundo a *Autodesk*, é descrito como sendo um *software* de BIM multidisciplinar para projetos de edifícios [266], o que vem justificar a sua ampla utilização.

Para análises energéticas, os autores recorreram a um maior número de *softwares*, o que poderá indicar que o conhecimento das ferramentas associadas a este campo de aplicação pode ainda não estar consolidado. Contudo, podem ser considerados como possíveis referências futuras, os 4 *softwares* identificados anteriormente, nomeadamente, o *EnergyPlus*, o *Ecotect*, o *Green Building Studio* e o IES-VE.

#### 4.9.2. Relação entre *software*

Um dos desafios do BIM, enquanto ferramenta para aferir e melhorar a eficiência energética dos modelos criados nas diversas fases do projeto dos mesmos, passa pela necessidade de melhorar a interoperabilidade entre os *softwares* BIM e ferramentas de simulação ou análise energética [71]. Tendo isto em conta, é relevante tentar perceber em que medida esta limitação influenciou o uso conjunto de diversos *softwares* pelos autores presentes na biblioteca em análise.

Para tal, recorreu-se a uma rede de coocorrência, diferente da apresentada na Figura 13 no significado do elemento nó que, nesta análise, representa um *software* utilizado por certo autor, e o seu tamanho o número de vezes que o mesmo foi utilizado. As ligações representam operações de uso conjunto de diferentes programas informáticos.

Os *softwares* identificados no ponto anterior são facilmente reconhecidos, tendo em conta que são representados pelos nós de maior dimensão. É pertinente então proceder à análise das ligações entre todos os nós representados na Figura 24.

O *Revit* aparece como elemento central desta rede, pelo tamanho do seu nó e pelas ligações que apresenta. Este ostenta dezenas de utilizações em conjunto com outros *softwares*, incluindo de outros campos de aplicação, como é o caso da análise energética. Os 4 programas informáticos identificados como sendo de referência neste campo apresentam ligações diretas com o *Revit*, destacando-se então como o líder da interoperabilidade entre todos os *softwares* analisados.

O *Revit* apresenta ainda uma forte relação com os *softwares* desenvolvidos pelos autores, o que intensifica a ideia de que este poderá ser uma referência no capítulo da interoperabilidade, no que toca aos programas informáticos utilizados nas referências em análise.



1. Arquitetos;
2. Construtores;
3. Engenheiros;
4. Proprietários;
5. Promotores de obra;
6. Utilizadores.

Os arquitetos, responsáveis pela criação e definição de espaços e design geral das construções, foram associados a todos os artigos que incidiam sobre o design, a utilização de materiais experimentais e utilização de novas soluções arquitetónicas.

Os construtores executam os projetos criados pelos arquitetos e engenheiros e foram associados aos artigos que investigam o efeito do BIM no aumento da eficácia de diferentes métodos construtivos, consequente aumento da eficiência energética e redução de custos.

Os engenheiros, responsáveis pelos projetos de especialidades das construções, foram associados todos os artigos que continham referências à utilização de novos materiais, novas técnicas de construção, métodos BIM para aumento de eficácia nas várias fases de um projeto, redução de custos e ainda técnicas para facilitar a manutenção de construções.

Os proprietários, como responsáveis pela manutenção dos seus imóveis, aparecem aqui representados e associados a artigos que investigam técnicas de BIM que aumentem a facilidade de manutenção das construções durante todo o seu ciclo de vida, tendo em conta que os mesmos suportam os custos associados.

Os promotores de obra, por serem responsáveis pelo investimento inicial para construção de edificações, foram associados aos artigos que investigam o aumento de eficiência em fase de construção e redução de custos.

Os utilizadores foram associados a investigações que tentem relacionar o seu papel com o aumento da eficiência energética, manutenção de edificações e utilização geral de espaços.

A partir da Figura 25, pode-se concluir que o conteúdo geral desta biblioteca é maioritariamente dirigido a engenheiros, por terem sido identificados como público-alvo em 210 dos 219 artigos analisados.

Com 92 artigos a si dirigidos, o grupo dos arquitetos surge como segundo principal nos artigos analisados. O terceiro principal grupo é o grupo dos proprietários, com 59 referências a eles direcionadas, seguidos pelos construtores, com 47 e, por fim, os utilizadores e os promotores, com 17 e 16 referências, respetivamente.

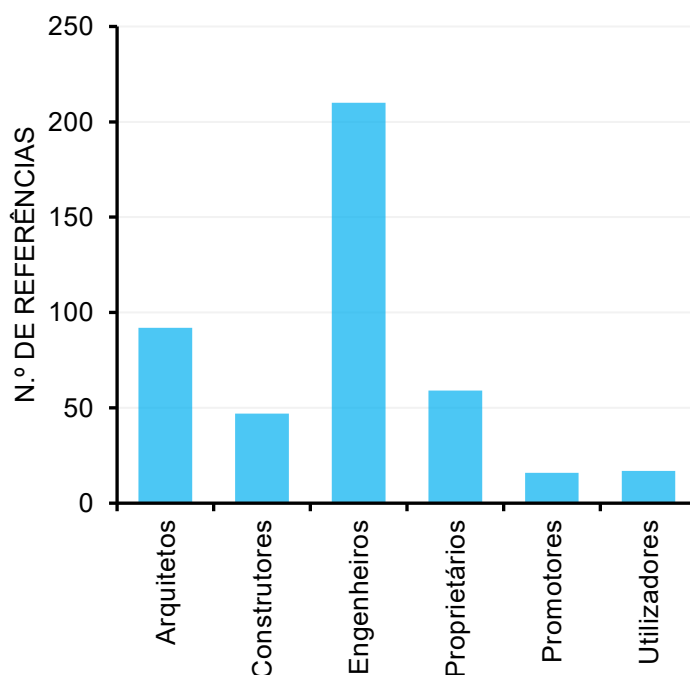


Figura 25. Público-Alvo

Poder-se-á retirar a conclusão que os temas aqui em análise são de natureza técnica elevada, tendo em conta que se dirigem, essencialmente, a técnicos responsáveis pela elaboração de novos projetos que, com o conhecimento adquirido nas pesquisas aqui analisadas, terão o poder de aumentar a eficiência energética desses projetos com recurso a ferramentas BIM.

#### 4.11. Considerações finais

O presente capítulo consistiu na recolha e análise dos dados bibliométricos associados às referências em análise na presente dissertação. Esta análise cienciométrica teve como principal objetivo determinar o nível de conhecimento no que se refere à utilização de ferramentas BIM para avaliação energética em edifícios, de maneira quantitativa. Procedeu-se à compilação destes dados em folhas de cálculo, através da extração dos mesmos a partir do *software* de gestão de bibliotecas a que se recorreu. Este processo facilitou a análise e interpretação dos diferentes dados recolhidos, permitindo identificar padrões e particularidades associadas às referências recolhidas.

Assim, analisaram-se 16 parâmetros bibliométricos, pertencentes a 9 tópicos identificados:

1. Número de publicações: Este parâmetro referiu-se ao número absoluto de referências publicadas, com o intuito de identificar a evolução de publicação das mesmas. Associando o ano de publicação a cada uma das 200 referências, e considerando o intervalo de tempo entre os anos 2009 e 2019, observou-se um crescimento não linear do número de publicações, com o máximo de referências a serem publicadas em 2019. Tendo sido este máximo

identificado no último ano em análise, tal poderá significar que ainda não se atingiu um máximo absoluto de conhecimento nestes campos científicos, podendo haver ainda crescimento para além do último ano analisado. Então, os temas aqui em análise podem ser considerados pertinentes e atuais;

2. Tipo de publicação: Este tópico referiu-se aos tipos de referências identificados na biblioteca. Identificaram-se oito tipos de referências, desde artigos de revista científica, até livros e teses. Destes, destacaram-se os artigos de revista científica, com 169 referências a serem publicadas em diversas revistas científicas, após um processo de avaliação e aprovação por pares dos autores. Tendo em conta o nível de exigência associado a este processo, pode-se concluir que, para os campos científicos aqui em investigação, o nível de investigação pode ser considerado avançado. Tal poderá significar que os diferentes dados recolhidos a partir da biblioteca aqui em análise poderão conter informação fiável e de qualidade;
3. Fonte de publicação: Tendo em conta que os dois principais tipos de referência identificados foram aqueles que correspondem a artigos publicados em revistas de carácter científico e artigos de conferência, decidiu-se compilar a informação referente a estas fontes de publicação. No total, identificaram-se 50 revistas de carácter científico com publicações na biblioteca aqui em análise. A revista com mais publicações foi identificada como sendo a *Automation in Construction*, editada pela *Elsevier*. A esta, corresponderam 27 dos 169 artigos publicados em revistas de carácter científico. Entre as 50 revistas identificadas, 13 apresentaram mais do que uma referência na biblioteca. Analisou-se ainda o fator de impacto das dez revistas com mais publicações na biblioteca aqui em análise. Em nove delas, este valor foi superior a dois, o que indica que estas plataformas são habitualmente utilizadas como base de recolha de informação por diversos investigadores. No que toca às conferências, foram identificadas 27 destas fontes, onde apenas uma apresentou múltiplas referências.
4. Palavras-chave: Os termos chave representam sínteses dos temas analisados nas referências de carácter científico. Na presente biblioteca, identificaram-se 563 palavras-chave diferentes, com destaque para os três termos com mais ocorrências na biblioteca “BIM”, “Energy” e “Building”, como seria de esperar. Neste tópico, procedeu-se a duas análises diferentes, que incidiram sobre a coocorrência de palavras-chave e a tendência de ocorrência das mesmas.
  - a. Coocorrência de palavras-chave: Considerando a proximidade entre os nós dos termos-chave principais “BIM”, “Energy” e “Building” e a espessura da ligação, pode-se concluir que existe um elevado grau de coocorrência entre todos eles, o que poderá significar que as investigações atuais incidem sobre a relação entre os temas por eles representados;
  - b. Tendência de ocorrência: Observou-se que os picos de ocorrência da maioria das palavras-chave principais ocorrem entre os anos de 2017 e 2019, o que poderá

significar que existe atualmente um elevado interesse nos campos do BIM e da eficiência energética em edifícios;

5. Países: De maneira a identificar os países que mais se dedicam ao estudo dos campos científicos associados ao BIM e à eficiência energética em edifícios, recolheu-se a informação alusiva aos países de origem das diferentes referências compiladas na biblioteca criada para a elaboração do presente documento. Procedeu-se a duas diferentes análises referentes aos países de publicação. Em primeira instância expôs-se diretamente a distribuição das publicações por país de origem. Numa segunda fase, analisou-se a colaboração entre todos esses países:

a. Distribuição de publicações por país: Identificaram-se 37 países diferentes com documentos publicados, dos quais 26 apresentaram múltiplas referências a eles associadas. Destes, destacam-se os Estados Unidos da América, com 36 referências, a China, com 31 referências e o Reino Unido, com 27 publicações. Portugal, por sua vez, apresenta 6 referências publicadas, um valor abaixo das 8 referências médias publicadas por país;

b. Colaboração internacional: Observou-se que a China é o país com maior colaboração internacional, apresentando ligações com os Estados Unidos da América, Austrália e Reino Unido. Os três países com mais referências publicadas representam os países que mais colaboram com outros, o que poderá significar que têm uma importância significativa no que toca ao avanço do conhecimento nas áreas científicas aqui exploradas. Identificaram-se os fatores geográficos e idiomáticos como sendo os principais impulsionadores de colaboração entre países;

6. Citações: De maneira a determinar se as referências recolhidas têm algum impacto nas áreas científicas a que se referem, recolheu-se os dados relativos às citações das 219 referências pertencentes à biblioteca aqui em análise. Analisaram-se três fatores associados a citações. Começou-se pelos artigos mais citados a nível absoluto, criou-se depois um rácio de citações para as referências e terminou-se com a análise dos autores mais citados:

a. Artigos mais citados: O artigo mais citado de toda a biblioteca intitula-se "*Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry*", referenciado por 1809 publicações. No total, os artigos foram citados 15169 vezes, com uma média de 69 citações por artigo, com apenas 39 artigos sem qualquer citação à data da recolha desta informação;

b. Rácio de citações: Verificou-se que as quatro referências com mais citações permaneceram como as principais nesta análise, o que revela que são artigos com um interesse difundido no tempo, desde que foi publicado;

c. Número de citações por ano: Com um total de 13826 citações neste período, verificou-se um crescimento quase exponencial neste campo, não sendo possível identificar

algum pico, ou seja, o interesse e a investigação nestes campos não mostram ainda sinais de abrandamento, tornando-a atual e pertinente;

7. Autores: Neste tópico foram analisados quais os autores com mais referências na biblioteca, de entre os 620 identificados e criou-se uma rede de colaboração entre autores, de maneira a determinar o nível de colaboração entres estes, concluindo com o levantamento dos autores mais citados:

- a. Autores com mais publicações: Estes são Yong Cho e Chao Wang, pertencentes à *School of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology*, situada em Atlanta, Estados Unidos da América, com quatro publicações associadas a cada um. Tendo em conta que os restantes autores apresentam três referências ou menos, não se conseguiu identificar um autor que mereça a distinção de líder ou referência no que toca à junção dos campos científicos BIM e de avaliação energética de edifícios;
- b. Colaboração entre autores: Verificou-se que a colaboração entre autores é baixa, com os clusters criados a não indicar muitas ligações entre si. Ainda assim, identificou-se uma rede de colaboração, composta por 23 diferentes autores, com três autores centrais;
- c. Autores mais citados: O autor mais citado da biblioteca é Salman Azhar, com um total de 2500 citações. A média de citações por autor é de sessenta e cinco citações. No entanto, retirando desta média os 103 autores que não apresentam qualquer citação, este valor sobe para 78 citações por autor.

8. *Software*: Tendo em conta a importância das novas tecnologias e tecnologias digitais para os campos científicos associados ao BIM e à avaliação energética dos edifícios, procedeu-se à análise das ferramentas informáticas mais utilizados pelos investigadores publicados nestes campos, com identificação dos campos de aplicação dessas mesmas ferramentas. Adicionalmente, e através da criação de uma rede de coocorrência, verificou-se o nível de relação entre os principais dos 94 *softwares* identificados:

- a. *Software* utilizado: Identificaram-se três campos de aplicação associados aos 30 *softwares* mais utilizadas e mencionadas nas referências pertencentes à biblioteca aqui em análise. No campo da modelação BIM, destacou-se com larga margem o *Revit*, sendo este já um *software* de usos consolidado neste campo, tendo em conta o número de vezes que foi utilizado (69). No campo da análise energética, não se identificou uma ferramenta líder, uma vez que os três principais *softwares* (*EnergyPlus*, *Ecotect* e *Green Building Studio*) variam entre 23 e 21 utilizações. O terceiro campo de aplicação contempla os *softwares* utilizados para criar novas ferramentas de apoio à avaliação energética de edifícios com base em modelos BIM;
- b. Relação entre *softwares*: Através de uma rede de coocorrência, verificou-se que, como seria de esperar, uma vez que é a ferramenta mais utilizada, o *Revit* revelou-se como

o elemento central desta rede, com ligações com grande parte das outras ferramentas identificadas. Salienta-se ainda que os *softwares* desenvolvidos pela mesma empresa apresentam um nível mais elevado de relação, como é o caso das ferramentas da *Autodesk*;

9. Público-alvo: Nesta análise foram identificados seis grupos pertencentes ao público-alvo a que as referências recolhidas se dirigem. Estes grupos são compostos por Arquitetos, Engenheiros, Proprietários, Promotores de Obra e Utilizadores e foram escolhidos de acordo com a informação patente em cada uma das referências, com algumas a serem dirigidas a mais do que um grupo. Observou-se que a maioria da informação recolhida era dirigida a Engenheiros, com o grupo dos Arquitetos em segunda posição. Isto poderá indicar que a informação recolhida, no seu geral, é de natureza técnica elevada, uma vez que se dirige maioritariamente a técnicos responsável pelo projeto dos edifícios.

Todas estas análises permitem assim concluir que o interesse no que concerne à aplicação de ferramentas BIM para a avaliação energética é elevada, que o conhecimento nestas áreas é amplo e fiável, tendo em conta o número de publicações relevantes recolhidas e por serem maioritariamente artigos de revista científica, avaliado e aprovado por pares dos autores dos mesmos. Porém, este conhecimento ainda não pode ser considerado consolidado, tendo em conta o crescimento observado no que toca ao número de publicações e número de citações dos artigos recolhidos. Num futuro próximo, e se se observar um aumento do nível de colaboração internacional entre autores, o nível de conhecimento tem o potencial de aumentar de forma substancial e permitir resolver alguns dos desafios que existem ao nível da utilização de ferramentas BIM na avaliação energética de edifícios.

# 5

## Revisão sistemática de literatura

O presente capítulo incidirá no processamento de toda a informação recolhida, através da metodologia apresentada no Capítulo 3, com o objetivo de se identificarem as principais oportunidades e os atuais desafios associados à utilização de ferramentas BIM para a avaliação energética de edifícios.

De acordo com o conteúdo das referências selecionadas organizar-se-á o presente capítulo através da separação da informação recolhida em diferentes tópicos (Subseções), que por sua vez são agrupados em categorias (Secções).

Através de uma análise sistemática da informação recolhida, apresentar-se-á, para cada tópico, o estado atual da arte, as oportunidades e barreiras atuais identificados pelos diversos autores, e possíveis soluções para o avanço da arte associada.

Com isto, pretende-se expor a situação global atual do uso de ferramentas BIM para a avaliação energética em edifícios, e possíveis aplicações futuras destas tecnologias, de maneira a promover uma maior sustentabilidade futura associada ao setor AECO, através de um aumento da eficiência energética dos seus produtos e métodos, reduzindo o impacto ambiental negativo associado a este setor.

## 5.1. Introdução

O aumento das publicações baseadas em evidências científicas provocou um incremento na variedade dos tipos de revisão existentes. A diversa terminologia associada às diferentes revisões poderá contudo provocar um certo retrocesso, em forma de confusão e má aplicação dessa terminologia para descrever certos trabalho científicos [267].

Ao recorrer a uma revisão de literatura, torna-se então relevante identificar claramente o tipo de revisão que o autor pretende apresentar. Grant, M. J. e Booth, A. [267] identificaram e analisaram 14 tipos de revisões efetuadas:

1. Revisão crítica;
2. Revisão de literatura;
3. Revisão mapeada;
4. Meta análise;
5. Revisão de métodos mistos;
6. Visão geral;
7. Revisão sistemática qualitativa;
8. Revisão rápida;
9. Revisão sumária;
10. Estado da arte;
11. Revisão sistemática de literatura;
12. Pesquisa sistemática;
13. Revisão sistematizada;
14. Revisão *Umbrella*.

O tipo de revisão a que a maior parte dos autores recorre é a revisão sistemática de literatura. Grant, M. J. e Booth, A. [267] caracterizaram este tipo de revisão a partir de um conceito denominado por *SALSA framework*. Este conceito define os critérios sobre os quais se pode caracterizar diferentes tipos de pesquisa, sendo estes:

1. *Search*: tipo de pesquisa levada a cabo pelo investigador;
2. *Appraisal*: avaliação da qualidade do material recolhido;
3. *Synthesis*: resumo dos dados recolhidos, com vista à identificação de padrões;
4. *Analysis*: análise dos padrões identificados.

Para uma revisão sistemática de leitura, a pesquisa é identificada como sendo exaustiva, com possibilidade de haver avaliação do conteúdo, uma síntese narrativa e uma análise que se foque no estado atual da arte e recomendações de prática.

No presente documento, procedeu-se a uma pesquisa ampla, com critérios definidos, que resultou num total de 219 referências analisadas, podendo esta ser considerada exaustiva.

O conteúdo recolhido foi avaliado a partir de critérios de exclusão bem definidos, conforme exposto no Capítulo 3.

Neste capítulo proceder-se-á a um resumo dos dados recolhidos, de maneira organizada, em tom narrativo, com o objetivo de identificar o estado atual da arte e possibilidades futuras para o recurso a ferramentas BIM na avaliação energética de edifícios.

Então, e segundo os autores Grant, M. J. e Booth, A [267], pode-se afirmar que o trabalho aqui realizado se classifica como uma revisão sistemática de leitura, em que se estrutura a mesma recorrendo à divisão da literatura em categorias principais e tópicos associados, com uma análise do estado atual e das perspetivas futuras. Estas categorias e correspondentes tópicos apresentam-se na Tabela 2, identificando as referências associadas a cada tópico:

**Tabela 2. Categorias e tópicos identificados na biblioteca, e referências associadas**

Categoria	Tópico	Referências
Tecnologias BIM	Interoperabilidade	[4, 6, 30, 43, 45-47, 54, 61, 71, 76, 83, 86, 89, 96, 103, 110, 111, 122, 126, 128, 131, 144, 151, 158, 170, 174, 178, 185, 194, 206-208, 215, 229]
	Junção de pontos de <i>laser scanner</i> com termografia	[57, 70, 91, 92, 97, 108, 109, 136, 137, 184, 217-219]
	Análises ao nível urbano – BIM / SIG	[55, 62, 72, 105, 117, 167, 189, 199, 202, 225]
	Monitorização de edifícios	[48, 57, 75, 101, 115, 149, 166, 209, 214, 232, 238]
Desenvolvimento de aplicações apoiadas no modelo BIM	Desenvolvimento de <i>softwares / plugins</i>	[36, 37, 63, 66, 95, 127, 141, 147, 148, 152, 153, 164, 172, 173, 234]
	Plataformas de visualização de resultados	[33, 65, 74, 94, 167, 210]
Construção sustentável	Comparação de materiais e soluções	[5, 31, 32, 35, 49, 52, 53, 69, 77, 79, 85, 100, 104, 112-114, 139, 142, 146, 156, 165, 171, 184, 191, 196, 198, 200, 201, 227, 230, 231, 233, 237]
	Estimativa de consumos	[51, 68, 90, 93, 99, 118, 123, 124, 129, 135, 146, 155, 179, 186, 193, 201, 212, 221, 235, 236, 239]
	LCA	[39-42, 56, 60, 80, 82, 84, 87, 102, 120, 121, 132, 140, 160-162, 168, 169, 176, 180, 181, 190, 195, 197, 203, 204, 213, 223, 225, 226]
	NZEB	[38, 59, 68, 119, 130, 134, 145, 159, 205]
Projeto higratérmico de edifícios	Certificação energética	[7, 44, 50, 67, 81, 116, 125, 133, 143, 150, 157, 177, 182, 183, 211, 222, 224]
	Conforto térmico	[63, 73, 88, 107, 112, 159, 196, 220, 228]
	Reabilitação de edifícios	[58, 98, 107, 127, 138, 187, 188, 192, 204, 216]
Ensino	Ensino / Qualidade do ensino	[34, 64, 78, 106, 154, 163, 175]

## 5.2. Tecnologias BIM

Esta categoria juntou os tópicos cujas referências investigam assuntos associados às tecnologias BIM ou tecnologias que se relacionam com o BIM, capacidades das mesmas e integração de tecnologias dissemelhantes e variadas em ambiente e ferramentas BIM, com vista ao aumento de capacidades destas.

