



AMBIENTE CONSTRUÍDO E SEU DESEMPENHO

Maria Aparecida Hippert
Orlando Celso Longo
Manuela Almeida
(Organizadores)

AMBIENTE CONSTRUÍDO E SEU DESEMPENHO

Maria Aparecida Hippert
Orlando Celso Longo
Manuela Almeida
(Organizadores)



Juiz de Fora

2022

© Editora UFJF, 2022

Este livro ou parte dele não pode ser reproduzido por qualquer meio sem autorização expressa da editora. O conteúdo desta obra, além de autorizações relacionadas à permissão de uso de imagens ou textos de outro(s) autor(es), são de inteira responsabilidade do(s) autor(es) e/ou organizador(es).



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

REITOR

MARCUS VINICIUS DAVID

VICE-REITORA

GIRLENE ALVES DA SILVA



DIRETOR DA EDITORA UFJF

RICARDO BEZERRA CAVALCANTE

CONSELHO EDITORIAL

JORGE CARLOS FELZ FERREIRA (PRESIDENTE)

CHARLENE MARTINS MIOTTI

ELSON MAGALHÃES TOLEDO

EMERSON JOSÉ SENA DA SILVEIRA

JAIR ADRIANO KOPKE DE AGUIAR

MARIA LÚCIA DURIGUETTO

RAFAEL ALVES BONFIM DE QUEIROZ

RODRIGO ALVES DIAS

TAÍS DE SOUZA