Identificaram-se quatro tópicos nesta categoria:

1. “Interoperabilidade”, que indica a capacidade de integração e utilização de novas ferramentas e/ou *plugins* em tecnologias BIM, de maneira a aumentar a capacidade atual das mesmas;
2. “Junção de pontos de *laser scanner* com termografia”. A integração de tecnologias de termografia à recolha de informação geométrica e consequente associação a modelos BIM parece ser uma solução para a identificação e avaliação energética de edifícios existentes e em funcionamento;
3. “Análises ao nível urbano BIM / SIG”, onde se explorou a capacidade de melhorar a avaliação energética de edifícios, recorrendo a análises em larga escala, através da integração de tecnologias de Sistemas de Informação Geográfica em ambiente BIM;
4. Monitorização de edifícios: Este tópico refere-se à investigação que explore o uso de modelos BIM associados a sensores, para criação de sistemas de monitorização em tempo real, capazes de facilitar o processo de manutenção de edifícios, com vista à operação do mesmo em condições ótimas de eficiência energética.

### 5.2.1. Interoperabilidade

A interoperabilidade é uma das capacidades mais importantes das ferramentas BIM, permitindo que vários sistemas ou ferramentas transfiram automaticamente dados entre si [89, 96]. Apesar das vantagens que um elevado nível de interoperabilidade possa apresentar, este é ainda visto como baixo [111], pois foca-se essencialmente na coordenação 3D de modelos, descartando algumas outras propriedades essenciais para análises mais profundas [46]. Como tal, a interoperabilidade é vista como uma barreira ou desafio a ultrapassar para uma maior adoção do BIM no setor da construção [4, 45, 103, 207].

Um elevado nível de interoperabilidade entre ferramentas, possibilitará reduzir custos e tempos associados à elaboração de projetos [229], criar edifícios mais sustentáveis, reduzir *inputs* manuais através da automatização de processos de transferência de dados e, por isso, obter resultados mais fidedignos [30, 158, 215].

Existe então a necessidade de explorar a interoperabilidade entre ferramentas BIM e ferramentas de simulação e avaliação energética, uma vez que a integração de simulações energéticas em

ambiente BIM apresenta o potencial de acelerar o processo de análise energética, assim como a obtenção de resultados mais detalhados e precisos [54, 110, 126, 170, 185].

Como tal, o BIM expandiu recentemente as suas capacidades de interoperabilidade para funcionamento dos seus modelos em ferramentas de simulação energética, através da sua conversão em modelos BEM [128] o que significa que o seu desenvolvimento é ainda recente, e com muita margem de evolução [30], mas com o potencial de criar plataformas de otimização de *design* de edifícios energeticamente eficientes [47].

O principal obstáculo à interoperabilidade entre ferramentas BIM e ferramentas de simulação energética está associado à dificuldade existente nos processos de extração e transferência de dados entre estas ferramentas [89, 131, 144]. Embora os ficheiros resultantes de ferramentas BIM possam albergar toda a informação necessária para uma análise energética, o processo de transferência entre ferramentas poderá levar a uma perda de dados, por estas lidarem com estruturas de ficheiros distintas [61, 128, 208]. Existe então a necessidade de melhorar a interoperabilidade entre ferramentas BIM e de simulação energética [71].

Apesar de ainda se apresentar como um obstáculo, vários autores investigam e defendem que uma boa interoperabilidade entre ferramentas BIM e de análise energética representam o futuro de uma construção sustentável e energeticamente eficiente [178] e, como tal apresentam várias soluções capazes de promover maior interoperabilidade entre estas ferramentas.

O recurso a uma plataforma *openBIM*, que se adapte aos requisitos de qualquer aplicação é vista como uma das principais soluções para resolver os problemas de interoperabilidade, pois promove uma convergência de processos através da partilha de informações entre intervenientes [43, 83]. O recurso a um modelo *SimModel* é também visto como uma possível solução dos problemas de interoperabilidade entre ferramentas BIM e de simulação energética [76].

Adicionalmente, a padronização da estrutura de ficheiros entre diferentes ferramentas é vista como possível solução, pois reduziria o risco de perda de dados no processo de transferência destes entre ferramentas BIM e de simulação energética [151, 174, 229]. O padrão de dados mais utilizado denomina-se por *Industry Foundation Classes* (IFC) [6]. Este facilita a transferência de dados de modelos BIM entre ferramentas compatíveis, permitindo que vários intervenientes usem um mesmo modelo para diversos fins, independentemente da ferramenta BIM utilizada [46].

Através de modelos tipo, como o *Model View Definition* (MVD), o padrão IFC surge como um formato BIM universal, por não ser dependente de nenhuma ferramenta BIM em específico. Um MVD permite que se determine as entidades IFC a transferir entre ferramentas. Pode conter todo o modelo BIM, para efeitos de armazenamento de projeto, ou apenas entidades IFC específicas de um modelo, o que facilita o processo de transferência de dados e a interação entre todos os intervenientes responsáveis por um projeto. Então, o IFC, atualmente na versão 4, quando combinado com MVD, representa a chave para o melhoramento de interoperabilidade entre

ferramentas BIM e de análise energética [43], uma vez que permite que se exportem apenas os elementos específicos necessários para tal análise, garantido um nível alto de compatibilidade e um risco reduzido de perda de dados.

A maioria das investigações que incidem sobre o capítulo da interoperabilidade, centram-se no objetivo de reduzir tempos e custos e aumentar a eficiência dos processos de transferência de dados entre ferramentas. Todavia, existe uma falta de investigação no que concerne ao efeito do nível de interoperabilidade na redução do impacto ambiental de um projeto em todo o seu ciclo de vida, ou seja, entre ferramentas BIM e ferramentas LCA e de avaliação de edifícios NZEB, devendo estes campos serem investigados futuramente [194, 206]. A consideração de todo o ciclo de vida e de toda a energia necessária durante esse ciclo, tem o potencial de reduzir o impacto ambiental geral do setor da construção.

O nível atual de interoperabilidade depende essencialmente do mercado de ferramentas existente [86] e, como tal, o desenvolvimento de ferramentas BIM e de análise energética da próxima geração terão de garantir a resolução dos atuais problemas encontrados [122], que impedem um processo totalmente integrado de análise energética com base em modelos BIM, recorrendo a algumas das soluções aqui apresentadas, como o padrão IFC que, através do MVD, se revela como a chave para ultrapassar as atuais barreiras existentes no que toca à interoperabilidade entre ferramentas.

### 5.2.2. Junção de nuvens de pontos de *laser scanner* com termografia

A modelação de edifícios existentes é particularmente exigente e requer técnicas não invasivas e não destrutivas no processo de recolha de dados geométricos dos mesmos [136]. Como tal, os *laser scanners* surgem como os equipamentos mais apropriados para a criação de modelos BIM de edifícios existentes, através da criação de nuvens de pontos das suas superfícies, facilitando o processo de modelação [97].

Porém, os *laser scanner* tradicionais não dispõem de capacidades de obtenção de informação termográfica, dificultando uma correta perceção do comportamento térmico dos edifícios analisados através desta recolha e, conseqüentemente, da sua performance energética [184]. Desta maneira, a possibilidade de juntar informação térmica a cada ponto da nuvem criada nas digitalizações poderá fornecer informações importantes do comportamento térmico do edifício [108], permitindo calibrar o modelo BIM com informações reais sobre as propriedades térmicas dos materiais e efeito das pontes térmicas [137]. Tendo em conta que, na maioria dos casos, as propriedades térmicas utilizadas em modelos BIM são pré-definidas pelas ferramentas, dependentes dos materiais definidos no modelo, esta solução apresenta-se como inovadora, uma vez que tem em consideração a resistência térmica da construção no seu estado atual, no caso de edifícios existentes [109].

No entanto, nem sempre é possível recorrer a ferramentas tecnológicas de última geração e, como tal, alguns investigadores sugerem um sistema híbrido, constituído por *lasers* e câmaras infravermelhas, responsáveis pela recolha de nuvens de pontos geométricos e nuvens de pontos térmicos, respetivamente.

É tecnicamente possível recorrer a tal sistema para modelação de edifícios existentes [70]. Os dados geométricos e térmicos são então associados entre si e, recorrendo à criação de um único ficheiro, habitualmente em formato gbXML, torna-se possível criar um modelo com informação suficiente para simular a sua performance energética [136, 217, 219].

Todavia, tendo em conta que as nuvens de pontos geométricos criada por *laser scanners* são habitualmente de grande dimensão, podendo conter milhões de pontos num único levantamento, a associação de dados termográficos resulta numa quantidade de informação de dimensão tal, que pode dificultar e aumentar o tempo associado ao processo de criação de modelos.

Os investigadores sugerem dois métodos para resolução deste problema. Uma das soluções poderá passar pelo aumento do espaçamento entre pontos predefinido nos *scanners* utilizados. Esta alteração reduziria o número de pontos contidos na nuvem, reduzindo o seu tamanho e acelerando o processo de modelação [91, 92]. Outra solução poderá passar pela criação de algoritmos que identifiquem os limites físicos do edifício digitalizado, na nuvem de pontos criada, reduzindo o tamanho da mesma [218] ao desconsiderar os pontos restantes, que não pertençam a esses limites.

Apesar do uso de processos automáticos de recolha de informação geométrica, como *laser scanner*, ou através de nuvens de pontos, muitas vezes o resultado de tais recolhas são superfícies 3D. Os processos atuais de conversão deste tipo de elementos em modelos paramétricos são manuais, o que pode implicar a adoção de simplificações, resultando na criação de modelos com algumas imprecisões [57], sendo uma solução para este problema a criação de uma ferramenta automática de conversão de superfícies 3D em modelos paramétricos.

Adicionalmente, as variações de temperatura de um edifício terão de ser ainda consideradas, uma vez que com o decorrer de um ciclo diário, a temperatura da superfície dos diferentes elementos que constituem a estrutura varia. Como tal, os *softwares* BIM terão de ser capazes de aceitar e tratar o tipo de dados que possa resultar de levantamentos termográficos que associem diferentes temperaturas a uma mesma geometria, permitindo melhorar o processo de calibração de um modelo a partir de tais levantamentos.

A recolha de dados termográficos e sua associação a elementos geométricos é, como já referido, um processo moroso. Como tal, o recurso a *laser scanners* mais recentes, com a capacidade de recolher informação termográfica e geométrica, como o *Leica-Geosystems BLK360*, apresenta o potencial de acelerar estes processos, promovendo as análises de performance energética de edifícios existentes através da recolha acelerada da informação geométrica e térmica necessárias para esse efeito.

### 5.2.3. Análises ao nível urbano BIM/SIG

Como resposta aos desafios criados pelos impactos negativos ambientais habitualmente associados ao setor da construção, a procura e desejo pela conceção de centros urbanos mais ecológicos e sustentáveis tem vindo a aumentar [55, 199, 202].

Como tal, os responsáveis pelo planeamento urbano terão de adotar medidas proativas de implementação de novas e melhores estratégias energéticas [62]. Uma medida passa pela análise energética dos tecidos urbanos atuais, de maneira a identificar limitações existentes, responsáveis pela redução da eficiência energética de um centro urbano como um todo.

Os centros citadinos são assim caracterizados por conterem diversos edifícios numa área metropolitana de grande movimento, formando um tecido urbano capaz de, em casos extremos, apresentar microclimas. Como tal, a análise energética numa escala urbana torna-se mais complexa, não sendo apenas a junção linear dos resultados de análises energéticas individuais, realizadas aos edifícios que compõem um centro urbano. Tendo em conta que a performance energética de um edifício é significativamente influenciada pelas construções envolventes [167], uma análise a escala urbana tem de considerar as dinâmicas e interdependências existentes entre todo o edificado [117].

Atualmente, as análises energéticas a edifícios ainda são, em muitos casos, efetuadas através de simulações que não consideram a sua envolvente [167], através de modelos BEM, convertidos e a partir de modelos criados em ferramentas BIM. O desafio passa pela criação de modelos de escala suficientemente grande, que contenha todos os edifícios existentes num centro urbano, de maneira a considerar todos os fatores com peso na sua performance energética. Deverá considerar-se então nos modelos de grande escala o efeito da interação entre edifícios, a utilização de redes de energia públicas, análises solares conjuntas considerando o efeito das sombras, a definição de alinhamentos urbanos com vista à maximização de ganhos e redução de perdas energéticas e ainda que permita análises de volumetrias ótimas de edifícios.

Os responsáveis pelo planeamento urbano recorrem, há alguns anos, a uma ferramenta SIG 3D, o *CityGML*, para melhor procederem às suas tarefas, através da criação de modelos de grande escala, representativos do tecido urbano existente [105]. Contudo, este *software* não é, por agora, capaz de proceder a análises energéticas nos modelos que cria. De maneira a ultrapassar este problema, uma integração de ferramentas SIG 3D em ambiente BIM poderá representar novas oportunidades no panorama das análises energéticas ao nível urbano [72, 189], uma vez que contextualizará cada edifício individual na envolvente do mesmo.

A junção do nível de detalhe individual de que as ferramentas BIM são capazes à escala de que uma ferramenta SIG 3D é capaz, pode representar um cenário apelativo, podendo ser o futuro das análises energéticas e planeamento urbano. Contudo, para que tal seja possível, será necessário ultrapassar o desafio que o volume e variedade de dados necessários representa.

O recurso a *cloud computing* poderá permitir resolver parte deste problema, uma vez que esta tecnologia permite o armazenamento e processamento de enormes quantidades de informação, de uma maneira mais rápida e eficiente que as tecnologias habitualmente usadas, como os computadores pessoais [225]. Como tal, a criação de novas ferramentas, que incluam estas novas tecnologias, integrada em ambiente BIM e/ou BEM, poderá tornar-se na solução para as atuais limitações associadas a análises energéticas ao nível urbano.

#### 5.2.4. Monitorização de edifícios

A monitorização em tempo real representa uma possibilidade crucial para uma eficiente gestão de instalações e edifícios, contribuindo para a otimização da eficiência energética das edificações monitorizados [101].

Como tal, em tempos recentes, têm sido estudadas formas de criar sistemas de monitorização em tempo real de instalações, como o *Digital Twin* que, através de uma representação digital de um edifício, e tudo o que o compõe, incluindo processos e funcionalidades, permite tomar decisões em tempo real que influenciem e otimizem o seu funcionamento. Esta versão digital de um edifício necessita de atualizações constante de dados recolhidos em tempo real, habitualmente, por sensores [214, 232]. Contudo, apenas nos últimos anos foi possível associar toda a informação recolhida por sensores aos *Digital Twins* dos edifícios, tendo em conta a evolução dos sensores, como o recurso a sensores IoT (*Internet of Things*), que permitem uma melhor sincronização de todos os dados recolhidos.

As informações associadas à gestão de instalações, relacionadas com operações de manutenção ou reparação, podem já ser armazenadas em ferramentas BIM e associadas aos seus modelos [166, 209, 238]. No entanto e atualmente, estes dados referem-se apenas ao registo histórico de operações de manutenção, introduzidos através de *inputs* manuais no modelo BIM, não sendo dados recolhidos em tempo real. Uma eficiente gestão de edifícios requer que se afaste da introdução manual de informações, por serem mais suscetíveis a erros, menos precisas e menos consistentes. Como tal, a integração de dados de sensores em ferramentas BIM, através da automatização de recolha de informação, poderá permitir uma monitorização em tempo real do edifício através da associação desses dados ao modelo BIM. Atualmente, as ferramentas BIM ainda não possuem funções que integrem completamente os dados obtidos através de sensores [48].

Porém, investigações recentes sugerem que o uso de modelos BIM em conjunto com sistemas automatizados de recolha de informação de sensores poderão facilitar as tarefas de diagnóstico de problemas de um edifício existente [57]. Para tal, seria necessário melhorar o processo de sincronização de dados recolhidos por sensores em tempo real com o modelo BIM [75].

Poder-se-á concluir então que as ferramentas BIM ainda não estão totalmente preparadas para basear sistemas de monitorização em tempo real de edifícios, ainda mais por existirem inúmeros

*softwares* dedicados exclusivamente à monitorização de sistemas em tempo real com pouca integração em BIM [149].

Dada a poderosa capacidade de modelação associada a ferramentas BIM e a crescente complexidade dos edifícios construídos [115], poderá tornar-se interessante estudar a implementação de funções de monitorização em tempo real em ambiente BIM, com capacidade de sincronização de dados de sensores IoT. No entanto, a pesquisa científica que incide nesta integração é ainda recente e ainda não é possível determinar como se poderá garantir um elevado nível de interoperabilidade entre este tipo de sensores e ferramentas BIM, devendo as pesquisas futuras incidir sobre este tema.

Adicionalmente, os dados recolhidos por sensores, poderão ser interpretados e integrados em ferramentas BIM como uma base de dados de informação, funcionando como uma nova dimensão de informação que poderá ser associada a um modelo BIM, tornando-se esta o BIM 8D. Esta solução ainda está longe de se tornar num processo quotidiano, sendo este mais um ponto onde se deverá incidir em investigações futuras.

### **5.3. Desenvolvimento de aplicações apoiadas no modelo BIM**

Desta categoria fazem parte os tópicos que utilizam modelos BIM como base para a criação de ferramentas ou integração de novas tecnologias, com o objetivo de melhorar o processo de avaliação energética de edifícios.

Foram identificados os seguintes dois tópicos nesta categoria:

1. Desenvolvimento de *softwares* / *plugins*: Este tópico expõe a situação atual no que concerne à criação de novas ferramentas ou plugins que, quando associadas a modelos BIM, permitem aumentar as capacidades atuais de análise energética e recolha de informação automática associada;
2. Plataformas de visualização de resultados: Os modelos BIM e ferramentas associadas são capazes de representar muitas características relacionadas com os diversos modelos através de uma interface visual. Como tal, o presente tópico explora a utilização de ferramentas BIM como plataformas de visualização de resultados de análises energéticas ou térmicas, uma vez que estas podem conter informação de difícil interpretação. A associação deste tipo de informação a modelos BIM poderá facilitar a interpretação dos resultados destas análises, pelo que se torna relevante analisar as informações disponíveis sobre este tópico;

### 5.3.1. Desenvolvimento de *softwares* / *plugins*

Tendo por base as ferramentas BIM e as suas funcionalidades clássicas, existe investigação a ser levada a cabo que pretende averiguar a possibilidade de criação de novos *softwares* que permitam aumentar a funcionalidade dos *softwares* BIM atuais ou resolução das suas limitações. A vantagem de utilização de modelos BIM como base de dados é que permite a novas ferramentas acederem a informações de maneira automática, reduzindo a necessidade de introdução de dados manualmente [63, 127].

Recorrendo a plataformas de programação visual como o *Dynamo*, *Grasshopper* ou *MATLAB*, torna-se possível transformar as ferramentas BIM em ferramentas programáveis [164], dado que os objetos BIM são paramétricos, portanto, personalizáveis, permitindo criar algoritmos que ajudem a tomar decisões mais energeticamente eficientes [66, 172, 173] no que toca ao design, à escolha de melhores materiais, conversão de modelos [141] para análises energéticas em ferramentas externas e avaliações energéticas de edifícios [148].

Na sua grande maioria, os autores investigam as possibilidades e vantagens que a adição de algumas funções às ferramentas BIM clássicas podem trazer às análises e avaliações energéticas. Através da capacidade de armazenamento de dados das ferramentas atuais, é possível criar ferramentas que simulem iterativamente combinações de soluções com vista à otimização de *design* [36, 147]. Adicionalmente, a modelação em BIM de sistemas AVAC [95] e esgotos domésticos [153] poderá permitir a criação de ferramentas de otimização de tais sistemas, com o objetivo de aumentar a sustentabilidade dos edifícios. Tal poderia ser alcançado, no caso de sistemas AVAC, integrando o seu funcionamento na análise energética. Esta integração seria possível, uma vez que o funcionamento destes sistemas é programado e, como tal, pode ser replicado digitalmente para efeitos de análise.

No que toca à conversão de modelos BIM em BEM, as fachadas curvas apresentam-se como o maior desafio para obter a melhor correlação possível entre modelos. Então, para resolução de tal problema, a criação de um algoritmo de conversão de curvas em malhas de poliedros parece ser uma solução, permitindo obter resultados mais fiáveis a partir de modelos BIM convertidos [234].

A procura de soluções mais baratas, ou com menor impacto económico apresenta-se também como uma oportunidade de criação de ferramentas de análise económica. Uma ferramenta BIM, em conjunto com algoritmos genéticos e simulações *Monte-Carlo* [152], poderia ser capaz de calcular parâmetros económicos relacionados com as decisões tomadas em fase de design, permitindo aferir o impacto económico do modelo [37].

As ferramentas BIM existentes, de acordo com as investigações a serem levadas a cabo atualmente, apresentam espaço para desenvolvimentos futuros, com possibilidades de aumento de funções e capacidades. A integração de todas as funções investigadas numa só ferramenta

global está longe de ser uma realidade, pela complexidade e disparidade de processos utilizados. Contudo, existe a possibilidade de atualizar as ferramentas existentes para incluir novas funções, sendo este o desenvolvimento mais provável num futuro próximo. Do ponto de vista da análise energética com base em modelos BIM, a integração de funções de armazenamento em nuvem parecem ser as mais benéficas, uma vez que permitem o armazenamento, consulta e transferência de dados entre os diversos projetistas de forma simplificada. A impressão 3D de modelos e o uso de realidade virtual poderá ser também benéfico, quando integrados com BIM, uma vez que facilitam o processo de análise, de um ponto de vista inovador, capaz de identificar problemas práticos de maneira mais rápida e eficaz.

### 5.3.2. Plataformas de visualização de resultados

A utilização de plataformas de visualização integradas em ambiente BIM apresenta o potencial de facilitar a interpretação de resultados de simulações energéticas, ao disponibilizar interfaces e representações mais simplificadas de informações, à partida, de complexa interpretação.

Maioritariamente, os autores que recorrem à criação de plataformas deste género, fazem-no através de atribuição de cores a objetos, propriedades das análises, ou à representação em diagramas, facilitando a interpretação dos dados apresentados [33, 65, 74, 94, 167, 210].

Recorrendo a modelos BIM, posteriormente convertidos em modelos BPS, é possível representar a performance energética de um edifício em diagramas tipo *Sankey*. Este tipo de diagrama permite visualizar o fluxo de utilização energética de um edifício, facilitando o processo de identificação de problemas operacionais. Contudo, estes diagramas são de difícil interpretação e baseiam-se em modelos BPS criados a partir de muitas suposições e simplificações [33].

Uma forma mais eficaz de representar o consumo energético num edifício poderá ser a representação de consumos energéticos em ambiente BIM através da adoção de uma escala de cores, simplificando o processo de representação e interpretação dos resultados obtidos [167] [210]. Isto pode ser feito através da utilização de parâmetros partilhados entre as ferramentas BIM e as ferramentas de análise energética. A atribuição a cada divisão de um edifício ou ao edifício como um todo, de uma cor representativa do nível de consumo energético, e consequente representação num modelo BIM, torna o processo de interpretação mais intuitivo e ao alcance de qualquer observador.

A grande vantagem de uma plataforma de representação visual de resultados de simulações energéticas, é a simplificação da interpretação dos dados recolhidos para os utilizadores finais que, com uma melhor perceção do comportamento energético de um edifício, poderão adotar comportamentos de consumo mais conscientes [65] [210].

Contudo, este tipo de plataformas implica a criação de modelos com inúmeras fontes de dados, o que poderá tornar o processo complexo e de difícil adaptação, pois um dos obstáculos

encontrados pelos autores passa pelo grande volume de dados que precisam de ser convertidos para poderem ser utilizados [65] [167]. Uma plataforma com menores *inputs* de dados e modelos mais simplificados poderá ser capaz, contudo, de providenciar informação necessária para apoiar o processo de tomada de decisões capazes de tornar um edifício mais eficiente [74] [94].

Num futuro próximo, esperam-se alguns desenvolvimentos nesta frente, uma vez que algumas destas plataformas são baseadas em modelos BPS criados com base em algumas suposições e simplificações [33]. A criação de uma plataforma interativa em ambiente WEB, criada a partir de modelos BIM, que permita ao utilizador consultar informações adicionais sobre as análises energéticas representadas, como o historial de consumo, o certificado energético do edifício e a percentagem de energias renováveis a que este recorre poderá representar o futuro da utilização do BIM para visualização de resultados.

#### 5.4. Construção sustentável

A introdução do conceito de sustentabilidade no setor da construção tem sido explorada mais intensamente em anos recentes. As ferramentas e modelos BIM podem apoiar esta introdução através de constantes simulações que visem compreender o efeito de implementação de medidas, materiais, soluções e conceitos mais sustentáveis no setor da construção.

A presente categoria contempla os seguintes quatro tópicos:

1. Comparação de soluções e materiais: As ferramentas BIM, através dos modelos nelas criadas e suas funções, permitem ao projetista alterar soluções e materiais utilizados de maneira facilitada, com vista à obtenção de uma melhor eficiência energética do edifício modelado, promovendo a sustentabilidade do mesmo;
2. Estimativa de consumos: Este tópico apresenta as investigações que recorrem a modelos BIM para estimar consumos futuros ou atuais em edifícios, com o objetivo geral de implementar soluções que ajudem a reduzir tais consumos, promovendo uma maior performance energética;
3. LCA: Os modelos BIM permitem que se efetuem simulações em várias fases de construção do mesmo, desde a fase de projeto até às fases de demolição. Como tal, este tópico expõe o conhecimento existente sobre o recurso a modelos BIM para análises *Life Cycle Assessment*, que analisam o funcionamento de todo um edifício durante o seu ciclo de vida;
4. NZEB: O conceito *Near (ou Net) Zero Energy Building*, quando corretamente aplicado, torna um edifício quase independente de fontes de energia externas, uma vez que produz a maior parte de toda a energia que consome. Como tal, torna-se relevante estudar o efeito da implementação de sistemas de produtores de energia em edifícios, podendo o mesmo ser feito através de simulações em modelos BIM;

### 5.4.1. Comparação de soluções e materiais

As ferramentas BIM tornam a conceção de um edifício num processo iterativo, onde vários intervenientes podem dar o seu contributo em qualquer fase dessa conceção. A versatilidade associada a estas ferramentas permite aos seus utilizadores alterar diversas características dos seus modelos de uma forma rápida e simples, permitindo-os estudar diversos cenários [49, 52, 53, 112, 142, 196, 198, 227]. Do ponto de vista energético, esta versatilidade permite aos projetistas empregar materiais e soluções que promovam uma maior eficiência energética, ainda em fases iniciais de projeto [79, 100, 230, 231, 237], através de simulações de modelos BEM baseados em modelos BIM, recorrendo às diversas ferramentas identificadas no Capítulo 4 [31, 146, 156, 201].

As investigações que incidem sobre análises de diferentes soluções, concentram-se maioritariamente no estudo dos efeitos da orientação do edifício e da forma da envolvente do mesmo [5, 31, 85, 104, 113, 201], recorrendo a análises energéticas em modelos BIM para determinação das soluções ótimas.

Uma correta orientação de um edifício determina a sua posição relativamente ao sol e, no caso de projetos em fase inicial, pode ser vista como uma medida de baixo custo capaz de reduzir as suas necessidades energéticas, eliminar o recurso a sistemas AVAC para garantir conforto térmico e aumenta a quantidade de iluminação natural [5, 31, 184, 201]. Neste contexto, as ferramentas BIM ajudam a determinar a orientação mais proveitosa para um edifício a construir ou, no caso de um edifício existente, determinar o efeito da sua orientação na performance energética dessa construção.

Aqui, as ferramentas BIM ganham particular importância, tendo em conta que uma correta escolha de materiais e soluções construtivas pode passar a ser a chave para uma boa conceção de edifícios. A possibilidade de simular a adoção de diferentes materiais de maneira iterativa, permite que se consiga escolher o material ótimo para as características energéticas pretendidas para o edifício.

A grande limitação das análises que contemplam alternativas de materiais, é o facto de nem todas as opções existentes na vida real estarem disponíveis para integração em modelos BIM, seja por falta de bibliotecas BIM mais completas, ou até pelos produtores de materiais não disponibilizarem toda a informação técnica necessária para integração em ambiente BIM dos seus produtos. Tendo em conta as normas europeias que decretam a utilização de métodos BIM pelo setor da construção no futuro, estas normas deveriam contemplar a obrigatoriedade, por parte dos produtores de materiais, de disponibilizarem as suas famílias de produtos em formato BIM, possivelmente recorrendo ao IFC, de maneira a aumentarem as opções de materiais disponíveis nas atuais ferramentas BIM.

Uma outra componente investigada centra-se na definição da envolvente do edifício. Esta componente atua como uma fronteira entre o ambiente exterior e interior de um edifício, servindo de barreira ao calor, luz e atmosfera e, como tal, a sua conceção deverá ser cuidada [85, 104, 139]. Esta envolvente determina a área total das fachadas e cobertura que fica exposta ao espaço exterior e, então, é responsável por grande parte das perdas energéticas [5, 165]. Contudo, a sua análise encontra-se limitada pela difícil modelação de formas complexas, características de estilos de arquitetura ousados, e de difícil modelação em ambiente BIM e, consequentemente, de difícil otimização de solução em simulações energéticas de modelos BEM.

Os autores que centram as suas investigações na análise de diferentes materiais e o seu efeito para a performance energética de um edifício com base em modelos BIM, com destaque em análises de formatos e áreas de vãos envidraçados [35, 171, 191], diferentes materiais de isolamento [171, 200], utilização de materiais reciclados [69, 233] e comparação de soluções para a construção de paredes [32]. Todas estas variáveis são já analisadas a partir de modelos BIM, embora não exista uma ferramenta capaz de definir uma solução ideal para uma performance energética ótima, considerando-as como um todo.

A utilização de ferramentas BIM para comparação de soluções e materiais, apesar de ser utilizada há alguns anos, era maioritariamente focada no objetivo de reduzir custos de construção. Contudo, a sua aplicação para análises energéticas ainda é recente e encontra-se limitada por ter de recorrer a análises para materiais que se encontrem nas bibliotecas das ferramentas BIM e suas propriedades. Adicionalmente, a criação de uma ferramenta automatizada, capaz de analisar envolventes mais complexas e definir os melhores materiais a utilizar, criar modelos genéricos automaticamente, tendo em conta a orientação e forma da envolvente do edifício poderá ser benéfica para encontrar uma solução otimizada [114]. Tal poderá ser efetuado, por exemplo, recorrendo a ferramentas de programação visual (Ex.: *Dynamo* e *Grasshopper*), onde podem ser implementados algoritmos que englobem todos os parâmetros variáveis a nível de materiais e soluções.

#### 5.4.2. Estimativa de consumos

Os consumos energéticos associados aos edifícios são altos, tendo em conta que a maioria do edificado é representada por construções com alguma idade e de baixa eficiência energética. Estes altos consumos podem e têm conduzido a indústria da produção energética a valores de sobrecarga [201].

O consumo energético de edifícios depende das condições climáticas, estrutura e características geométricas do edifício, do funcionamento de equipamentos elétricos e AVAC e do comportamento de utilizadores [236, 239]. Tendo em conta a quantidade de informação necessária para tentar estimar o consumo de um edifício, ainda em fase de projeto, este processo

é complexo. Uma possível solução poderá passar pela aplicação de ferramentas BIM para gerir e armazenar toda esta informação e, através de processos automatizados, proceder ao cálculo da estimativa de consumos energéticos de um modelo [51, 212, 221], facilitando o processo de decisão no que toca às soluções mais sustentáveis [179, 235].

Adicionalmente, as ferramentas BIM podem servir de base de criação de modelos para estimativas de custos em *softwares* de simulação de performance energética de edifícios [68], através da integração do modelo BIM nestas ferramentas. A grande vantagem deste método é a facilidade e rapidez de criação de modelos associada às ferramentas BIM que pode acelerar o processo de estimativa de consumos [193].

Apesar das claras vantagens que a utilização de ferramentas BIM poderiam oferecer a processos de estimativa de consumos energéticos em edifícios, a investigação sobre estes processos é ainda considerado simplista, pois incide essencialmente em “prova de conceito” [93], com poucos casos práticos onde se apliquem tais métodos e com falta de informação sobre o efeito do comportamento dos utilizadores no consumo energético [99, 118, 123]. Contudo, o interesse em processo automáticos de estimativa de consumos em edifícios é grande entre os intervenientes no setor, com destaque para o interesse dos proprietários de edifícios numa ferramenta capaz de prever consumos energéticos dos seus edifícios, tendo por base modelos 3D [186].

Adicionalmente, existem trabalhos que investigam o papel de fontes de energia renováveis em edifícios, uma vez que estas poderiam tornar um edifício totalmente independente do consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis, recorrendo a energia solar, através da instalação de painéis fotovoltaicos [135]. Porém, ainda não existem ferramentas BIM capazes de analisar todo o tipo de soluções de energia renováveis e o seu impacto no consumo energético dos edifícios [124, 129].

O futuro da estimativa de consumos a partir de modelos e ferramentas BIM poderá passar pela criação de uma ferramenta de simulação e otimização energética, capaz de operar e apresentar resultados de consumos em tempo real, baseada em modelos BIM [90]. Tal ferramenta teria de ser baseada numa ferramenta de análise energética com alto nível de interoperabilidade com ferramentas BIM [146].

Uma ferramenta de nova geração, capaz de estimar com precisão os consumos energéticos de um edifício, considerando todos as variáveis identificadas, deverá ainda considerar a inclusão de normas do maior número possível de países, uma vez que as atuais não incluem normas portuguesas [155], por exemplo, tornando os seus resultados apenas comparativos ou qualitativos. Adicionalmente, por conterem toda a informação necessária para tal, numa nova ferramenta, os modelos BIM poderiam estimar as cargas térmicas com maior rigor, sendo esta uma das principais lacunas das atuais análises energéticas e estimativas de consumos.

### 5.4.3. LCA

A determinação dos impactos ambientais com recurso à metodologia LCA (*Life cycle assessment*) - Avaliação do ciclo de vida, tradicionalmente aplicada a materiais, produtos e componentes de edifícios, começa agora a ser aplicada para a avaliação da performance de um edifício em todo o seu ciclo de vida [39], tendo em conta que todas as fases do mesmo têm impactos ambientais significativos [197].

Considerando que o setor de construção apresenta níveis elevados de impactos negativos ambientais, é relevante alcançar um elevado nível de integração de processos LCA em ferramentas BIM, de maneira a que se reduzam custos, durações de análises e efeitos negativos ambientais [41].

O potencial para automatizar processos e capacidade de gestão de dados que as ferramentas BIM apresentam, poderá facilitar estas análises, reduzindo o tempo nelas despendido de semanas para alguns minutos [56, 169, 195] e aumentando a fiabilidade e consistência dos processos LCA [121, 204]. Como tal, nos últimos anos, as ferramentas BIM e as suas funções foram gradualmente mais utilizadas para acompanhar todo o ciclo de vida de um edifício [60, 87].

Atualmente, as ferramentas BIM podem ser utilizadas como bibliotecas de dados de apoio a ferramentas LCA [120], pois são capazes de armazenar grandes quantidades de informação relacionada com materiais, as suas propriedades térmicas, densidades, entre outras [82, 190]. Todavia, estes conjuntos de dados, por si sós, não são suficientes para levar a cabo uma análise LCA completa [132, 176].

Então, a falta de dados necessários às análises LCA é vista como uma das barreiras que impedem total integração de processos LCA em ferramentas BIM, assim como a relutância, conservadorismo e fragmentação do setor da construção também é visto como uma barreira para a adoção de novos processos de análises [213], como são os promovidos pela integração de análises LCA em ferramentas BIM [84]. Adicionalmente, a falta de ferramentas automáticas de extração de dados de modelos BIM para utilização em ferramentas LCA provoca atrasos num processo que apresenta uma maior velocidade como grande potencial [181]. Embora se reconheçam certas limitações no processo de comunicação entre ferramentas, a utilização do *software ATHENA Impact Evaluator* (LCA), conjugado com o *Autodesk Revit* (BIM) é o processo de integração a que mais investigadores recorrem [168].

Uma integração total BIM-LCA poderá ser realizada recorrendo a três níveis de integração [203]. Inicialmente, as ferramentas BIM podem ser utilizadas como um meio para quantificar materiais, posteriormente utilizados para calcular o impacto ambiental do projeto em ferramenta LCA [203, 223]. O segundo nível descreve uma integração de dados ambientais LCA nas propriedades dos materiais BIM [80, 203, 226]. Como passo final de integração, um processo de extração

automática e de transferência de dados entre ferramentas BIM e LCA facilitaria todo o processo associado [203].

A integração BIM-LCA revela-se como um caminho a percorrer em direção à redução da energia total usada por um edifício, em todas as suas fases de vida [160-162]. Contudo, a investigação associada à fase final de vida de uma construção, a demolição, é parca e por isso existe uma falta de conhecimento associada ao impacto ambiental de um edifício em fim de vida [40, 180, 225].

Como trabalhos de investigação futuros, deverá ser analisado o papel das ferramentas BIM, com processos LCA, com vista à certificação energética ou ambiental [42], tendo em conta que existem autores que afirmam ser possível recorrer a métodos LCA para garantir a certificação energética ou ambiental de um projeto [102, 140]. Adicionalmente, dotar as bibliotecas BIM de materiais reciclados poderá também beneficiar a metodologia LCA integrada em modelos BIM, uma vez que a inclusão de materiais estruturais reciclados em projetos poderia reduzir as emissões de um edifício em até 50% [69, 77].

#### 5.4.4. NZEB

Os edifícios NZEB (*Near/Net Zero Energy Building*) caracterizam-se por serem edifícios com necessidades energéticas quase nulas. Esta particularidade é possível construindo edifícios altamente eficientes termicamente, ou seja, com baixo coeficiente de transmissão térmica e recorrendo a equipamentos térmicos eficientes, de classe energética A ou superior. Tendo em conta que os maiores gastos energéticos de um edifício são associados aos gastos térmicos, estas soluções permitem um aumento da eficiência energética do mesmo, ao ponto das suas necessidades energéticas serem quase nulas [59]. Aqui, as ferramentas BIM, poderão ajudar os projetistas a criar edifícios NZEB mais facilmente, recorrendo a simulações de diferentes materiais e equipamentos e procedendo a análises energéticas dos modelos BIM, com vista à redução dos consumos dos mesmos.

Este novo paradigma associado a edifícios poderá apresentar-se então como uma solução para um futuro sustentável no setor da construção e o seu âmbito de aplicação engloba tanto edifícios em fase de projeto, como edifícios existentes. A adoção de ferramentas BIM pode conduzir à realização de projetos mais sustentáveis ecologicamente, através da melhoria de performance energética de edifícios [38].

As análises energéticas efetuadas em *softwares* e modelos BIM poderão facilitar o processo de determinação de necessidades energéticas de um edifício. Como tal, e de maneira a tornar um edifício existente em NZEB, poderá aferir-se as soluções necessárias para tornar o consumo energético quase nulo [68, 159, 205]. Em fases iniciais de projeto, estas análises poderão ajudar os projetistas a determinar desde cedo quais os materiais e equipamentos que permitam reduzir os consumos energéticos ao máximo [134, 145]. Porém, para tal ser possível, os produtores de

todos os equipamentos que se pretendam integrar no edifício, terão de disponibilizar as famílias de objetos em formato BIM, contendo já todos os dados técnicos necessários para que se proceda à realização de análises energéticas precisas.

No entanto, e apesar das vantagens reconhecidas na adoção do paradigma NZEB na construção, existem barreiras que tornam a sua implementação num processo complexo. A incerteza que rodeia os custos inerentes à construção de edifícios NZEB apresenta-se como o maior obstáculo a ultrapassar, tendo em conta que é difícil estimar o investimento necessário para tais projetos. No entanto, recorrendo a ferramentas e modelos BIM, torna-se possível quantificar todos os materiais e equipamentos necessários para um edifício NZEB, desde que corretamente modelado. Assim, é possível proceder a uma estimativa de custos, depois de associado o valor unitário de cada material e equipamento a essa quantificação. Através deste processo, Hu [119] concluiu que no caso de edifícios residenciais, um projeto NZEB não representa custos maiores quando comparado com métodos de construção convencionais.

Num futuro próximo, o paradigma NZEB pode significar uma redução significativa de emissões e necessidades energéticas de edifícios. Para uma ampla adoção deste paradigma, existe a necessidade de criar processos normalizados e legislação que promova a construção deste género de edifícios [130]. O papel das ferramentas BIM neste âmbito é claro, pois acelera e facilita o processo de determinação de soluções e materiais ótimos, que permitam encontrar o valor mínimo de consumo energético que um edifício necessita, mantendo todas as condições necessárias para uma confortável utilização.

## 5.5. Projeto higrotérmico de edifícios

A fase de utilização de um edifício é aquela que mais se prolonga no tempo e, como tal, a ela tem de estar associado um nível de conforto apropriado para os seus utilizadores. Um edifício habitacional, quando bem projetado e pensado, pode garantir este nível de conforto sem recorrer a equipamentos térmicos. Contudo, as medidas que influenciam este conforto poderão ter algum impacto na eficiência energética de edifícios, especialmente quando não se consegue garantir um adequado conforto térmico com recurso apenas a ventilação natural, sendo por isso necessário recorrer a sistemas AVAC para cumprir esse objetivo.

Como tal, esta categoria debruça-se sobre a utilização de modelos e ferramentas BIM para simular e analisar as condições termohigrotérmicas dos edifícios na fase de projeto e certificação, através dos seguintes três tópicos:

1. Certificação energética: Este tópico reúne as informações existentes sobre a utilização de modelos BIM para automatização de processos de certificação energética em edifícios com vista à emissão de certificados energéticos;

2. Conforto térmico: Este tópico centra-se nas investigações que recorrem a modelos BIM para simular condições de conforto térmico interior, de maneira a conseguir prever as condições reais de conforto interior num edifício em fase de utilização.
3. Reabilitação de edifícios: Os edifícios existentes representam uma oportunidade de melhorar a performance energética geral do setor da construção. A modelação de edifícios existentes em ambiente BIM permitem explorar diferentes soluções para o aumento da eficiência energética do edificado. Como tal, neste tópico, é abordada a situação atual da utilização de ferramentas BIM para projetos de reabilitação de edifícios.

### 5.5.1. Certificação energética

A certificação energética de um edifício é um instrumento de avaliação da sua eficiência energética. Em Portugal, a emissão de um certificado energético é obrigatória em imóveis que sejam colocados no mercado para venda e arrendamento, com coimas previstas para quem não apresente tal documento no processo de venda.

Embora os critérios variem conforme o sistema de classificação utilizado em cada país, a maioria incide sobre as soluções construtivas, equipamentos AVAC, equipamentos de produção de águas quentes sanitárias e equipamentos de produção de energia renovável, com o resultado final a ser representado por um nível global de eficiência energética.

Tendo em conta que os critérios de avaliação dependem da informação associada aos elementos avaliados, e sendo as ferramentas BIM uma plataforma de armazenamento de dados multidisciplinares [50], importa perceber se estas apresentam alguma influência, quando aplicadas ao processo de certificação energética.

Através de simulações energéticas em modelos BIM, poderá ser possível avaliar critérios de certificação energética [157, 222], sendo possível assim acelerar o processo de estimativa de consumos e necessidades energéticas, tornando o processo de certificação mais rápido e possivelmente mais barato [7, 44, 182]. Adicionalmente, a existência de milhares de modelos BIM de edifícios com certificados energéticos emitidos, poderá permitir, através de técnicas *big data*, melhorar o próprio processo de certificação [177, 211].

Existem investigações que incidem sobre certos sistemas de avaliação energética, como o LEED (América do Norte), *Green Star* (Nova Zelândia), *ÖGNI* (Áustria), *Green Mark* (Singapura) e *BEAM-Plus* (Hong Kong). Embora seja reconhecido ser possível integrar sistemas de classificação em BIM [81], ainda não é possível efetuar todo o processo de certificação energética em ambiente BIM. As limitações identificadas variam entre sistemas, com as ferramentas BIM a possibilitarem apenas o cálculo automático de alguns parâmetros [67, 143, 224] e por não haver informações em BIM sobre as emissões de CO<sub>2</sub> dos materiais utilizados [183].

Contudo, poder-se-á, num futuro próximo, automatizar um processo que, através da avaliação do modelo criado, permita aferir com alguma precisão a pontuação necessária para obter certificação energética LEED [125]. Adicionalmente, a integração de uma metodologia em BIM que calcule as mais valias energéticas associadas ao sistema ÖGNI, para obtenção de certificação energética na Áustria [133], apresenta-se como um possível avanço futuro para este sistema.

Um processo de certificação energético automatizado, baseado em modelos BIM, parece estar longe da realidade. O facto de existirem inúmeros sistemas de classificação energética torna difícil a integração de funções capazes de avaliar todos os critérios a eles associados [150], pois cada sistema concentra-se nas necessidades específicas do país onde é implementado [116]. Então, uma investigação que incida sobre os pontos comuns de todos os diferentes sistemas existentes poderá apresentar-se como um ponto de partida para uma homogeneização de sistemas e critérios, o que levará a uma mais fácil integração de processo de certificação energética em BIM.

### 5.5.2. Conforto térmico

O conforto térmico representa a sensação de satisfação térmica de um indivíduo, num determinado espaço. Esta satisfação resulta da análise de seis diferentes parâmetros [73]. Dois deles dependem diretamente do próprio indivíduo e referem-se à atividade metabólica e à resistência térmica da roupa utilizada, podendo ser considerados parâmetros subjetivos. No entanto, os restantes quatro parâmetros podem ser inteiramente objetivos e referem-se à temperatura do ar, à temperatura da radiação, à humidade e à velocidade do ar.

Através da utilização de ferramentas BIM, onde pode ser estimada a radiação solar [63], torna-se possível exportar o modelo criado para ferramentas de simulação energética, possibilitando a estimativa da temperatura do ar e respetiva humidade em diversas condições [88]. Estas simulações energéticas, baseadas em BIM, para avaliação das condições interiores têm sido cada vez mais utilizadas [107], permitindo otimizar o processo de determinação do nível de conforto térmico de edifícios [112].

Para análise da velocidade do ar, o modelo BIM pode ser exportado para *softwares* de cálculo de dinâmica de fluidos (CFD), quando é utilizada ventilação natural para obter conforto térmico. Os *softwares* CFD e as suas análises, quando aplicadas a modelos BIM, além de permitirem estudar a evolução da distribuição de temperatura do ar [159], viabiliza ainda a análise do fluxo de ar no interior de um edifício [196, 220]. Estas análises proporcionam informações relevantes, promovendo uma maior otimização do processo de determinação do nível de conforto térmico em edifícios, com base em modelos BIM, permitindo estimar os dois índices de conforto térmico ao longo de um ano, nomeadamente o *Predicted Mean Vote* (PMV) e o *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD).

### 5.5.3. Reabilitação de edifícios

A procura por soluções mais eficientes energeticamente no setor AECO é relativamente recente, tendo em conta as pressões a que este setor está sujeito para reduzir os impactos ambientais negativos que representa. Assim, os edifícios existentes, construídos com limitada consideração pelo seu impacto ambiental, representam uma oportunidade de redução deste impacto através de processos de reabilitação e modernização dos mesmos.

O processo de melhoria da eficiência energética de um edifício existente é mais complexo do que de um edifício que se encontre em fase de conceção, tendo em conta que a maioria das suas variáveis são fixas [58]. Entre estas variáveis, encontra-se a geometria do mesmo, que raramente pode ser alterada de maneira a aumentar a sua performance energética. Adicionalmente, é impossível conhecer com toda a precisão necessária as propriedades térmicas de elementos estruturais e não estruturais, como lajes e paredes, o que dificulta a sua caracterização em modelos BIM, de maneira a se obterem análises energéticas fidedignas.

Então, a modernização dos equipamentos, alteração de materiais empregues aquando das suas construções e aumento da dependência de energias renováveis apresentam-se como as soluções mais práticas, com o objetivo de alcançar maior eficiência e performance energética [127, 138, 204].

Neste panorama, as ferramentas BIM têm sido cada vez mais adotadas para avaliar o desempenho energético de edifícios existentes [188]. Estas surgem como uma plataforma onde se pode prever o efeito de medidas orientadas para um aumento de eficiência energética de edifícios existentes, permitindo comparar a performance num cenário antes/depois, recorrendo a simulações energéticas do estado atual do edifício versus as soluções propostas [107]. Adicionalmente, o recurso a ferramentas BIM permite a associação ao modelo 3D de informação relativa ao histórico de manutenção e condição atual do edifício, tornando mais simples a identificação de soluções de reabilitação a aplicar [98].

Scherer *et al* [192] teorizaram o processo de aplicação de ferramentas BIM em projetos de reabilitação de edifícios como sendo necessariamente precedido por duas fases distintas. Em primeira instância, procede-se à aquisição e recolha de dados e factos relevantes sobre o edifício em análise. A segunda fase contempla o processo de diagnóstico, através da análise e interpretação dos dados recolhidos, de maneira a preparar o processo de reabilitação e modelação do edifício no seu estado atual.

Porém, a implementação de metodologias BIM em processos de reabilitação ainda apresenta algumas barreiras. O maior desafio, identificado por diversos autores, prende-se à dificuldade existente em obter a geometria e propriedades físicas dos elementos construtivos dos edifícios existentes, de maneira a criar modelos fidedignos e precisos [187, 216].

A adoção geral de ferramentas BIM em projetos de reabilitação apresenta grandes vantagens, permitindo estudar soluções alternativas às existentes num processo não intrusivo, não representando qualquer incómodo para os utilizadores dos edifícios. Contudo, para uma implementação geral de BIM em reabilitação, o problema associado à obtenção das propriedades físicas, térmicas e geométricas do edifício teria de ser totalmente resolvido. No que toca à geometria do edifício, esta é passível de ser obtida através dos métodos expostos na Subsecção 5.2.2. Por outro lado, as propriedades térmicas associadas aos elementos estruturais e não estruturais dos edifícios continuam a ser um desafio no que toca à caracterização e calibração de características de edifícios existentes em modelos BIM, tendo em conta que se necessitam de métodos não intrusivos para o levantamento das particularidades necessárias para uma análise energética a partir de um modelo BIM.

Uma possível solução poderá ser a resolução dos problemas associados à junção de informação termográfica com nuvens de pontos geométricos, uma vez que se trata de um processo não intrusivo, capaz de analisar a evolução da temperatura em todos os elementos de um edifício, permitindo caracterizar alguma propriedades térmicas destes elementos, conforme exposto na Secção 5.2.2. Um processo deste género, quando totalmente operacional, e aplicado ao longo de um período de tempo, poderá facilitar a criação de modelos BIM mais precisos, fidedignos e bem caracterizados de edifícios existentes, aumentando a precisão de análises energéticas neles levadas a cabo.

## 5.6. Ensino

A adoção de ferramentas BIM para um aumento da performance e eficiência energética em edifícios, depende dos processos habituais de análise levadas a cabo pelos responsáveis pelos diferentes projetos associados à construção. Como tal, a fase de aprendizagem mostra-se como sendo a mais capaz de influenciar os processos utilizados pelos futuros profissionais e, ao introduzir estas novas tecnologias associadas ao BIM em fase de ensino, poder-se-á promover uma maior adoção de ferramentas e modelos BIM na prática profissional.

Esta categoria contempla apenas um tópico, relativo ao Ensino e/ou qualidade do ensino, que reúne as informações sobre a utilização de ferramentas BIM nas instituições de ensino, de modo geral, e de que maneira a implementação de tais ferramentas poderá influenciar a prática futura dos profissionais do setor AECO.

A constante evolução da técnica e dos conhecimentos associados a diversos campos científicos representa um desafio para as instituições de ensino. Como tal, os educadores vêem-se na necessidade de redefinir programas curriculares, de maneira a incluir os conhecimentos mais recentes [106].

No caso específico dos campos científicos do BIM e da eficiência energética, apesar da inclusão da modelação nos currículos atuais, a conceção de sistemas AVAC não é lecionada, por serem

habitualmente projetados por engenheiros mecânicos, o que resulta numa baixa implementação de ferramentas BIM para cálculos energéticos nos cursos de Engenharia Civil. Contudo, a implementação de análises energéticas através de simulações, permitirá a futuros engenheiros resolver problemas através do uso de modelos BIM [34]. Neste âmbito, pode-se destacar o projeto europeu *BIMcert*, que procurou encontrar soluções para estas limitações [154].

O nível de conhecimento nos campos científicos do BIM e da eficiência energética é amplo e, como tal, a sua adaptação à sala de aula pode ser difícil, tendo em conta que o mesmo ainda se encontra em evolução. Uma maior aproximação e colaboração entre instituições de ensino pode mitigar este problema [78], promovendo uma normalização de processos e matérias [64, 163] a partir de, por exemplo, revisões sistemáticas de literatura [175], contribuindo para uma maior qualidade de ensino nas escolas de Engenharia.

O BIM nas salas de aula poderá ser a solução para a relutância na adoção desta tecnologia pelo setor de construção atualmente. Se os futuros profissionais de engenharia e arquitetura forem formados para dominarem as ferramentas BIM, as suas funções e capacidades, poderão contribuir para a sua aplicação na construção, após a transição para o mundo do trabalho. Adicionalmente, o conhecimento adquirido na sala de aula sobre o BIM poderá levar a que todas as barreiras atuais associadas às ferramentas BIM sejam mais facilmente ultrapassadas, tendo em conta que se aumentaria a quantidade de profissionais com conhecimento e capacidades suficientes para desenvolverem soluções práticas, fidedignas e implementáveis.

## 5.7. Considerações finais

O presente capítulo consistiu na elaboração de uma revisão sistemática da literatura recolhida e considerada como sendo relevante, de maneira a determinar o estado atual da utilização de ferramentas BIM para a avaliação energética de edifícios. Para tal, identificaram-se os tópicos principais de informação contida na biblioteca, aglomerando-os depois em categorias principais. Este processo resultou na identificação de catorze tópicos, divididos em cinco categorias principais de informação:

1. Tecnologias BIM: Esta categoria incidiu na informação recolhida a partir de fontes que investigavam o uso das tecnologias BIM para a avaliação energética de edifícios. Identificaram-se os seguintes quatro tópicos associados a esta categoria:
  - a. Interoperabilidade: Este tópico corresponde à investigação sobre o nível de integração e interoperabilidade entre ferramentas de modelação BIM, e ferramentas de análise energética. Verificou-se que, apesar de já ser possível exportar modelos BIM de ferramentas de modelação para ferramentas de análise energética, continua a ser um processo pouco fiável, tendo em conta que a transferência de dados entre ferramentas pode levar à perda de dados, por falta de um elevado nível de interoperabilidade. Como tal, para resolução dos problemas atuais, sugere-se o recurso a plataformas *openBIM*,

com normalização de dados através de padrões como o IFC. Este padrão, através de modelos tipo como o MVD poderá ser a chave para aumentar a fiabilidade do processo de transferência de dados entre ferramentas BIM e de análise energética, resolvendo as barreiras de interoperabilidade atuais;

- b. Junção de nuvens de pontos de *laser scanner* com termografia: Este tópico incidiu nos processos atuais de recolha de informação geométrica e termográfica para calibração e criação de modelos BIM de edifícios existentes. Os processos atuais para recolha desta informação recorrem a sistemas híbridos, compostos por lasers responsáveis pela criação de nuvens de pontos geométricos e por câmara infravermelhas, capazes de criar nuvens de pontos com informação térmica que, quando associados aos seus correspondentes geométricos, permitem obter informações importantes para compreender o comportamento térmico de edifícios existentes. Contudo, as nuvens de pontos resultantes, são de difícil processamento pelas ferramentas, tendo em conta o seu tamanho. De maneira a resolver esta contrapartida, algumas investigações sugerem aumentar a distância entre pontos recolhidos, reduzindo o número absoluto de pontos recolhidos e conseqüentemente, o tamanho das nuvens. Embora seja já possível utilizar ferramentas que permitam a recolha simultânea dos dois tipos de informação geométrica, como o *laser Leica-Geosystems BLK360*, é ainda necessário tornar as ferramentas BIM capazes de lidar e processar as variações de temperatura diárias a que os edifícios estão sujeitos, uma vez que isso significa haver diferente informação térmica associada a um mesmo ponto geométrico;
- c. Análises ao nível urbano BIM / SIG: Este tópico incidiu sobre a utilização de ferramentas e modelos BIM para análises a uma escala urbana. Por considerar fatores como o efeito da interação entre edifícios, a utilização de redes energéticas públicas e o efeito de sombras, uma análise desta escala torna-se imensamente mais complexa quando comparada com a análise energética de um edifício. Embora sejam utilizadas ferramentas SIG 3D como o *CityGML* para criação de modelos urbanos, estas ainda não são capazes de proceder à realização de análises energéticas. Como tal, a integração da tecnologia SIG 3D em ferramentas BIM poderá representar a solução para este problema, uma vez que os modelos BIM são capazes de conter grande quantidade de informação, ao mesmo tempo que permitem a conversão dos mesmos em modelos BEM, preparados para que se efetuem análises energéticas. Contudo, a quantidade de informação necessária poderá requerer o uso de novas tecnologias, como o *cloud computing*, ou a criação de novas ferramentas BIM e/ou BEM, capazes de processar modelos de grande escala;
- d. Monitorização de edifícios: Este tópico incidiu nas investigações levadas a cabo sobre o uso de ferramentas BIM como base para a monitorização em tempo real de edifícios. Um modelo BIM capaz de recolher e processar informação em tempo real proveniente

de sensores pode significar um aumento de eficiência no processo de diagnóstico de problemas de funcionamento de um edifício, que possam implicar uma menor performance energética. Embora as ferramentas BIM atuais não sejam ainda capazes de integrar informações recolhidas automaticamente por sensores, a integração deste tipo de informações em modelos BIM, incluindo sensores IoT, poderá ser feita através da introdução de uma nova dimensão de informação no modelo BIM que represente todos os dados de sensores, devendo as ferramentas futuras contemplar uma solução deste tipo;

2. Desenvolvimento de aplicações apoiadas no modelo BIM: A presente categoria reuniu os tópicos que recorreram a modelos BIM e ferramentas associadas como base para a criação de novas funções, através de plugins, ou até criação de novas ferramentas, com novas funcionalidades, capazes de aumentar o potencial do modelo BIM na avaliação energética de edifícios:

a. Desenvolvimento de *softwares / plugins*: Tendo em conta que os modelos BIM são personalizáveis, o uso destes como bases de dados em ferramentas de programação como o *Dynamo*, *Grasshopper* ou *MATLAB*, poderão permitir criar algoritmos que tornem as soluções implementadas no modelo mais eficientes energeticamente. Adicionalmente, e tendo em conta que ainda não é totalmente possível modelar o funcionamento de sistemas AVAC em ambiente BIM, torna-se necessário implementar esta função em ambiente BIM, uma vez que o funcionamento destes sistemas é programado e, como tal, pode ser digitalizado e incluído em análises energéticas baseadas em BIM. Existem ainda alguma margem para desenvolvimento e aumento de capacidades das ferramentas BIM atuais. A integração de tecnologias *cloud* poderá ser benéfica para a análise energética baseada em BIM, uma vez que permite o armazenamento de grandes quantidades de dados para tal necessários. Adicionalmente, a criação de ferramentas capazes de integrar tecnologias de realidade virtual e impressão 3D, poderá ajudar os projetistas a encontrar as soluções mais eficientes para o edifício modelado, uma vez que permitem visualizar o modelo de um modo inovador, facilitando a identificação de problemas práticos que as representações atuais não conseguem mostrar;

b. Plataformas de visualização de resultados: As análises energéticas fornecem, habitualmente, resultados que podem ser de interpretação complexa para o utilizador. Como tal, a utilização de ferramentas BIM e dos seus modelos como plataformas capazes de representar os resultados destas análises de forma mais simplificada, pode representar um avanço nas funcionalidades BIM. Tal pode ser alcançado representando os parâmetros energéticos, como consumos, através de uma escala de cores, permitindo ao utilizador compreender e adotar as medidas necessárias para manter a eficiência energética do edifício. Contudo, a grande barreira associada a este

tópico centra-se no volume de dados necessários e na incapacidade nativa das ferramentas BIM de representarem estes resultados, devendo as novas ferramentas integrarem a capacidade de introdução de todos os dados e estilos de representação necessários;

3. Construção sustentável: Esta categoria explora o usos de ferramentas BIM para aumentar a sustentabilidade do setor de construção, promovendo novas soluções, materiais, medidas e conceitos capazes de aumentar a eficiência energética dos edifícios e do setor AECO, como um todo. Esta categoria contemplou os seguintes tópicos:
  - a. Comparação de materiais e soluções: A partir das capacidades e versatilidade das ferramentas BIM, os projetistas podem estudar o uso de diferentes materiais e aplicação de diferentes soluções para escolher aquelas que se mostrem como mais eficientes e/ou ótimas. As investigações representadas pelo presente tópico exploram, na maior parte dos casos, o efeito da orientação do edifício e da aplicação de diferentes materiais na performance energética de um edifício. Contudo, a principal adversidade apresentada pelos diversos investigadores é a limitação das atuais bibliotecas de materiais existentes em ferramentas BIM, impedindo a exploração de todas as opções disponíveis na prática. Como tal, em consonância com as normas europeias que pretendem a implementação do BIM em grande parte do setor de construção, deverá ser contemplada a obrigatoriedade dos produtores dos materiais de disponibilizarem as suas famílias de produtos em formato IFC, ou outro formato *openBIM*, permitindo que os projetistas tenham acesso a todo o universo de materiais existentes;
  - b. Estimativa de consumos: Tendo em conta a complexidade e morosidade associada à estimativa e/ou previsão de consumos de um edifício em fase de projeto ou existente, a implementação de ferramentas BIM, através de armazenamento de informação em tempo real ou registos históricos, e recorrendo a processos automáticos, poderá facilitar e acelerar este processo, facilitando a tomada de decisões, no que toca à redução destes consumos. Contudo, a investigação sobre este tópico é recente, pois incide essencialmente em “prova de conceito”, sem aplicações práticas. O interesse para uma ferramenta BIM que seja capaz de prever ou representar o consumo energético de edifícios em tempo real é alto. Como tal, no futuro, deverão ser criadas novas ferramentas, capazes de estimar, além dos consumos, as cargas térmicas com maior rigor, permitindo reduzir os gastos energéticos atualmente associados aos edifícios;
  - c. LCA: Este tópico incidiu na utilização de ferramentas BIM em análises de Avaliação de Ciclo de Vida, por representarem o potencial de acelerar o tempo despendido a efetuar análises deste género, aumentando a fiabilidade das mesmas. A capacidade de armazenamento de dados associada aos modelos BIM poderá representar a grande vantagem da sua utilização, uma vez que as análises LCA necessitam de uma grande

diversidade de dados. Contudo, atualmente, as bibliotecas BIM não contemplam todas as propriedades necessárias para realizar análises LCA em ambiente BIM. Então, a determinação e consequente integração em bibliotecas BIM de todas as propriedades necessárias, deverá possibilitar realizar análises LCA em modelos BIM. Adicionalmente, e tendo em conta ser possível proceder à certificação energética e/ou ambiental de edifícios através de análises LCA, deverá ser investigada a adição desta nuance nas ferramentas BIM futuras;

- d. NZEB: Este tópico explora o papel das ferramentas BIM na projeção de edifícios com necessidades energéticas quase nulas. A partir de modelos BIM é possível determinar as necessidades energéticas de um edifício, permitindo que se tomem as decisões e adotem as soluções necessárias para reduzir essas necessidades, através de simulações energéticas de um mesmo modelo, com soluções que permitam reduzir os seus consumos energéticos. Tendo em conta que algumas das necessidades energéticas dos edifícios estão associadas aos equipamentos nele integrados, estes deverão ser modelados, sendo necessário que os seus produtores disponibilizem as famílias de produtos em formato BIM, com todas as informações técnicas necessárias à determinação dos seus gastos energéticos, de maneira a aumentar a fiabilidade de modelação de edifícios NZEB em BIM;
4. Projeto higrotérmico de edifícios: Esta categoria reuniu as informações existentes na biblioteca sobre o recurso a ferramentas BIM para avaliação dos diferentes parâmetros que influenciam o conforto de um edifício, sendo este um fator decisivo no projeto de edifícios, uma vez que está associado à sua fase de utilização, aquela que mais se estende no seu tempo de vida útil. Como tal, a presente categoria contemplou os seguintes tópicos:
- a. Certificação energética: Utilizando as ferramentas BIM como plataformas de armazenamento de dados multidisciplinares, torna-se possível aplicar os critérios dos sistemas de certificação energética. Este processo apresenta potencial para automatizar e acelerar os processos de certificação energética. Embora seja já reconhecida a capacidade de integrar processos de certificação energética em ferramentas BIM, não é ainda possível obter um certificado energético a partir de um único modelo, uma vez que existem inúmeros sistemas de classificação energética, com critérios dissemelhantes, tornando difícil a integração de uma função de certificação energética BIM universal. Uma homogeneização dos processos de certificação energética apresenta-se como um primeiro passo para tornar possível criar um processo automatizado de certificação energético a partir de um modelo BIM;
  - b. Conforto térmico: Este tópico explorou a utilização de ferramentas BIM na determinação e avaliação do nível de conforto interior. A partir de modelos e ferramentas BIM, torna-se possível estimar o nível de radiação solar e, após exportação do mesmo para ferramentas de simulação energética, torna-se possível estimar a

temperatura do ar e respetiva humidade. O último dos quatro parâmetros avaliados na determinação do nível de conforto térmico é a velocidade do ar interior. Torna-se possível avaliar este parâmetro através da exportação de modelos BIM para ferramentas de cálculo de dinâmica de fluidos (CFD), pois estas permitem avaliar o fluxo de ar no interior e a sua velocidade. Torna-se então possível, a partir de modelos BIM, avaliar todos os parâmetros necessários para estimar os índices de conforto térmico PMV e PPD;

- c. Reabilitação de edifícios: O edificado existente é constituído, na sua maioria, por edifícios antigos e de baixa performance energética. A criação de modelos BIM de edifícios existentes implica a obtenção de todas as suas propriedades geométricas, térmicas e físicas de maneira não intrusiva. As propriedades geométricas podem ser obtidas através de métodos explorados na Subsecção 5.2.2. Contudo, a obtenção das restantes propriedades necessárias às análises energéticas de edifícios existentes é ainda um desafio, podendo uma solução ser a associação da informação e evolução termográfica aos levantamentos geométricos, conforme o disposto na Subsecção 5.2.2.
5. Ensino: Esta categoria explorou o efeito da introdução de metodologias BIM nos planos de cursos de instituições de ensino de Engenharia e Arquitetura, uma vez que o ensino representa o primeiro passo para tornar os processos associados ao BIM como padrão no setor AECO. A presente categoria contemplou o seguinte tópico:
- a. Ensino / Qualidade do ensino: Este tópico incidiu nas informações relativas ao uso de tecnologias BIM para a educação em eficiência energética nas salas de aulas de instituições de ensino de Engenharia e Arquitetura. Embora a introdução desta vertente nos planos curriculares de cursos de Engenharia e Arquitetura seja difícil, por representar um campo de conhecimento muito amplo, pode representar grandes vantagens, uma vez que os alunos, enquanto futuros profissionais do setor AECO, utilizarão o BIM como ferramenta padrão para criar soluções eficientes energeticamente, no seu quotidiano profissional. Isto poderá facilitar a resolução das barreiras atualmente existentes e promovendo a elaboração de projetos através de técnicas e processos modernos, contribuindo para o aumento da sustentabilidade do setor.

A revisão sistemática de literatura apresentada no presente capítulo permitiu perceber o panorama atual no que toca à utilização de ferramentas BIM na avaliação energética de edifícios. Todas as categorias e tópicos aqui apresentados representam o panorama atual, com as suas possibilidades e limitações, e possíveis soluções para as ultrapassar, com vista à adoção geral de ferramentas BIM para avaliação energética em edifícios. Os modelos BIM são capazes de albergar toda a informação necessária para proceder a análises energéticas fiáveis, capazes de ajudar os projetistas a adotar as soluções mais vantajosas, do ponto de vista energético.

Contudo, existem ainda barreiras para que estas análises sejam as mais fidedignas possíveis, impedindo que se eleve o seu nível para um patamar o mais perto do comportamento real dos edifícios modelados. As vantagens da utilização do BIM para a avaliação energética de edifícios são notórias, mas dependem da evolução imediata do universo BIM, no que toca à introdução de novas capacidades e funções nas ferramentas atualmente existentes, com especial atenção à interoperabilidade e compatibilidade com formatos BIM padronizados.

# 6

## Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

### 6.1. Considerações gerais

O presente estudo tentou compreender de que maneira e até que nível as ferramentas e metodologias BIM estão a ser empregues para a avaliação da eficiência energética no setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações (AECO).

Tentou-se explorar as possibilidades que esta nova tecnologia põe ao dispor do setor para avaliar a eficiência energética do mesmo, e como pode ajudar a resolver os desafios futuros que o setor global da construção terá de enfrentar.

Para tal, efetuou-se uma pesquisa ampla e metódica de literatura que incide sobre os temas BIM e eficiência energética. A biblioteca criada a partir dos métodos de inclusão e exclusão aplicados a esta pesquisa, contemplou um grande número de referências relevantes para a elaboração da presente dissertação. Como tal, procedeu-se a dois tipos de análise desta literatura.

Começou-se por efetuar um levantamento dos dados bibliométricos associados à literatura estudada, permitindo assim proceder a uma análise cienciométrica com o objetivo de conhecer

o estado atual da investigação científica nos temas do BIM e eficiência energética, de um ponto de vista quantitativo.

Em segunda instância, procedeu-se à elaboração de uma revisão sistemática de literatura. Esta análise teve como objetivo conhecer o estado da arte do uso de ferramentas BIM para a avaliação da eficiência energética no setor da construção, identificar as possibilidades atuais e os desafios futuros.

## 6.2. Conclusões

A análise cientiométrica efetuada serve de base para concluir que o conhecimento nos campos da eficiência energética e do BIM ainda não pode ser considerado como consolidado. A evolução do número de publicações anual tem demonstrado um crescente gradual, não sendo possível identificar um pico neste crescimento. Como tal, e a se manter esta tendência de crescimento de publicações nestes campos científicos, também o conhecimento vai tender a tornar-se mais amplo.

O crescente interesse sobre os temas aqui em estudo é notório através de vários indicadores bibliométricos analisados. Pode-se considerar o indicador mais claro desta crescente popularidade como sendo a evolução do número de citações anual das referências analisadas. A análise dos dados bibliométricos associados à evolução anual do número de citações de todas as referências analisadas, demonstra que o interesse em torno dos temas aqui em estudo é recente e encontra-se num ritmo crescente, sem qualquer diminuição desse crescimento desde 2009.

A maior parte das referências analisadas são artigos de revista de carácter científico, o que poderá indicar um alto nível de fiabilidade e de inovação de informação nelas contida, uma vez que estas foram sujeitas a um processo de revisão de pares, previamente à sua publicação. Destas, destaca-se a revista "*Automation in Construction*", com um total de 27 referências presentes na biblioteca.

A análise de coocorrência de palavras-chave revelou que os termos chave mais utilizados na biblioteca foram, como seria expectável, "BIM" e "*Energy*", o que permite concluir que a informação analisada é pertinente para os temas em análise na presente dissertação. A tendência de utilização destes termos mostrou que os picos de ocorrência das 20 palavras-chave principais ocorreram entre os anos 2017 e 2019, o que vai ao encontro das conclusões associadas à evolução do número de publicações.

Verifica-se ainda que a maioria da literatura analisada foi publicada a partir de países que podem ser considerados como desenvolvidos, no que toca ao setor AECO, como os Estados Unidos da América, China e Reino Unido. O desenvolvimento líder dos setores da construção dos países mais desenvolvidos tem melhor capacidade para identificar os desafios futuros que terão de

enfrentar para se tornarem energeticamente mais eficientes e condições para investigar possíveis soluções, o que vem justificar a popularidade destes temas em tais países. Identificaram-se dois fatores principais que parecem potenciar a colaboração internacional entre países, o fator geográfico e o fator idiomático.

Apesar do elevado número de referências analisadas, não foi possível identificar nenhum autor com maior destaque em relação aos restantes, o que revela um interesse amplo, por parte de inúmeros autores, sobre os temas de BIM e eficiência energética. Apesar desta amplitude, identificou-se uma falta de colaboração internacional entre autores, levando a concluir que o conhecimento poderá ser aprofundado com maior partilha de conhecimentos entre autores.

No campo dos *softwares* utilizados pelos investigadores, identificou-se o *Revit* como sendo a ferramenta de modelação mais utilizada, enquanto o *EnergyPlus*, *Ecotect* e *Green Building Studio* destacam-se no campo da análise energética. Salienta-se ainda que os *softwares* desenvolvidos pela mesma empresa apresentam um nível mais elevado de relação, como é o caso das ferramentas da *Autodesk*.

Através da identificação do público-alvo, observou-se que a maioria da informação recolhida é dirigida a Engenheiros e Arquitetos. Isto poderá indicar que a informação recolhida, no seu geral, é de natureza técnica, uma vez que se dirige maioritariamente a técnicos responsáveis pelos projetos dos edifícios.

Na revisão sistemática da literatura identificaram-se os tópicos mais relevantes e categorias principais de informação associada à utilização de ferramentas BIM em processos de avaliação energética de edifícios. Foram identificadas as potencialidades e limitações atuais da adoção das ferramentas BIM como plataformas de determinação de performance energética em edifícios.

Os 14 tópicos identificados foram agrupados em 5 categorias principais, de acordo com a informação contida nas referências analisadas.

Na categoria correspondente às Tecnologias BIM, concluiu-se que, a nível de interoperabilidade entre ferramentas, embora seja possível exportar modelos BIM para ferramentas de análise energética, o processo atual ainda é pouco fiável, pela baixa interoperabilidade existente entre estas ferramentas. Em relação à obtenção de geometria e propriedades térmicas de edifícios existentes, para efeitos de modelação, este é feito atualmente através de sistemas híbridos compostos por *lasers scanners* e câmaras infravermelhas. Já a criação de modelos a escala urbana, embora possível, implica análises muito complexas, tendo em conta a quantidade de dados necessários. No que toca à monitorização de edifícios, as ferramentas BIM não são ainda capazes de recolher e processar todo o tipo de informação disponibilizada por sensores, de maneira a criar plataformas de monitorização em tempo real, baseadas em modelos BIM.

Em relação ao uso de ferramentas BIM para apoio ao desenvolvimento de aplicações, é possível criar algoritmos, a partir de ferramentas de programação visual, capazes de determinar

automaticamente soluções mais eficientes (ou ótimas, segundo critérios definidos), recorrendo à informação dos modelos das bibliotecas BIM existentes. Adicionalmente, é possível utilizar modelos BIM como plataformas de visualização de resultados de análises energéticas, permitindo uma interpretação mais simples das informações que estas produzem. Contudo, quando se tratam de modelos BIM mais complexos, a quantidade de dados a converter entre as diferentes ferramentas tornam este processo moroso e difícil.

Na categoria correspondente à construção sustentável concluiu-se que as ferramentas BIM permitem aos projetistas analisar o efeito de diferentes materiais e soluções de maneira quase imediata, facilitando a tarefa de escolha dos parâmetros mais eficientes. Adicionalmente, estas podem facilitar e acelerar o processo de estimativa de consumos, integrar análises LCA e novos paradigmas de construção, como o NZEB. Porém, a limitação das bibliotecas BIM atuais, tornam difícil determinar que as soluções ótimas encontradas em ambiente BIM correspondem à realidade, uma vez que existem materiais e soluções em falta nas bibliotecas BIM atuais, dificultando a execução de análises LCA e avaliação NZEB em ambiente BIM.

Ao nível do projeto higrotérmico de um edifício, as ferramentas BIM são capazes de auxiliar a tarefa de certificação energética de um edifício, através da análise de critérios específicos de sistemas de classificação energética. Porém, as heterogeneidades de critérios entre diferentes sistemas de certificação energética tornam difícil a automatização deste processo em ambiente BIM. As ferramentas BIM são ainda capazes de facilitar a análise dos critérios associados à sensação de conforto térmico, e determinar as soluções a adotar em edifícios existentes, em processos de reabilitação dos mesmos, embora seja necessário melhorar o processo de recolha de informação térmica e física do edificado.

Verifica-se ainda a necessidade de integrar nas salas de aula das diferentes instituições de ensino de Engenharia e Arquitetura, através de novos planos curriculares, o uso de ferramentas BIM para a determinação da eficiência energética em edifícios.

### **6.3. Desenvolvimentos futuros**

O presente trabalho reconhece algumas limitações a ele associadas. O facto de incidir sobre temas em constante evolução e de grande amplitude, torna difícil que se conheça o panorama atual na sua totalidade.

Identificou-se, através da revisão sistemática de literatura efetuada, uma série de barreiras afetas à informação atualizada. Como tal, os desenvolvimentos futuros, no que toca à utilização de ferramentas BIM como plataformas de avaliação energética em edifícios, deverão focar-se em transpor tais barreiras, de maneira a garantir um passo evolutivo no setor AECO.

Para resolução dos problemas associados às tecnologias BIM, o recurso a padrões de informação, como o IFC, através de modelos tipo MVD, apresenta-se como a chave para resolver

os problemas de interoperabilidade atuais. A obtenção de geometria e propriedades térmicas de edifícios pode ser acelerada e facilitada através da utilização de equipamentos tecnológicos modernos, capazes de recolher informação geométrica e termográfica. Para suplantar as dificuldades associadas às análises de grande escala, o recurso à tecnologia *cloud computing* parece ser a mais indicada, tendo em conta a quantidade de dados que este tipo de análise necessita. No que toca à integração de dados de sensores em BIM, para efeitos de monitorização, esta poderá ser alcançada através da introdução de uma nova dimensão BIM (8D), com informação relacionada com dados obtidos a partir de sensores.

A integração e associação de novas tecnologias, como a impressão multidimensional e realidade virtual poderá representar um avanço tecnológico considerável, capaz de ajudar os projetistas a encontrar soluções eficientes, num modo de visualização inovador.

Por outro lado, o papel das ferramentas BIM na obtenção de um setor de construção sustentável depende, em parte, da limitação das bibliotecas BIM atuais. Aqui, e mais uma vez, o padrão IFC poderá fornecer a solução, se aliado a uma possível obrigatoriedade dos produtores de materiais de construção para que disponibilizem as suas famílias de produtos em formato *openBIM*, como o IFC. A integração de capacidades LCA e de capacidades de estimativas de consumo mais rigorosas, poderão também conduzir a uma maior sustentabilidade na construção, permitindo estudar com mais fiabilidade conceitos como o NZEB, através de modelos BIM.

No que toca ao processo de certificação energética, este poderá ser automatizado com base em modelos BIM. Para isso, contudo, será necessário homogeneizar ao máximo todos os sistemas de classificação energética existentes nos diversos países, uma vez que existem metodologias de cálculo e critérios de classificação diferentes.

Numa perspetiva global, deverá ser criada uma norma que incida sobre o uso da metodologia BIM para análises e processos de certificação energética baseados em modelos BIM. A existência de processos normalizados seria o primeiro passo para resolver muitos problemas atuais relacionados com a compatibilidade entre diferentes ferramentas e heterogeneidade de critérios de classificação energética. Uma nova norma, elaborada por diversos intervenientes ligados aos sistemas de classificação energética, ao BIM e às diferentes legislações relacionadas com a eficiência energética, teria o potencial de promover o uso do BIM na avaliação energética em edifícios, contribuindo para a redução do impacto ambiental negativo que o setor AECO apresenta atualmente.



## REFERÊNCIAS

1. Hardin, B. and D. McCool, *BIM and construction management: proven tools, methods, and workflows*. 2015: John Wiley & Sons.
2. Sciences, N.I.o.B., *National Building information modeling Standard*. 2007.
3. Azhar, S., *Building Information Modeling (BIM): Now and Beyond*. 2012 DOI: 10.5130/ajceb.v12i4.3032.
4. Olawumi, T. and D. Chan, *Identifying and prioritizing the benefits of integrating BIM and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey of international experts*. *Sustainable Cities and Society*, 2018. **40**: p. 16-27 DOI: 10.1016/j.scs.2018.03.033.
5. Pacheco, R., J. Ordóñez, and G. Martínez, *Energy efficient design of building: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. **16**(6): p. 3559-3573 DOI: 10.1016/j.rser.2012.03.045.
6. Carvalho, J., L. Bragança, and R. Mateus, *Optimising building sustainability assessment using BIM*. *Automation in Construction*, 2019. **102**: p. 170-182 DOI: 10.1016/j.autcon.2019.02.021.
7. Li, Y., S. Kubicki, A. Guerriero, et al., *Review of building energy performance certification schemes towards future improvement*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. **113** DOI: 10.1016/j.rser.2019.109244.
8. Herring, H., *Energy efficiency—a critical view*. *Energy*, 2006. **31**(1): p. 10-20 DOI: 10.1016/j.energy.2004.04.055.
9. Schipper, L.H., R., *The political relevance of energy and CO<sub>2</sub> indicators—An introduction*. 1997 DOI: 10.1016/S0301-4215(97)00057-8.
10. Goh, T. and B.W. Ang, *Four reasons why there is so much confusion about energy efficiency*. *Energy Policy*, 2020. **146** DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111832.
11. Agency, I.E., *2019 Global Status Report for Buildings and Construction*. 2019.
12. Eastman, C., P. Teicholz, R. Sacks, et al., *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. 2008: John Wiley & Sons, Inc.
13. PCSG. *Parametric modelling*. 2020 14/07/2020 [cited 2020 20/07/2020]; Disponível em: [https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Parametric\\_modelling](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Parametric_modelling).
14. Morrical, K. *BIM Interoperability Dreams Can Come True*. 2015 [cited 2020 20/07/2020]; Disponível em: <https://www.autodesk.com/redshift/bim-interoperability-unified-model-documentation-and-design/>.
15. Cardoso, A., B. Maia, D. Santos, et al., *BIM: O que é?* 2012, FEUP.
16. Smith, P., *BIM implementation – global initiatives & creative approaches*, in *Creative Construction Conference*. 2014.
17. Ulla, K., I. Lill, and E. Witt, *An Overview of BIM Adoption in the Construction Industry: Benefits and Barriers*, in *10th Nordic Conference on Construction Economics and Organization*. 2019 DOI: 10.1108/S2516-285320190000002052.

18. Jung, W. and G. Lee, *The Status of BIM Adoption on Six Continents*. International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering, 2015. **9**.
19. Jung, W. and G. Lee, *Slim BIM Charts for Rapidly Visualizing and Quantifying Levels of BIM Adoption and Implementation*. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016. **30**(4) DOI: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000554.
20. Taskgroup, E.B., *Handbook for the introduction of Building Information Modelling by the European Public Sector*. 2016.
21. Venâncio, M., *AVALIAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DE BIM – BUILDING INFORMATION MODELING EM PORTUGAL*. 2015, FEUP.
22. CIOB. *New international BIM standard launched*. 2020 2019/01/22 [cited 2020 2020/07/20]; Disponível em: <https://www.constructionmanagemagazine.com/new-international-bim-standard-launched/>.
23. Nations, U., *Paris Agreement*, U. Nations, Editor. 2006.
24. Comission, E. *Energy performance of buildings directive*. 2019 2020/06/16 [cited 2020 2020/07/20]; Disponível em: [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en).
25. Economidou, M., V. Todeschi, P. Bertoldi, et al., *Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings*. Energy and Buildings, 2020. **225** DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110322.
26. Borrego, M., M.J. Foster, and J.E. Froyd, *Systematic Literature Reviews in Engineering Education and Other Developing Interdisciplinary Fields*. Journal of Engineering Education, 2014. **103**(1): p. 45-76 DOI: 10.1002/jee.20038.
27. Elsevier. *About ScienceDirect*. 2020 [cited 2020 15/07/2020]; Disponível em: <https://www.elsevier.com/solutions/sciencedirect>.
28. ASCE. *ASCE Library*. 2020 [cited 2020 15/07/2020]; Disponível em: <https://ascelibrary.org/>.
29. Library, I. *ICE Libary*. 2020 [cited 2020 15/07/2020]; Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/page/ice-about>.
30. Abaglo, A., C. Bonaldab, and E. Pertusa, *Environmental Digital Model: Integration of BIM into environmental building simulations*, in *CISBAT 2017 International Conference – Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale*. 2017: Lausanne, Switzerland DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.438.
31. Abanda, H. and L. Byers, *An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling)*. Energy, 2016. **97**: p. 517-527 DOI: 10.1016/j.energy.2015.12.135.
32. Abanda, H., M. Tah, and G. Nkeng, *Earth-block versus sandcrete-block houses*, in *Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks*. 2015. p. 481-514 DOI: 10.1016/b978-1-78242-305-8.00022-x.
33. Abdelalim, A., W. O'Brien, and Z. Shi, *Data visualization and analysis of energy flow on a multi-zone building scale*. Automation in Construction, 2017. **84**: p. 258-273 DOI: 10.1016/j.autcon.2017.09.012.

34. Abdelmegid, A., A. González, M. Poshdar, et al., *Barriers to adopting simulation modelling in construction industry*. Automation in Construction, 2020. **111** DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103046.
35. Acosta, I., M. Campano, and J. Molina, *Window design in architecture: Analysis of energy savings for lighting and visual comfort in residential spaces*. Applied Energy, 2016. **168**: p. 493-506 DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.005.
36. Ahmad, T., A. Aibinu, and M. Thaheem, *BIM-based Iterative Tool for Sustainable Building Design: A Conceptual Framework*. Procedia Engineering, 2017. **180**: p. 782-792 DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.239.
37. Ahmad, T. and M. Thaheem, *Economic sustainability assessment of residential buildings: A dedicated assessment framework and implications for BIM*. Sustainable Cities and Society, 2018. **38**: p. 476-491 DOI: 10.1016/j.scs.2018.01.035.
38. Ahuja, R., A. Sawhney, and M. Arif, *Driving lean and green project outcomes using BIM: A qualitative comparative analysis*. International Journal of Sustainable Built Environment, 2017. **6**(1): p. 69-80 DOI: 10.1016/j.ijbsbe.2016.10.006.
39. Ajayi, S., L. Oyedele, and O. Ilori, *Changing significance of embodied energy: A comparative study of material specifications and building energy sources*. Journal of Building Engineering, 2019. **23**: p. 324-333 DOI: 10.1016/j.jobe.2019.02.008.
40. Akanbi, L., L. Oyedele, K. Omotoso, et al., *Disassembly and deconstruction analytics system (D-DAS) for construction in a circular economy*. Journal of Cleaner Production, 2019. **223**: p. 386-396 DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.172.
41. Aladag, H., G. Demirdögen, and Z. Isik, *Building Information Modeling (BIM) Use in Turkish Construction Industry*. Procedia Engineering, 2016. **161**: p. 174-179 DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.520.
42. Anand, C. and B. Amor, *Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **67**: p. 408-416 DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.058.
43. Andriamamonjy, A., D. Saelens, and R. Klein, *A combined scientometric and conventional literature review to grasp the entire BIM knowledge and its integration with energy simulation*. Journal of Building Engineering, 2019. **22**: p. 513-527 DOI: 10.1016/j.jobe.2018.12.021.
44. Ansah, M., X. Chen, H. Yang, et al., *A review and outlook for integrated BIM application in green building assessment*. Sustainable Cities and Society, 2019. **48** DOI: 10.1016/j.scs.2019.101576.
45. Arayici, Y., P. Coates, L. Koskela, et al., *Technology adoption in the BIM implementation for lean architecture practice*. 2011 DOI: 10.1016/j.autcon.2010.09.016.
46. Arayici, Y., T. Fernando, V. Munoz, et al., *Interoperability specification development for integrated BIM use in performance based design*. Automation in Construction, 2018. **85**: p. 167-181 DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.018.
47. Asl, M., S. Zarrinmehr, M. Bergin, et al., *BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization*. Energy and Buildings, 2015. **108**: p. 401-412 DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.09.011.

48. Aste, N., M. Manfren, and G. Marenzi, *Building Automation and Control Systems and performance optimization: A framework for analysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **75**: p. 313-330 DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.072.
49. Azhar, S., *Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry*. 2011 DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127.
50. Azhar, S., W. Carlton, D. Olsen, et al., *Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis*. Automation in Construction, 2011. **20**(2): p. 217-224 DOI: 10.1016/j.autcon.2010.09.019.
51. Azzi, M., H. Duc, and Q. Ha, *Toward sustainable energy usage in the power generation and construction sectors—a case study of Australia*. Automation in Construction, 2015. **59**: p. 122-127 DOI: 10.1016/j.autcon.2015.08.001.
52. Baezley, S., E. Heffernan, and T. McCarthy, *Enhancing energy efficiency in residential buildings through the use of BIM: The case for embedding parameters during design*, in *International Conference on Improving Residential Energy Efficiency*. 2017 DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.479.
53. Barlish, K., *How To Measure the Benefits of BIM*. 2012, How To Measure the Benefits of BIM.
54. Bazjanac, V., T. Maile, and C. Nytsch-Geusen, *Generation of building geometry for Energy Performance simulation using MODELICA*, in *CESBP / BauSim 2016 - IBPSA*. 2016.
55. Bonenberg, W. and X. Wei, *Green BIM in Sustainable Infrastructure*. Procedia Manufacturing, 2015. **3**: p. 1654-1659 DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.483.
56. Bruce-Hyrkäs, T., P. Pasanen, and R. Castro, *Overview of Whole Building Life-Cycle Assessment for Green Building Certification and Ecodesign through Industry Surveys and Interviews*. Procedia CIRP, 2018. **69**: p. 178-183 DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.127.
57. Bruno, S., M. De Fino, and F. Fatiguso, *Historic Building Information Modelling: performance assessment for diagnosis-aided information modelling and management*. Automation in Construction, 2018. **86**: p. 256-276 DOI: 10.1016/j.autcon.2017.11.009.
58. Capeluto, I. and C. Ochoa, *Simulation-based method to determine climatic energy strategies of an adaptable building retrofit façade system*. Energy, 2014. **76**: p. 375-384 DOI: 10.1016/j.energy.2014.08.028.
59. Casini, M., *Designing the third millennium's buildings*, in *Smart Buildings*. 2016. p. 3-54 DOI: 10.1016/b978-0-08-100635-1.00001-0.
60. Cavalliere, C., G. Habert, G. Dell'Osso, et al., *Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design process*. Journal of Cleaner Production, 2019. **211**: p. 941-952 DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.247.
61. Ceranic, B., D. Latham, and A. Dean, *Sustainable Design and Building Information Modelling: Case Study of Energy Plus House, Hieron's Wood, Derbyshire UK*. Energy Procedia, 2015. **83**: p. 434-443 DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.163.
62. Chalal, M., M. Benachir, M. White, et al., *Energy planning and forecasting approaches for supporting physical improvement strategies in the building sector: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **64**: p. 761-776 DOI: 10.1016/j.rser.2016.06.040.
63. Chang, S., D. Castro-Lacouture, F. Dutt, et al., *Framework for evaluating and optimizing algae façades using closed-loop simulation analysis integrated with BIM*, in *World*

*Engineers Summit – Applied Energy Symposium & Forum: Low Carbon Cities & Urban Energy Joint Conference*. 2017: Singapore DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.677.

64. Charef, R., H. Alaka, and S. Emmitt, *Beyond the third dimension of BIM: A systematic review of literature and assessment of professional views*. Journal of Building Engineering, 2018. **19**: p. 242-257 DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.04.028.
65. Checchini, C., A. Magrini, and L. Gobbi, *A 3d platform for energy data visualization of building assets*, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019: Milan DOI: 10.1088/1755-1315/296/1/012035.
66. Chen, L. and W. Pan, *BIM-aided variable fuzzy multi-criteria decision making of low-carbon building measures selection*. Sustainable Cities and Society, 2016. **27**: p. 222-232 DOI: 10.1016/j.scs.2016.04.008.
67. Chen, P. and T. Nguyen, *Integrating web map service and building information modeling for location and transportation analysis in green building certification process*. Automation in Construction, 2017. **77**: p. 52-66 DOI: 10.1016/j.autcon.2017.01.014.
68. Chen, S., *Use of Green Building Information Modeling in the Assessment of Net Zero Energy Building Design*. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 2019. **27**(3): p. 174-186 DOI: 10.3846/jeelm.2019.10797.
69. Chen, T., J. Burnett, and C. Chau, *Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong*. Elsevier Energy, 2000 DOI: 10.1016/S0360-5442(01)00006-8.
70. Cho, Y. and C. Wang, *3D Thermal Modeling for Existing Buildings using Hybrid LIDAR System*. Computing in Civil Engineering, 2011 DOI: 10.1061/41182(416)68.
71. Chong, H., C. Lee, and X. Wang, *A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability*. Journal of Cleaner Production, 2017. **142**: p. 4114-4126 DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.222.
72. Chowdhury, T., J. Adafin, and S. Wilkinson, *Review of digital technologies to improve productivity of New Zealand construction industry*. Journal of Information Technology in Construction, 2019. **24**(2019VMAR): p. 569-587 DOI: 10.36680/j.itcon.2019.032.
73. Coakley, D., E. Corry, and M. Keane, *Validation of Simulated Thermal Comfort using a Calibrated Building Energy Simulation (BES) model in the context of Building Performance Evaluation & Optimisation*, in *13th International Conference for Enhanced Building Operations*,. 2013: Montreal, Quebec.
74. Conaghan, C., D. Jordan, R. Guida, et al., *Development of an Innovative Energy Modelling Framework for Design and Operation of Building Clusters in the Tropics*, in *World Engineers Summit – Applied Energy Symposium & Forum: Low Carbon Cities & Urban Energy Joint Conference*. 2017: Singapore DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.686.
75. Costa, A., M. Keane, J. Torrens, et al., *Building operation and energy performance: Monitoring, analysis and optimisation toolkit*. Applied Energy, 2013. **101**: p. 310-316 DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.10.037.
76. Costa, G., Á. Sicilia, X. Oregi, et al., *A catalogue of energy conservation measures (ECM) and a tool for their application in energy simulation models*. Journal of Building Engineering, 2020. **29** DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.101102.
77. D'Amico, B. and F. Pomponi, *Accuracy and reliability: A computational tool to minimise steel mass and carbon emissions at early-stage structural design*. Energy and Buildings, 2018. **168**: p. 236-250 DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.03.031.

78. Darko, A., A. Chan, X. Huo, et al., *A scientometric analysis and visualization of global green building research*. Building and Environment, 2019. **149**: p. 501-511 DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.12.059.
79. Deepa, K., B. Suryarajan, V. Nagaraj, et al., *Energy Analysis of Buildings*. International Research Journal of Engineering and Technology, 2019. **6**.
80. Díaz, J. and L. Antón, *Sustainable Construction Approach through Integration of LCA and BIM Tools*, in *COMPUTING IN CIVIL AND BUILDING ENGINEERING*. 2014: Orlando, Florida DOI: 10.1061/9780784413616.036.
81. Doan, D., A. Ghaffarianhoseini, N. Naismith, et al., *Examining Green Star certification uptake and its relationship with Building Information Modelling (BIM) adoption in New Zealand*. J Environ Manage, 2019. **250**: p. 109508 DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109508.
82. Edwards, R., E. Lou, A. Bataw, et al., *Sustainability-led design: Feasibility of incorporating whole-life cycle energy assessment into BIM for refurbishment projects*. Journal of Building Engineering, 2019. **24** DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.01.027.
83. El-Diraby, T., T. Krijnen, and M. Papagelis, *BIM-based collaborative design and socio-technical analytics of green buildings*. Automation in Construction, 2017. **82**: p. 59-74 DOI: 10.1016/j.autcon.2017.06.004.
84. Eleftheriadis, S., D. Mumovic, and P. Greening, *Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **67**: p. 811-825 DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.028.
85. Evins, R., *A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **22**: p. 230-245 DOI: 10.1016/j.rser.2013.02.004.
86. Farzaneh, A., D. Monfet, and D. Forgues, *Review of using Building Information Modeling for building energy modeling during the design process*. Journal of Building Engineering, 2019. **23**: p. 127-135 DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.01.029.
87. Fernández, A., F. Rijswijk, C. Ruhsam, et al., *Applying Adaptive Case Management to Enable Energy Efficiency Performance Tracking in Building Construction Projects*. BPM 2019, 2019.
88. Gan, V., M. Deng, Y. Tan, et al., *BIM-based framework to analyze the effect of natural ventilation on thermal comfort and energy performance in buildings*, in *10th International Conference on Applied Energy* 2019: Hong Kong, China DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.971.
89. Gao, H., C. Koch, and Y. Wu, *Building information modelling based building energy modelling: A review*. Applied Energy, 2019. **238**: p. 320-343 DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.032.
90. Gao, H., L. Zhang, C. Koch, et al., *BIM-based real time building energy simulation and optimization in early design stage*, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019 DOI: 10.1088/1757-899X/556/1/012064.
91. Garwood, T., B. Hughes, D. O'Connor, et al., *Geometry Extraction for High Resolution Building Energy Modelling Applications from Point Cloud Data: A Case Study of a Factory Facility*, in *9th International Conference on Applied Energy*. 2017: Cardiff, U.K. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.567.

92. Garwood, T., B. Hughes, D. O'Connor, et al., *A framework for producing gbXML building geometry from Point Clouds for accurate and efficient Building Energy Modelling*. Applied Energy, 2018. **224**: p. 527-537 DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.046.
93. Garwood, T., B. Hughes, M. Oates, et al., *A review of energy simulation tools for the manufacturing sector*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **81**: p. 895-911 DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.063.
94. Gerrish, T., K. Ruikar, M. Cook, et al., *BIM application to building energy performance visualisation and management: Challenges and potential*. Energy and Buildings, 2017. **144**: p. 218-228 DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.032.
95. Geyer, P., *Systems modelling for sustainable building design*. Advanced Engineering Informatics, 2012. **26**(4): p. 656-668 DOI: 10.1016/j.aei.2012.04.005.
96. Ghaffarianhoseini, A., J. Tookey, A. Ghaffarianhoseini, et al., *Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **75**: p. 1046-1053 DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.083.
97. Gigliarelli, E., F. Calcerano, and L. Cessari, *Implementation Analysis and Design for Energy Efficient Intervention on Heritage Buildings*, in *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*. 2016. p. 91-103 DOI: 10.1007/978-3-319-48496-9\_8.
98. Giuda, G., V. Villa, and P. Piantanida, *BIM and Energy Efficient Retrofitting in School Buildings*. Energy Procedia, 2015. **78**: p. 1045-1050 DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.066.
99. Göçer, Ö., Y. Hua, and K. Göçer, *Completing the missing link in building design process: Enhancing post-occupancy evaluation method for effective feedback for building performance*. Building and Environment, 2015. **89**: p. 14-27 DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.02.011.
100. Goel, A., L. Ganesh, and A. Kaur, *Sustainability integration in the management of construction projects: A morphological analysis of over two decades' research literature*. Journal of Cleaner Production, 2019. **236** DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117676.
101. Gökçe, H. and K. Gökçe, *Multi dimensional energy monitoring, analysis and optimization system for energy efficient building operations*. Sustainable Cities and Society, 2014. **10**: p. 161-173 DOI: 10.1016/j.scs.2013.08.004.
102. Gong, Y., S. Tae, S. Suk, et al., *Life Cycle Assessment Applied to Green Building Certification in South Korea*. Procedia Engineering, 2015. **118**: p. 1309-1313 DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.493.
103. Gourlis, G. and I. Kovacic, *Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – A case study*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **68**: p. 953-963 DOI: 10.1016/j.rser.2016.02.009.
104. Granadeiro, V., J. Duarte, J. Correia, et al., *Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation*. Automation in Construction, 2013. **32**: p. 196-209 DOI: 10.1016/j.autcon.2012.12.003.
105. Gröger, G. and L. Plümer, *CityGML – Interoperable semantic 3D city models*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012. **71**: p. 12-33 DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004.

106. Gunhan, S., *Integrating Research Findings into Sustainable Building Delivery Teaching*. Procedia Engineering, 2016. **145**: p. 158-163 DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.037.
107. Habibi, S., *The promise of BIM for improving building performance*. Energy and Buildings, 2017. **153**: p. 525-548 DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.08.009.
108. Ham, Y. and M. Golparvar-Fard, *An automated vision-based method for rapid 3D energy performance modeling of existing buildings using thermal and digital imagery*. Advanced Engineering Informatics, 2013. **27**(3): p. 395-409 DOI: 10.1016/j.aei.2013.03.005.
109. Ham, Y. and M. Golparvar-Fard, *Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling*. Automation in Construction, 2015. **49**: p. 214-224 DOI: 10.1016/j.autcon.2014.07.009.
110. Hamedani, M. and R. Smith, *Evaluation of Performance Modelling: Optimizing Simulation Tools to Stages of Architectural Design*. Procedia Engineering, 2015. **118**: p. 774-780 DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.513.
111. Hanafi, M., G. Sing, S. Abdullah, et al., *Organisational readiness of Building Information Modelling implementation: Architectural practices*. Teknologi, 2016 DOI: 10.11113/jt.v78.8265.
112. He, B., M. Ye, L. Yang, et al., *The combination of digital technology and architectural design to develop a process for enhancing energy-saving: The case of Maanshan China*. Technology in Society, 2014. **39**: p. 77-87 DOI: 10.1016/j.techsoc.2014.10.002.
113. Hensen, J. and R. Lamberts, *Building Performance Simulation for Design and Operation*. 2011.
114. Hiyama, K., S. Kato, M. Kubota, et al., *A new method for reusing building information models of past projects to optimize the default configuration for performance simulations*. Energy and Buildings, 2014. **73**: p. 83-91 DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.01.025.
115. Hodorog, A., A. Alhamani, I. Petri, et al., *Social media mining for BIM skills and roles for energy efficiency*, in *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. 2019 DOI: 10.1109/ICE.2019.8792571.
116. Hong, S., S. Lee, and J. Yu, *Automated management of green building material information using web crawling and ontology*. Automation in Construction, 2019. **102**: p. 230-244 DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.015.
117. Hong, T., Y. Chen, X. Luo, et al., *Ten questions on urban building energy modeling*. Building and Environment, 2020. **168** DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106508.
118. Hong, T., H. Sun, Y. Chen, et al., *An occupant behavior modeling tool for co-simulation*. Energy and Buildings, 2016. **117**: p. 272-281 DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.033.
119. Hu, M., *Does zero energy building cost more? – An empirical comparison of the construction costs for zero energy education building in United States*. Sustainable Cities and Society, 2019. **45**: p. 324-334 DOI: 10.1016/j.scs.2018.11.026.
120. Hu, M., *Building impact assessment—A combined life cycle assessment and multi-criteria decision analysis framework*. Resources, Conservation and Recycling, 2019. **150** DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104410.
121. Hui, S., *New Opportunities of Using Building Information Modelling (BIM) for Green Buildings*, in *15th Asia Pacific Conference on the Built Environment*. 2019.

122. Ilhan, B. and H. Yaman, *Green building assessment tool (GBAT) for integrated BIM-based design decisions*. Automation in Construction, 2016. **70**: p. 26-37 DOI: 10.1016/j.autcon.2016.05.001.
123. Ioannidis, D., P. Tropios, S. Krinidis, et al., *Occupancy driven building performance assessment*. Journal of Innovation in Digital Ecosystems, 2016. **3**(2): p. 57-69 DOI: 10.1016/j.jides.2016.10.008.
124. Jakica, N., *State-of-the-art review of solar design tools and methods for assessing daylighting and solar potential for building-integrated photovoltaics*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **81**: p. 1296-1328 DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.080.
125. Jalaei, F. and A. Jrade, *Integrating building information modeling (BIM) and LEED system at the conceptual design stage of sustainable buildings*. Sustainable Cities and Society, 2015. **18**: p. 95-107 DOI: 10.1016/j.scs.2015.06.007.
126. Jin, R., B. Zhong, L. Ma, et al., *Integrating BIM with building performance analysis in project life-cycle*. Automation in Construction, 2019. **106** DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102861.
127. Kamel, E. and A. Memari, *Automated Building Energy Modeling and Assessment Tool (ABEMAT)*. Energy, 2018. **147**: p. 15-24 DOI: 10.1016/j.energy.2018.01.023.
128. Kamel, E. and A. Memari, *Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions*. Automation in Construction, 2019. **97**: p. 164-180 DOI: 10.1016/j.autcon.2018.11.008.
129. Kanters, J., M. Horvat, and M. Dubois, *Tools and methods used by architects for solar design*. Energy and Buildings, 2014. **68**: p. 721-731 DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.05.031.
130. Kesidou, S. and B. Sovacool, *Supply chain integration for low-carbon buildings: A critical interdisciplinary review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. **113** DOI: 10.1016/j.rser.2019.109274.
131. Kim, J., W. Jeong, M. Clayton, et al., *Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation*. Automation in Construction, 2015. **50**: p. 16-28 DOI: 10.1016/j.autcon.2014.10.011.
132. Kim, K., *BIM-Enabled Sustainable Housing Refurbishment—LCA Case Study*, in *Sustainable Construction Technologies*. 2019. p. 349-394 DOI: 10.1016/b978-0-12-811749-1.00019-5.
133. Kreiner, H., A. Passer, and H. Wallbaum, *A new systemic approach to improve the sustainability performance of office buildings in the early design stage*. Energy and Buildings, 2015. **109**: p. 385-396 DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.09.040.
134. Kristiansen, A., T. Ma, and R. Wang, *Perspectives on industrialized transportable solar powered zero energy buildings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. **108**: p. 112-124 DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.032.
135. Kuo, H., S. Hsieh, R. Guo, et al., *A verification study for energy analysis of BIPV buildings with BIM*. Energy and Buildings, 2016. **130**: p. 676-691 DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.08.048.
136. Lagüela, S., L. Díaz-Vilariño, J. Armesto, et al., *Non-destructive approach for the generation and thermal characterization of an as-built BIM*. Construction and Building Materials, 2014. **51**: p. 55-61 DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.021.

137. Lagüela, S., L. Díaz-Vilariño, J. Martínez, et al., *Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes*. Automation in Construction, 2013. **31**: p. 230-240 DOI: 10.1016/j.autcon.2012.12.013.
138. Latif, A., A. Ahmad, M. Abdullah, et al., *A Review on Energy Performance in Malaysian Universities Through Building Information Modelling (BIM) Adaptation*, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019 DOI: 10.1088/1755-1315/291/1/012033.
139. Lee, J. and Y. Ham, *Impact Analysis on the Variations of the Thermo-physical Property of Building Envelopes and Occupancy in Building Energy Performance Assessment*. Procedia Engineering, 2016. **145**: p. 556-564 DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.044.
140. Lee, N., S. Tae, Y. Gong, et al., *Integrated building life-cycle assessment model to support South Korea's green building certification system (G-SEED)*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **76**: p. 43-50 DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.038.
141. Li, J., N. Li, K. Afsari, et al., *Integration of Building Information Modeling and Web Service Application Programming Interface for assessing building surroundings in early design stages*. Building and Environment, 2019. **153**: p. 91-100 DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.02.024.
142. Liu, S., X. Meng, and C. Tam, *Building information modeling based building design optimization for sustainability*. Energy and Buildings, 2015. **105**: p. 139-153 DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.037.
143. Liu, Z., K. Chen, L. Peh, et al., *A feasibility study of Building Information Modeling for Green Mark New Non-Residential Building (NRB)*, in *World Engineers Summit – Applied Energy Symposium & Forum: Low Carbon Cities & Urban Energy Joint Conference*. 2017: singapore DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.651.
144. Lu, Y., Z. Wu, R. Chang, et al., *Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions*. Automation in Construction, 2017. **83**: p. 134-148 DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.024.
145. Luo, T., Y. Tan, C. Langston, et al., *Mapping the knowledge roadmap of low carbon building: A scientometric analysis*. Energy and Buildings, 2019. **194**: p. 163-176 DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.03.050.
146. Luziani, S. and B. Paramita, *Autodesk Green Building Studio an Energy Simulation Analysis in the Design Process*. KnE Social Sciences, 2019 DOI: 10.18502/kss.v3i21.5007.
147. Ma, Z. and Z. Yili, *Model of Next Generation Energy-Efficient Design Software for Building*. TSINGHUA SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2008 DOI: 10.1016/S1007-0214(08)70165-2.
148. Mahmoud, S., T. Zayed, and M. Fahmy, *Development of sustainability assessment tool for existing buildings*. Sustainable Cities and Society, 2019. **44**: p. 99-119 DOI: 10.1016/j.scs.2018.09.024.
149. Mahmud, K., U. Amin, M. Hossain, et al., *Computational tools for design, analysis, and management of residential energy systems*. Applied Energy, 2018. **221**: p. 535-556 DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.111.
150. Maltese, S., L. Tagliabue, F. Cecconi, et al., *Sustainability Assessment through Green BIM for Environmental, Social and Economic Efficiency*. Procedia Engineering, 2017. **180**: p. 520-530 DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.211.

151. Maradza, E., J. Whyte, and G. Larsen, *Standardisation of Building Information Modelling in the UK and USA: Challenges and Opportunities*, in *Architectural Engineering Conference*. 2013 DOI: 10.1061/9780784412909.044.
152. Marzouk, M., S. Azab, and M. Metawie, *BIM-based approach for optimizing life cycle costs of sustainable buildings*. *Journal of Cleaner Production*, 2018. **188**: p. 217-226 DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.280.
153. Marzouk, M. and A. Othman, *Modeling the performance of sustainable sanitation systems using building information modeling*. *Journal of Cleaner Production*, 2017. **141**: p. 1400-1410 DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.226.
154. McAuley, B. and A. Behan, *Delivering Energy Savings for the Supply Chain Through Building Information Modelling as a Result of the Horizon 2020 Energy BIMcert Project*, in *SEEEDS 2019*. 2019 DOI: 10.1007/978-3-030-44381-8\_12.
155. McAuley, B., A. Hore, and R. West, *BICP Global BIM Study - Lessons for Ireland's BIM Programme*. 2017 DOI: 10.21427/D7M049.
156. Monteiro, J., A. Silva, A. Mortal, et al. *INCREEaSE 2019*. in *2nd International Congress on Engineering and Sustainability in the XXI Century*. 2019.
157. Motawa, I. and K. Carter, *Sustainable BIM-based Evaluation of Buildings*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2013. **74**: p. 419-428 DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.03.015.
158. Muller, M., F. Esmanioto, N. Huber, et al., *A systematic literature review of interoperability in the green Building Information Modeling lifecycle*. *Journal of Cleaner Production*, 2019. **223**: p. 397-412 DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.114.
159. Mytafides, C., A. Dimoudi, and S. Zoras, *Transformation of a university building into a zero energy building in Mediterranean climate*. *Energy and Buildings*, 2017. **155**: p. 98-114 DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.07.083.
160. Najjar, M., K. Figueiredo, and A. Haddad, *Increasing energy efficiency of building envelopes towards nearly zero energy buildings integrating BIM and LCA*. 2018.
161. Najjar, M., K. Figueiredo, A. Hammad, et al., *Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy efficient buildings*. *Applied Energy*, 2019. **250**: p. 1366-1382 DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.05.101.
162. Najjar, M., K. Figueiredo, M. Palumbo, et al., *Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building*. *Journal of Building Engineering*, 2017. **14**: p. 115-126 DOI: 10.1016/j.jobbe.2017.10.005.
163. NBS, *International BIM Report 2016*.
164. Negendahl, K., *Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models*. *Automation in Construction*, 2015. **54**: p. 39-53 DOI: 10.1016/j.autcon.2015.03.002.
165. Ng, L., A. Persily, and S. Emmerich, *Improving infiltration modeling in commercial building energy models*. *Energy and Buildings*, 2015. **88**: p. 316-323 DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.11.078.
166. Nicał, A. and W. Wodyński, *Enhancing Facility Management through BIM 6D*. *Procedia Engineering*, 2016. **164**: p. 299-306 DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.623.

167. Niu, S., W. Pan, and Y. Zhao, *A BIM-GIS Integrated Web-based Visualization System for Low Energy Building Design*. Procedia Engineering, 2015. **121**: p. 2184-2192 DOI: 10.1016/j.proeng.2015.09.091.
168. Nizam, R., C. Zhang, and L. Tian, *A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings*. Energy and Buildings, 2018. **170**: p. 1-14 DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.03.067.
169. Nwodo, M. and C. Anumba, *A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach*. Building and Environment, 2019. **162** DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106290.
170. O'Donnell, J., T. Maile, C. Rose, et al., *Transforming BIM to BEM: Generation of Building Geometry for the NASA Ames Sustainability Base BIM*. 2013 DOI: 10.2172/1168736.
171. Oduyemi, O. and M. Okoroh, *Building performance modelling for sustainable building design*. International Journal of Sustainable Built Environment, 2016. **5**(2): p. 461-469 DOI: 10.1016/j.ijsbe.2016.05.004.
172. Oliveira, F., *Desenvolvimento de ferramenta BIM para avaliação prescritiva de Eficiência Energética Integrada ao processo de projeto*. 2019, universidade Federal de Alagoas.
173. Oliveira, F., L. Bittencourt, and D. Dória, *Uma ferramenta BIM para simulação de eficiência energética nas fases iniciais de projeto*. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, 2020 DOI: 10.20396/parc.v11i0.8653782.
174. Østergård, T., R. Jensen, and S. Maagaard, *Building simulations supporting decision making in early design – A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **61**: p. 187-201 DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.045.
175. Palmatier, R., M. Houston, and J. Hulland, *Review articles: purpose, process, and structure*. Journal of the Academy of Marketing Science, 2017. **46**(1): p. 1-5 DOI: 10.1007/s11747-017-0563-4.
176. Peng, C., *Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling*. Journal of Cleaner Production, 2016. **112**: p. 453-465 DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.078.
177. Peng, Y., J. Lin, J. Zhang, et al., *A hybrid data mining approach on BIM-based building operation and maintenance*. Building and Environment, 2017. **126**: p. 483-495 DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.09.030.
178. Pezeshki, Z., A. Soleimani, and A. Darabi, *Application of BEM and using BIM database for BEM: A review*. Journal of Building Engineering, 2019. **23**: p. 1-17 DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.01.021.
179. Press, A., *THE DESIGN PROCESS—EARLY STAGES*, in *ASHRAE GreenGuide*. 2006. p. 416.
180. Razali, M., N. Haron, S. Hassim, et al., *A Review: Application of Building Information Modelling (BIM) over Building Life Cycles*, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019 DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012028.
181. Rezaei, F., C. Bulle, and P. Lesage, *Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages*. Building and Environment, 2019. **153**: p. 158-167 DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.01.034.
182. Rezgui, Y., T. Beach, and O. Rana, *A Governance Approach for Bim Management across Lifecycle and Supply Chains Using Mixed-Modes of Information Delivery*. Journal of Civil

- Engineering and Management, 2013. **19**(2): p. 239-258 DOI: 10.3846/13923730.2012.760480.
183. Roh, S., S. Tae, and S. Shin, *Development of building materials embodied greenhouse gases assessment criteria and system (BEGAS) in the newly revised Korea Green Building Certification System (G-SEED)*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **35**: p. 410-421 DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.034.
  184. Roslan, R., R. Omar, R. Roslan, et al., *Building Information Modelling (BIM) For Estimation of Heat Flux from Streetscape Material*. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2019. **9**(1): p. 3520-3524 DOI: 10.35940/ijeat.A2679.109119.
  185. Samuel, E., E. Joseph-Akwara, and A. Richard, *Assessment of energy utilization and leakages in buildings with building information model energy*. Frontiers of Architectural Research, 2017. **6**(1): p. 29-41 DOI: 10.1016/j.foar.2017.01.002.
  186. Samuelson, H., A. Lantz, and C. Reinhart, *Non-technical barriers to energy model sharing and reuse*. Building and Environment, 2012. **54**: p. 71-76 DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.02.001.
  187. Sanhudo, L., N. Ramos, J. Martins, et al., *Building information modeling for energy retrofitting – A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **89**: p. 249-260 DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.064.
  188. Santos, A., S. Scheer, and D. Leitner, *O uso do BIM para avaliação do desempenho dos edifícios*. Gestão & Tecnologia de Projetos, 2019. **14**(2): p. 17-33 DOI: 10.11606/gtp.v14i2.151292.
  189. Santos, R., A. Costa, and A. Grilo, *Bibliometric analysis and review of Building Information Modelling literature published between 2005 and 2015*. Automation in Construction, 2017. **80**: p. 118-136 DOI: 10.1016/j.autcon.2017.03.005.
  190. Santos, R., A.r. Costa, J. Silvestre, et al., *Informetric analysis and review of literature on the role of BIM in sustainable construction*. Automation in Construction, 2019. **103**: p. 221-234 DOI: 10.1016/j.autcon.2019.02.022.
  191. Sayigh, A., *Green Buildings and Renewable Energy*, in *Innovative Renewable Energy*. 2019: Florence, Italy.
  192. Scherer, R. and P. Katranuschkov, *BIMification: How to create and use BIM for retrofitting*. Advanced Engineering Informatics, 2018. **38**: p. 54-66 DOI: 10.1016/j.aei.2018.05.007.
  193. Serra, E. and Z. Filho, *Methods for Assessing Energy Efficiency of Buildings*. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 2019 DOI: 10.13044/j.sdewes.d6.0243.
  194. Shadram, F. and J. Mukkavaara, *An integrated BIM-based framework for the optimization of the trade-off between embodied and operational energy*. Energy and Buildings, 2018. **158**: p. 1189-1205 DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.11.017.
  195. Shafiq, N., M. Nurrudin, S. Gardezi, et al., *Carbon footprint assessment of a typical low rise office building in Malaysia using building information modelling (BIM)*. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development, 2015. **6**(3): p. 157-172 DOI: 10.1080/2093761x.2015.1057876.
  196. Shamsutdinov, E., I. Sultanguzin, D. Kruglikov, et al., *Using of BIM, BEM and CFD technologies for design and construction of energy-efficient houses*. E3S Web of Conferences, 2019. **124** DOI: 10.1051/e3sconf/201912403014.

197. Sharma, A., A. Saxena, M. Sethi, et al., *Life cycle assessment of buildings: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(1): p. 871-875 DOI: 10.1016/j.rser.2010.09.008.
198. Shoubi, M., M. Shoubi, A. Bagchi, et al., *Reducing the operational energy demand in buildings using building information modeling tools and sustainability approaches*. Ain Shams Engineering Journal, 2015. **6**(1): p. 41-55 DOI: 10.1016/j.asej.2014.09.006.
199. Shrivastava, H. and S. Akhtar, *Development of a building information modeling tool for green sustainable building design: A review*, in *Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials and Structures for Civil Infrastructures (Smsci2019)*. 2019 DOI: 10.1063/1.5127150.
200. Sierra-Pérez, J., B. Rodríguez-Soria, J. Boschmonart-Rives, et al., *Integrated life cycle assessment and thermodynamic simulation of a public building's envelope renovation: Conventional vs. Passivhaus proposal*. Applied Energy, 2018. **212**: p. 1510-1521 DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.101.
201. Singh, P. and A. Sadhu, *Multicomponent energy assessment of buildings using building information modeling*. Sustainable Cities and Society, 2019. **49** DOI: 10.1016/j.scs.2019.101603.
202. Solaimani, S. and M. Sedighi, *Toward a holistic view on lean sustainable construction: A literature review*. Journal of Cleaner Production, 2020. **248** DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119213.
203. Soust-Verdaguer, B., C. Llatas, and A. García-Martínez, *Critical review of bim-based LCA method to buildings*. Energy and Buildings, 2017. **136**: p. 110-120 DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.12.009.
204. Sözer, H. and H. Sözen, *Energy saving, global warming and waste recovery potential of retrofitting process for a district*. Journal of Cleaner Production, 2019. **238** DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117915.
205. Spiegelhalter, T., *Energy-efficiency Retrofitting and Transformation of the FIU-college of Architecture + The Arts into a Net-Zero-Energy-Building by 2018*. Energy Procedia, 2014. **57**: p. 1922-1930 DOI: 10.1016/j.egypro.2014.10.056.
206. Spiridigliozzi, G., L. Pompei, C. Cornaro, et al., *BIM-BEM support tools for early stages of zero-energy building design*, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019 DOI: 10.1088/1757-899X/609/7/072075.
207. Stipo, F., *A Standard Design Process for Sustainable Design*. Procedia Computer Science, 2015. **52**: p. 746-753 DOI: 10.1016/j.procs.2015.05.121.
208. Tang, L., C. Chen, S. Tang, et al., *Building Information Modeling and Building Performance Optimization*, in *Encyclopedia of Sustainable Technologies*. 2017. p. 311-320 DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.10200-3.
209. Tereno, S., C. Anumba, E. Gannon, et al., *The Benefits of BIM Integration with Facilities Management: A Preliminary Case Study*, in *Computing in Civil Engineering*. 2015 DOI: 10.1061/9780784479247.084.
210. Truong, H., A. Francisco, A. Khosrowpour, et al., *Method for visualizing energy use in building information models*, in *9th International Conference on Applied Energy*. 2017: Cardiff, U.K. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.089.

211. Turner, C. and M. Frankel, *Energy Performance of LEED® for New Construction Buildings*. 2008.
212. Tushar, Q., M. Bhuiyan, M. Sandanayake, et al., *Optimizing the energy consumption in a residential building at different climate zones: Towards sustainable decision making*. Journal of Cleaner Production, 2019. **233**: p. 634-649 DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.093.
213. Unit, E.I., *Rethinking productivity across the construction industry: The challenge of change*. 2015.
214. Uva, G., M. Dassisti, F. Iannone, et al., *Modelling Framework for Sustainable Co-management of Multi-purpose Exhibition Systems: The “Fiera del Levante” Case*. Procedia Engineering, 2017. **180**: p. 812-821 DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.242.
215. Vladimir, B., *Acquisition of Building Geometry in the simulation of Energy Performance*, in *Seventh International IBPSA Conference*. 2001: Rio de Janeiro.
216. Volk, R., J. Stengel, and F. Schultmann, *Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs*. Automation in Construction, 2014. **38**: p. 109-127 DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
217. Wang, C. and Y. Cho, *Automated gbXML-Based Building Model Creation for Thermal Building Simulation*, in *2014 2nd International Conference on 3D Vision*. 2014. p. 111-117 DOI: 10.1109/3dv.2014.109.
218. Wang, C. and Y. Cho, *Automatic As-is 3D Building Models Creation from Unorganized Point Clouds*, in *Construction Research Congress*. 2014 DOI: 10.1061/9780784413517.094.
219. Wang, C. and Y. Cho, *Performance Evaluation of Automatically Generated BIM from Laser Scanner Data for Sustainability Analyses*. Procedia Engineering, 2015. **118**: p. 918-925 DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.531.
220. Wang, H. and Z. Zhai, *Advances in building simulation and computational techniques: A review between 1987 and 2014*. Energy and Buildings, 2016. **128**: p. 319-335 DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.080.
221. Wang, C., J. Shia, Z. Chena, et al., *Study on energy consumption of large public building based on sub-metering technology*, in *10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning*. 2017: Jinan, China DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.273.
222. Wei, T. and Y. Chen, *Green building design based on BIM and value engineering*. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019 DOI: 10.1007/s12652-019-01556-z.
223. Won, J. and J. Cheng, *Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization*. Automation in Construction, 2017. **79**: p. 3-18 DOI: 10.1016/j.autcon.2017.02.002.
224. Wong, J. and K. Kuan, *Implementing ‘BEAM Plus’ for BIM-based sustainability analysis*. Automation in Construction, 2014. **44**: p. 163-175 DOI: 10.1016/j.autcon.2014.04.003.
225. Wong, J., W. X., H. Li, et al., *A review of cloud-based BIM technology in the construction sector*. Journal of Information Technology in Construction 2014.
226. Wong, J. and J. Zhou, *Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review*. Automation in Construction, 2015. **57**: p. 156-165 DOI: 10.1016/j.autcon.2015.06.003.

227. Wong, K. and Q. Fan, *Building information modelling (BIM) for sustainable building design*. Facilities, 2013. **31**(3/4): p. 138-157 DOI: 10.1108/02632771311299412.
228. Wuni, I., G. Shen, and R. Osei-Kyei, *Scientometric review of global research trends on green buildings in construction journals from 1992 to 2018*. Energy and Buildings, 2019. **190**: p. 69-85 DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.02.010.
229. Xiong, Y., *A BIM-based Interoperability Platform in Support of Building Operation and Energy Management*. 2020, Virginia Polytechnic Institute and State University.
230. Xu, X., C. Li, J. Wang, et al., *Collaboration between designers and contractors to improve building energy performance*. Journal of Cleaner Production, 2019. **219**: p. 20-32 DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.036.
231. Xu, Z., S. Wang, and E. Wang, *Integration of BIM and Energy Consumption Modelling for Manufacturing Prefabricated Components: A Case Study in China*. Advances in Civil Engineering, 2019. **2019**: p. 1-18 DOI: 10.1155/2019/1609523.
232. Yang, T., D. Clements-Croome, and M. Marson, *Building Energy Management Systems*, in *Encyclopedia of Sustainable Technologies*. 2017. p. 291-309 DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.10199-x.
233. Yin, S., B. Li, and Z. Xing, *The governance mechanism of the building material industry (BMI) in transformation to green BMI: The perspective of green building*. Sci Total Environ, 2019. **677**: p. 19-33 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.317.
234. Ying, H. and S. Lee, *An algorithm to facet curved walls in IFC BIM for building energy analysis*. Automation in Construction, 2019. **103**: p. 80-103 DOI: 10.1016/j.autcon.2019.03.004.
235. Yuan, Y. and J. Yuan, *The theory and framework of integration design of building consumption efficiency based on BIM*. Procedia Engineering, 2011. **15**: p. 5323-5327 DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.987.
236. Zaidi, S., *Energy Modeling Existing Large University Buildings*. 2019, University of Cincinnati.
237. Zardo, P., L. Ribeiro, and A. Mussi, *Aplicações De Bim E Design Paramétrico Para Eficiência Energética Das Edificações: Uma Análise De Aplicações Práticas*. Arquitetura Revista, 2019. **15**(2) DOI: 10.4013/arq.2019.152.02.
238. Zhang, T., *Investigating the Effectiveness of BIM-BMS Integration on Managing Existing Building Facilities: A New Zealand Educational Building Case*. 2019, Auckland University of Technology.
239. Zhao, H. and F. Magoulès, *A review on the prediction of building energy consumption*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(6): p. 3586-3592 DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.049.
240. VOSViewer. 2020 [cited 2020 15/07/2020]; Disponível em: <https://www.vosviewer.com/>.
241. Fund, R.L. *What is a literature review?* 2020 [cited 2020 08/07/2020]; Disponível em: <https://www.rlf.org.uk/resources/what-is-a-literature-review/>.
242. Su, H.-N. and P.-C. Lee, *Mapping knowledge structure by keyword co-occurrence: a first look at journal papers in Technology Foresight*. Scientometrics, 2010. **85**(1): p. 65-79 DOI: 10.1007/s11192-010-0259-8.

243. Qiu, J.Z., R.; Yang, S.; Dong, K., *Informetrics: Theory, Methods and Applications*. 2017.
244. Pritchard, A., *STATISTICAL BIBLIOGRAPHY OR BIBLIOMETRICS?* 1969.
245. Boradus, R., *Early Approaches to Bibliometrics*. 1987 DOI: 10.1002/(SICI)1097-4571(198703)38:2<127::AID-ASI6>3.0.CO;2-K.
246. Borgman, C.F., J., *Scholarly Communication and Bibliometrics*. 2005 DOI: 10.1002/aris.1440360102.
247. Namilov, V.M., B., *Measurement of Science: Study of the development of Science as an Information Process*. 1969.
248. Mingers, J. and L. Leydesdorff, *A review of theory and practice in scientometrics*. European Journal of Operational Research, 2015. **246**(1): p. 1-19 DOI: 10.1016/j.ejor.2015.04.002.
249. Yang, S., *Are Scientometrics, Informetrics, and Bibliometrics different?* 2018 DOI: 10.13140/RG.2.2.22435.50726.
250. Egghe, L. and R. Rousseau, *Informetrics 87/88: Select Proceedings of the First International Conference on Bibliometrics and Theoretical Aspects of Information Retrieval, Diepenbeek, Belgium, 25-28 August 1987*. 1988: Elsevier Science Publishers.
251. Toronto, U.o. *BIO120: Adaptation and Biodiversity*. 2020 27/02/2020 [cited 2020 16/06/2020]; Disponível em: <https://guides.library.utoronto.ca/c.php?g=250471&p=1670761>.
252. Reitz, J.M. *Online Dictionary for Library and Information Science*. 2014 [cited 2020 26/06/2020]; Disponível em: [https://products.abc-clio.com/ODLIS/odlis\\_s.aspx](https://products.abc-clio.com/ODLIS/odlis_s.aspx).
253. Elsevier. *Automation in Construction - Journal - Elsevier*. 2020 [cited 2020 18/06/2020]; Disponível em: <https://www.journals.elsevier.com/automation-in-construction>.
254. Elsevier. *Renewable & Sustainable Energy Reviews - Journal - Elsevier*. 2020 [cited 2020 18/06/2020]; Disponível em: <https://www.journals.elsevier.com/renewable-and-sustainable-energy-reviews>.
255. Elsevier. *Energy and Buildings - Journal - Elsevier*. 2020 [cited 2020 18/06/2020]; Disponível em: <https://www.journals.elsevier.com/energy-and-buildings>.
256. Marziale, M.M., I., *O Factor de Impacto das Publicações Científicas*. 2002 DOI: 10.1590/S0104-11692002000400001
257. Bornmann, L., R. Haunschild, and S.E. Hug, *Visualizing the context of citations referencing papers published by Eugene Garfield: a new type of keyword co-occurrence analysis*. Scientometrics, 2018. **114**(2): p. 427-437 DOI: 10.1007/s11192-017-2591-8.
258. Lawlor, B., *The Age of Globalization: Impact of Information Technology on Global Business Strategies*. 2008, Bryant University.
259. Baron, S. and R. Russell-Bennett, *Editorial: beyond publish or perish: the importance of citations and how to get them*. Journal of Services Marketing, 2016. **30**(3): p. 257-260 DOI: 10.1108/jsm-02-2016-0092.
260. Nightingale, J.M. and G. Marshall, *Citation analysis as a measure of article quality, journal influence and individual researcher performance*. Radiography, 2012. **18**(2): p. 60-67 DOI: 10.1016/j.radi.2011.10.044.

261. Tahamtan, I., A. Safipour Afshar, and K. Ahamdzadeh, *Factors affecting number of citations: a comprehensive review of the literature*. *Scientometrics*, 2016. **107**(3): p. 1195-1225 DOI: 10.1007/s11192-016-1889-2.
262. Priberam. *Definição de autor*. 2020 [cited 2020 21/06/2020]; Disponível em: <https://dicionario.priberam.org/autor>.
263. Uddin, S., L. Hossain, A. Abbasi, et al., *Trend and efficiency analysis of co-authorship network*. *Scientometrics*, 2011. **90**(2): p. 687-699 DOI: 10.1007/s11192-011-0511-x.
264. Newman, M., *Coauthorship networks and patterns of scientific collaboration*. 2004 DOI: 10.1073/pnas.0307545100.
265. Zhong, B., H. Wu, H. Li, et al., *A scientometric analysis and critical review of construction related ontology research*. *Automation in Construction*, 2019. **101**: p. 17-31 DOI: 10.1016/j.autcon.2018.12.013.
266. Autodesk. *Revit | Software de BIM*. 2020 [cited 2020 22/06/2020]; Disponível em: <https://www.autodesk.pt/products/revit/overview?plc=RVT&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>.
267. Grant, M.J. and A. Booth, *A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies*. *Health Info Libr J*, 2009. **26**(2): p. 91-108 DOI: 10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x.

## ANEXOS

### ANEXO I – ARTIGO SUBMETIDO NO CONGRESSO PTBIM 2020

3º Congresso Português de *Building Information Modelling*  
26 e 27 de novembro de 2020, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

#### UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS BIM NA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS EDIFÍCIOS – ESTADO DE ARTE

**José Santos<sup>(1,2,\*), Patrícia Escórcio<sup>(1)</sup>, Vítor Pereira<sup>(3)</sup></sup>**

<sup>(1)</sup> Universidade da Madeira, Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Departamento de Engenharia Civil e Geologia, 9020-105 Funchal

<sup>(2)</sup> CONSTRUCT-LABEST, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto

<sup>(3)</sup> Universidade da Madeira (Mestrando)

<sup>(\*)</sup> [jmmns@fe.up.pt](mailto:jmmns@fe.up.pt)

#### Resumo

Na última década as exigências relativas à eficiência energética dos edifícios aumentaram substancialmente. Por sua vez, as ferramentas BIM têm permitido a realização de tarefas de otimização de soluções na fase de conceção que antes eram muito trabalhosas, assim como difíceis de conciliar. Neste artigo faz-se uma revisão bibliográfica sobre a utilização de ferramentas BIM com a finalidade de obter edifícios energeticamente mais eficientes. São identificados e analisados os tópicos mais relevantes sobre o tema, assim como identificadas as ferramentas BIM mais utilizadas. Constata-se que embora haja ainda muitos aspetos a melhorar, já é possível usar as ferramentas BIM para obter edifícios mais eficientes.

#### 1. Introdução

O setor da construção representa 40% do consumo total de energia na UE. Por isso, os diversos países estão a tomar medidas para que os novos edifícios tenham necessidades quase nulas de energia (NZEB) e os edifícios existentes se aproximem dos NZEB à medida que são reabilitados. A avaliação da eficiência energética dos edifícios é realizada através da comparação das propriedades térmicas dos elementos construtivos, da eficiência dos sistemas eletromecânicos e das necessidades energéticas dos edifícios, com valores de referência.

Neste contexto, dado que o modelo BIM tem, em princípio, todas as informações necessárias para as avaliações a realizar, coloca-se a questão de saber até que ponto as ferramentas BIM estão a ser usadas para este fim, de que forma e a sua eficiência. Assim, este artigo tem como objetivo, através da realização de uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de ferramentas BIM na avaliação da eficiência energética dos edifícios, responder a esta questão.

Para tal, na Secção 2 é exposta a metodologia seguida na realização deste trabalho, na Secção 3 é apresentado um resumo dos tópicos principais identificados na literatura e das ferramentas BIM existentes no contexto da eficiência energética, na Secção 4 são analisados em detalhe os tópicos identificados e, finalmente, na Secção 5 são apresentadas as conclusões obtidas.

## 2. Metodologia

Na elaboração deste trabalho foi seguida a metodologia indicada na Figura 1.

A pesquisa bibliográfica decorreu nas bases de dados: *Google Scholar*, *Science Direct*, *ASCE Library*, *ICE Virtual Library* e *Google* com os termos “*Building Information Modelling*”, “*Energy Efficiency*”, “*Energy performance*”, “*Green Building*” ou suas combinações, tendo resultado em cerca de 1350 documentos.

Seguidamente procedeu-se uma seleção dos artigos principais através da análise do resumo e conclusão dos mesmos, tendo sido excluídos os que de facto não se relacionavam com a utilização de BIM para realizar análises energéticas dos edifícios, seja sobre a forma de caso prático, artigo de desenvolvimento ou artigo de revisão, tendo resultado em cerca de 70 artigos. Note-se que houve muitos artigos de áreas com alguma sobreposição à analisada aqui, que abordam temas de elevado interesse como: a incorporação energética dos materiais de construção e gastos no seu fabrico (e não só os consumos do edifício ao longo da vida), os diversos impactes do edifício ao longo da vida (Avaliação do Ciclo de Vida) (e não só os consumos energéticos), análises que podem ser desenvolvidas com apoio de ferramentas BIM, mas que ultrapassam o âmbito deste artigo, e que por isso não foram considerados.

Posteriormente (ver Secção 3), os artigos selecionados foram analisados por completo, tendo em vista a identificação do tópico principal do artigo e das ferramentas BIM utilizadas. Após ponderação, selecionaram-se 16 tópicos e identificaram-se 18 ferramentas BIM.

Por último (ver Secção 4), para cada tópico identificado foi feito um breve resumo do trabalho desenvolvido e das conclusões obtidas pelos diversos autores.

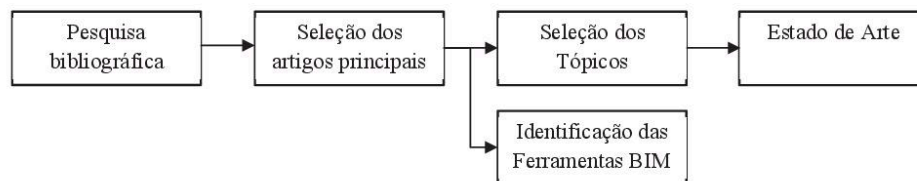


Figura 1: Metodologia.

## 3. Tópicos identificados na literatura e Ferramentas BIM

Durante a leitura dos artigos selecionados foram identificados os seus tópicos principais, assim como foi feita uma listagem das ferramentas BIM (software) existentes.

### 3.1 Tópicos identificados na literatura

Na Tabela 1 apresentam-se os tópicos principais selecionadas e os respetivos artigos. Estes são agregados em três grandes grupos:

- i) os que se focam na tecnologia BIM (Junção de nuvens de pontos do laser scanner com pontos da termografia, Interoperabilidade, Parâmetros IFC e Bibliotecas BIM);
- ii) os que se focam na eficiência energética (Conforto térmico, Certificação Energética, NZEB, Reabilitação de edifícios, Edifícios industriais, Análises ao nível da cidade);
- iii) os que se focam no uso BIM para eficiência energética (Identificação das melhores soluções

técnicas ao nível de materiais, janelas, fachadas, orientações, etc. tendo em vista a redução de consumos energéticos dos edifícios, Estimativa dos consumos energéticos dos edifícios, Utilização do BIM como plataforma para a visualização de resultados, Recolha de dados técnicos (geometria, materiais, etc.) para o cálculo de parâmetros e índices energéticos noutras plataformas, Desenvolvimento de software e plugins, Sensores e Monitorização, Ensino).

Tabela 1: Tópicos identificados na literatura

<b>Tópicos</b>	<b>Artigos</b>
Junção de nuvens de pontos do laser scanner e da termografia	[1-9]
Interoperabilidade	[10-15]
Parâmetros IFC / Bibliotecas BIM	[11, 14, 16, 17]
Conforto térmico	[18-23]
Reabilitação de edifícios	[6, 24-27]
Certificação Energética	[28-31]
Análises ao nível da cidade	[6, 32, 33]
NZEB	[14, 34, 35]
Edifícios industriais	[5, 36]
Comparação de soluções e otimização (materiais, janelas, fachadas, orientações, etc.)	[2, 23, 35, 37-48]
Estimativa de consumos	[34, 37, 43, 48-52]
Plataforma de visualização de resultados	[33, 49, 53-57]
Recolha de informação automática para / cálculos / índices / programação / simulações	[34, 40, 43, 50, 51, 58-60]
Ensino / Qualidade do ensino	[24, 61-63]
Desenvolvimento de software / plugins	[64, 65]
Sensores / Monitorização	[66]

### 3.2 Ferramentas BIM

Nas referências selecionadas foram utilizadas as seguintes ferramentas BIM: ArcGIS, Autodesk Ecotect Analysis (produto descontinuado), Autodesk Green Building Studio, Autodesk Insight, Autodesk Revit, Daysim, DesignBuilder, Energy Plus, eQUEST, Grasshopper 3D, IDA ICE, IES Virtual Environment, Rhinoceros 3D, Sefaira, SketchUp, Tally Environmental Impact Tool, TRNSYS, 6SigmaDC.

Constatou-se que na maioria das situações foi utilizada a ferramenta Autodesk Green Building Studio, o que se pode justificar por diversos motivos técnicos e/ou comerciais. Devido à limitação do número de páginas deste artigo não é possível desenvolver esta secção, no entanto refira-se que existem muitas outras ferramentas disponíveis, pelo que se recomenda a consulta de [67, 68] onde existe uma vasta lista de ferramentas disponíveis e organizadas por categorias.

#### 4. Estado de Arte de cada tópico identificado na literatura

Com base nos artigos indicados na Tabela 1 apresentam-se a seguir as ideias chave sobre cada um dos tópicos identificados na literatura. Devido à limitação do número de páginas apenas se abordam os 10 tópicos com mais artigos.

##### 4.1 Junção de dados laser scanner com dados da termografia

Neste tópico tem-se por objetivo juntar os dados das nuvens de pontos 3D com a termografia de modo a que cada ponto 3D do edifício contenha também, pelo menos, a informação da temperatura. Isto tem utilidade em edifícios existentes aparecendo, portanto, associada à reabilitação de edifícios.

Diversas soluções de software e hardware foram apresentadas para processar automaticamente os dois tipos de dados num único ficheiro (geralmente no formato gbXML). Refira-se que atualmente este trabalho deixou de ser necessário, uma vez que já existem laser scanners que incorporam a termografia, como o BLK360 da *Leica-Geosystems*.

Existem duas utilidades deste tópico: i) a calibração dos modelos BIM, dado que em muitos edifícios existentes se desconhece com rigor as propriedades térmicas dos materiais e influência das pontes térmicas, e ii) estimativa do coeficiente de transmissão térmica dos elementos. Sobre estes dois assuntos existe ainda pouco trabalho desenvolvido, em comparação com o apresentado no parágrafo anterior, esperando-se novas aplicações no futuro, uma vez que já existe conhecimento suficiente ao nível da calibração de modelos e diversos métodos indiretos de estimativa do coeficiente de transmissão térmica.

##### 4.2 Interoperabilidade

Neste tópico tem-se por objetivo que exista interoperabilidade não só entre ferramentas BIM na fase de projeto, mas também durante todo o ciclo de vida do edifício, de modo a que não haja perdas de informação e que toda a informação possa ser adequadamente usada em todas as ferramentas.

Foram encontrados dois tipos de trabalhos: i) os que apenas demonstram com casos práticos, através do uso de ferramentas existentes, todos os passos necessários, desde a modelação até aos consumos energéticos, para executar uma análise energética, e ii) os que desenvolvem *API* e/ou *plugins* que leem, tratam (adicionam, corrigem, etc.) a informação de uma dada ferramenta e a disponibilizam num formato capaz de ser lido por outra aplicação.

Espera-se que o formato IFC4 com a MVD *Energy Analysis View* possa melhorar a interoperabilidade entre ferramentas.

##### 4.3 Conforto térmico

O conforto térmico resulta da análise de seis parâmetros, dos quais dois dependem do indivíduo (atividade metabólica e resistência térmica da roupa) e os restantes quatro dependem da conceção do edifício (temperatura do ar, temperatura de radiação, humidade e velocidade do ar).

Neste tópico o objetivo passa por usar o modelo BIM para estimar os últimos quatro parâmetros acima referidos. Para tal, além das ferramentas BIM de modelação, que permitem estimar a radiação solar, o modelo BIM pode ser exportado para ferramentas de análise energética, para estimar a temperatura e humidade, assim como para ferramentas de dinâmica de fluidos (CFD)

para estimar a velocidade do vento (quando se usa ventilação natural). Deste modo é possível estimar os dois índices de conforto térmico ao longo de um ano, nomeadamente PMV e o PPD.

#### **4.4 Reabilitação de edifícios**

Neste tópico existem diversos objetivos: i) levantamento do edifício, recorrendo ao *laser scanner*, tratamento de nuvens de pontos para definição da geometria; ii) estudo das soluções ideais de reabilitação (portanto sem alteração da geometria) para casos concretos ou para casos genéricos (medidas tipo); iii) comparação de consumos (antes e depois da reabilitação) com o estimado nos modelos iniciais, iv) avaliação de soluções passivas versus soluções ativas, principalmente em edifícios históricos.

#### **4.5 Certificação Energética**

Neste tópico, além do que será referido na Secção 4.9 relativamente à possibilidade de obtenção automática de dados para usar no cálculo de índices energéticos e ambientais, refere-se que: i) no futuro as certificações energéticas e ambientais serão realizadas automaticamente através do modelo BIM e, ii) a existência de milhares de modelos BIM permitirá através de técnicas de *big data* melhorar a construção, a reabilitação e a própria certificação.

#### **4.6 Comparação de soluções e otimização**

Neste tópico a utilização do BIM tem como objetivo atingir a solução que dependa menos energia ao longo do ciclo de vida do edifício. Para tal existem três fases conceptuais: a elaboração do modelo BIM, exportação para um modelo BEM (*Building Energy Model*) e cálculo energético. Estas fases podem ser feitas num único software com recurso a plugins ou realizado em softwares diferentes.

As análises mais simples baseiam-se na: i) criação de diferentes cenários (soluções alternativas de materiais, janelas, fachadas, orientações, áreas, etc.), ii) cálculo dos consumos energéticos e iii) escolha da melhor solução. As análises mais avançadas envolvem alguma programação visual (ex: Dynamo, Grasshopper) ou programação por código, onde alguns parâmetros do edifício podem ser variáveis e onde são implementados algoritmos de otimização para atingir a melhor solução (normalmente o menor consumo energético), sendo os algoritmos mais utilizados atualmente baseados em Algoritmos Genéticos e/ou no Método de Monte Carlo.

#### **4.7 Estimativa de consumos**

Neste tópico o objetivo principal consistiu na explicação do processo de criação do modelo BIM e realização das análises energéticas, com o objetivo de demonstrar a facilidade com que atualmente os arquitetos, maioritariamente, podem usar estas ferramentas para numa fase preliminar obter edifícios mais eficientes. A ferramenta de simulação mais referida na literatura é o Autodesk Green Building Studio. Um dos inconvenientes é que estas ferramentas não incluem ainda normas portuguesas pelo que os seus resultados só podem ser analisados em termos comparativos ou qualitativos.

#### **4.8 Plataforma de visualização de resultados**

Neste tópico as ferramentas BIM são usadas em conjunto com outras ferramentas diferentes, como por exemplo: de planeamento urbano (SIG), de manutenção de edifícios, de projeto (térmico, ventilação, iluminação), etc. sendo que os resultados das previsões ou os resultados reais de consumos são mostrados em modelos BIM, para fácil perceção dos utilizadores.

Na maioria das situações esta visualização ocorre através da atribuição de diferentes cores a espaços e/ou objetos, sendo a informação transmitida ao modelo BIM através de parâmetros partilhados.

Sendo a visualização por cores apenas uma das formas de ver resultados e a troca de informações referida pouco robusta para grandes quantidades de informação, percebe-se que esta é uma área ainda em desenvolvimento, esperando-se novidades nos próximos anos, embora se reconheça que esta não é a função principal das ferramentas BIM clássicas.

#### **4.9 Recolha de informação automática para cálculos e parâmetros**

Neste tópico o objetivo principal passa pela redução do tempo necessário para a execução de tarefas que realizadas manualmente requereriam muitas horas de trabalho. Algumas das vantagens da maioria das ferramentas BIM é que é possível: transferir informação dinamicamente, interagir entre ferramentas, criar novas ferramentas, *APIs* ou *plugins*, programar dentro das próprias ferramentas com linguagens visuais, etc.

Ora, isto abre um campo de possibilidades extremamente vasto contribuindo para a proliferação de pequenos softwares e/ou plugins capazes de realizar tarefas muito específicas. Com o passar do tempo, os mais interessantes acabam por ser incorporados nas ferramentas BIM tradicionais. Desde modo, para o tema da eficiência energética dos edifícios observa-se: o desenvolvimento de múltiplos modelos de otimização (para minimização de consumos, obtenção de máxima classificação em índices *green*, etc.), a extração automática de informação para ferramentas próprias ou oficiais e a possibilidade de certificação energética.

#### **4.10 Ensino**

Neste tópico, além do que já foi referido na Secção 4.7 relativamente a diversos exemplos a explicar todo o processo de cálculo, constata-se uma muito baixa implementação do uso de ferramentas BIM para realização de cálculos energéticos dinâmicos pois não só as ferramentas são ainda relativamente recentes, como não era hábito dos arquitetos e engenheiros civis realizar tais cálculos, uma vez que os engenheiros mecânicos é que projetam o AVAC, mas que por sua vez ainda estão pouco vocacionados para o uso do BIM. Deste modo, é de salientar o projeto europeu BIMcert, que pretendeu ajudar a mitigar algumas destas deficiências.

### **5. Conclusões**

A avaliação da eficiência energética dos edifícios utilizando ferramentas BIM tem evoluído bastante nos últimos anos, esperando-se que a curto prazo a forma como arquitetos e engenheiros projetam os edifícios logo no início da sua conceção (onde as decisões fundamentais são tomadas) seja ambientalmente mais responsável.

Ao nível da tecnologia BIM têm-se registado evoluções importantes ao nível da recolha de nuvem de pontos e software, mas verificam-se ainda dificuldades ao nível da interoperabilidade.

Ao nível da eficiência energética, existem novas potencialidades, como a avaliação do conforto térmico, esperando-se que no futuro a certificação energética seja realizada automaticamente.

Ao nível do uso do BIM para avaliar e melhorar o desempenho energético dos edifícios, já é possível usar algumas ferramentas para, através da realização de múltiplas simulações, obter soluções otimizadas, ainda que os resultados possam não ser rigorosamente aplicáveis à realidade normativa portuguesa (clima, materiais, etc.).

### Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

### Referências

1. Lagüela, S., et al., *Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes*. Automation in Construction, 2013. 31: p. 230-240.
2. Roslan, R., et al., *Building Information Modelling (BIM) For Estimation of Heat Flux from Streetscape Material*. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2019. 9(1): p. 3520-3524.
3. Garwood, T.L., et al., *A framework for producing gbXML building geometry from Point Clouds for accurate and efficient Building Energy Modelling*. Applied Energy, 2018. 224: p. 527-537.
4. Cho, Y. and C. Wang, *3D Thermal Modeling for Existing Buildings Using Hybrid LIDAR System*, in *Computing in Civil Engineering (2011)*. 2011. p. 552-559.
5. Garwood, T.L., et al., *Geometry Extraction for High Resolution Building Energy Modelling Applications from Point Cloud Data: A Case Study of a Factory Facility*. Energy Procedia, 2017. 142: p. 1805-1810.
6. Gigliarelli, E., F. Calcerano, and L. Cessati, *Implementation Analysis and Design for Energy Efficient Intervention on Heritage Buildings*, in *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*. 2016. p. 91-103.
7. Ham, Y. and M. Golparvar-Fard, *Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling*. Automation in Construction, 2015. 49: p. 214-224.
8. Ham, Y. and M. Golparvar-Fard, *An automated vision-based method for rapid 3D energy performance modeling of existing buildings using thermal and digital imagery*. Advanced Engineering Informatics, 2013. 27(3): p. 395-409.
9. Wang, C. and Y.K. Cho, *Performance Evaluation of Automatically Generated BIM from Laser Scanner Data for Sustainability Analyses*. Procedia Engineering, 2015. 118: p. 918-925.
10. Muller, M.F., et al., *A systematic literature review of interoperability in the green Building Information Modeling lifecycle*. Journal of Cleaner Production, 2019. 223: p. 397-412.
11. Kim, J.B., et al., *Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation*. Automation in Construction, 2015. 50: p. 16-28.
12. Arayici, Y., et al., *Interoperability specification development for integrated BIM use in performance based design*. Automation in Construction, 2018. 85: p. 167-181.
13. O'Donnell, J., et al., *Transforming BIM to BEM: generation of building geometry for the NASA Ames sustainability base BIM*. 2013, LBNL-6033E, University of California, Berkeley.
14. Spindiglozzi, G., et al., *BIM-BEM support tools for early stages of zero-energy building design*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. 609: p. 072075.

15. Ying, H. and S. Lee, *An algorithm to facet curved walls in IFC BIM for building energy analysis*. Automation in Construction, 2019. 103: p. 80-103.
16. Maltese, S., et al., *Sustainability Assessment through Green BIM for Environmental, Social and Economic Efficiency*. Procedia Engineering, 2017. 180: p. 520-530.
17. Mahmoud, S., T. Zayed, and M. Fahmy, *Development of sustainability assessment tool for existing buildings*. Sustainable Cities and Society, 2019. 44: p. 99-119.
18. Habibi, S., *The promise of BIM for improving building performance*. Energy and Buildings, 2017. 153: p. 525-548.
19. Gan, V.J.L., et al., *BIM-based framework to analyze the effect of natural ventilation on thermal comfort and energy performance in buildings*. Energy Procedia, 2019. 158: p. 3319-3324.
20. Oduyemi, O. and M. Okoroh, *Building performance modelling for sustainable building design*. International Journal of Sustainable Built Environment, 2016. 5(2): p. 461-469.
21. Sultanguzin, I.A., et al., *Using of BIM, BEM and CFD technologies for design and construction of energy-efficient houses*. E3S Web Conf., 2019. 124: p. 03014.
22. Coakley, D., E. Corry, and M. Keane. *Validation of Simulated thermal comfort using a calibrated building energy simulation (BES) model in the context of building performance evaluation & optimisation*. in *13th Annual International Conference for Enhanced Building Operations (ICEBO)*. 2013. Energy Systems Laboratory, Texas A&M University.
23. He, B.-j., et al., *The combination of digital technology and architectural design to develop a process for enhancing energy-saving: The case of Maanshan China*. Technology in Society, 2014. 39: p. 77-87.
24. Latif, A.F., et al., *A Review on Energy Performance in Malaysian Universities Through Building Information Modelling (BIM) Adaptation*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. 291: p. 012033.
25. Capeluto, I.G. and C.E. Ochoa, *Simulation-based method to determine climatic energy strategies of an adaptable building retrofit façade system*. Energy, 2014. 76: p. 375-384.
26. Spiegelhalter, T., *Energy-efficiency Retrofitting and Transformation of the FIU-college of Architecture + The Arts into a Net-Zero-Energy-Building by 2018*. Energy Procedia, 2014. 57: p. 1922-1930.
27. Mytafides, C.K., A. Dimoudi, and S. Zoras, *Transformation of a university building into a zero energy building in Mediterranean climate*. Energy and Buildings, 2017. 155: p. 98-114.
28. Liu, Z., et al., *A feasibility study of Building Information Modeling for Green Mark New Non-Residential Building (NRB): 2015 analysis*. Energy Procedia, 2017. 143: p. 80-87.
29. Chen, P.-H. and T.C. Nguyen, *Integrating web map service and building information modeling for location and transportation analysis in green building certification process*. Automation in Construction, 2017. 77: p. 52-66.
30. Jalaei, F. and A. Jrade, *Integrating building information modeling (BIM) and LEED system at the conceptual design stage of sustainable buildings*. Sustainable Cities and Society, 2015. 18: p. 95-107.
31. Li, Y., et al., *Review of building energy performance certification schemes towards future improvement*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. 113.
32. Hong, T., et al., *Ten questions on urban building energy modeling*. Building and Environment, 2020. 168.

33. Niu, S., W. Pan, and Y. Zhao, *A BIM-GIS Integrated Web-based Visualization System for Low Energy Building Design*. *Procedia Engineering*, 2015. 121: p. 2184-2192.
34. Chen, S.Y., *Use of Green Building Information Modeling in the Assessment of Net Zero Energy Building Design*. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2019. 27(3): p. 174-186.
35. Najjar, M., K. Figueiredo, and A. Haddad, *Increasing energy efficiency of building envelopes towards nearly zero energy buildings integrating BIM and LCA*, in *LA SDEWES 2018 - 1st Latin American Conference on sustainable development of energy, water and environment systems*. 2018: Rio de Janeiro, Brasil.
36. Gourlis, G. and I. Kovacic, *Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – A case study*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. 68: p. 953-963.
37. Luziani, S. and B. Paramita, *Autodesk Green Building Studio an Energy Simulation Analysis in the Design Process*. *KnE Social Sciences*, 2019.
38. Sampaio, A.Z., L. Araújo, and E. Coelho, *Building Information Modelling Capability in an Energetic Simulation Perspective*, in *INCREaSE 2019 - International Congress on Engineering and Sustainability in the XXI Century*. 2019: Faro, Portugal. p. 465–477.
39. Abanda, F.H. and L. Byers, *An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling)*. *Energy*, 2016. 97: p. 517-527.
40. Chen, L. and W. Pan, *A BIM-integrated Fuzzy Multi-criteria Decision Making Model for Selecting Low-Carbon Building Measures*. *Procedia Engineering*, 2015. 118: p. 606-613.
41. Acosta, I., M.Á. Campano, and J.F. Molina, *Window design in architecture: Analysis of energy savings for lighting and visual comfort in residential spaces*. *Applied Energy*, 2016. 168: p. 493-506.
42. Marzouk, M., S. Azab, and M. Metawie, *BIM-based approach for optimizing life cycle costs of sustainable buildings*. *Journal of Cleaner Production*, 2018. 188: p. 217-226.
43. Rahmani Asl, M., et al., *BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization*. *Energy and Buildings*, 2015. 108: p. 401-412.
44. Chang, S., et al., *Framework for evaluating and optimizing algae façades using closed-loop simulation analysis integrated with BIM*. *Energy Procedia*, 2017. 143: p. 237-244.
45. Hamedani, M.N. and R.E. Smith, *Evaluation of Performance Modelling: Optimizing Simulation Tools to Stages of Architectural Design*. *Procedia Engineering*, 2015. 118: p. 774-780.
46. Hiyama, K., et al., *A new method for reusing building information models of past projects to optimize the default configuration for performance simulations*. *Energy and Buildings*, 2014. 73: p. 83-91.
47. Deepa, K., et al., *Energy Analysis Of Buildings*. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2019. 6(1): p. 1662-1666.
48. Shoubi, M.V., et al., *Reducing the operational energy demand in buildings using building information modeling tools and sustainability approaches*. *Ain Shams Engineering Journal*, 2015. 6(1): p. 41-55.
49. Cecchini, C., A. Magrini, and L. Gobbi, *A 3d platform for energy data visualization of building assets*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. 296: p. 012035.

50. Serra, E.G. and Z.R.P. Filho, *Methods for Assessing Energy Efficiency of Buildings*. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 2019.
51. Gao, H., et al., *BIM-based real time building energy simulation and optimization in early design stage*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. 556: p. 012064.
52. Singh, P. and A. Sadhu, *Multicomponent energy assessment of buildings using building information modeling*. Sustainable Cities and Society, 2019. 49.
53. Abaglo, A.J., C. Bonalda, and E. Pertusa, *Environmental Digital Model: Integration of BIM into environmental building simulations*. Energy Procedia, 2017. 122: p. 1063-1068.
54. Gerrish, T., et al., *BIM application to building energy performance visualisation and management: Challenges and potential*. Energy and Buildings, 2017. 144: p. 218-228.
55. Bonenberg, W. and X. Wei, *Green BIM in Sustainable Infrastructure*. Procedia Manufacturing, 2015. 3: p. 1654-1659.
56. Truong, H., et al., *Method for visualizing energy use in building information models*. Energy Procedia, 2017. 142: p. 2541-2546.
57. Motawa, I. and K. Carter, *Sustainable BIM-based Evaluation of Buildings*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013. 74: p. 419-428.
58. Shadram, F. and J. Mukkavaara, *An integrated BIM-based framework for the optimization of the trade-off between embodied and operational energy*. Energy and Buildings, 2018. 158: p. 1189-1205.
59. Ilhan, B. and H. Yaman, *Green building assessment tool (GBAT) for integrated BIM-based design decisions*. Automation in Construction, 2016. 70: p. 26-37.
60. Najjar, M., et al., *Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy efficient buildings*. Applied Energy, 2019. 250: p. 1366-1382.
61. McAuley, B., et al., *Delivering Energy Savings for the Supply Chain Through Building Information Modelling as a Result of the Horizon 2020 Energy BIMcert Project*, in *SEEDS 2019 - 5th International Conference SEEDS (Sustainable Ecological Engineering Design for Society)*. 2019: Ipswich, UK.
62. El-Diraby, T., T. Krijnen, and M. Papagelis, *BIM-based collaborative design and socio-technical analytics of green buildings*. Automation in Construction, 2017. 82: p. 59-74.
63. Doan, D.T., et al., *Examining Green Star certification uptake and its relationship with Building Information Modelling (BIM) adoption in New Zealand*. Journal of Environmental Management, 2019. 250.
64. Kamel, E. and A.M. Memari, *Automated Building Energy Modeling and Assessment Tool (ABEMAT)*. Energy, 2018. 147: p. 15-24.
65. Abdelalim, A., W. O'Brien, and Z. Shi, *Data visualization and analysis of energy flow on a multi-zone building scale*. Automation in Construction, 2017. 84: p. 258-273.
66. Aste, N., M. Manfren, and G. Marenzi, *Building Automation and Control Systems and performance optimization: A framework for analysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. 75: p. 313-330.
67. <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/>.
68. Mahmud, K., et al., *Computational tools for design, analysis, and management of residential energy systems*. Applied Energy, 2018. 221: p. 535-556.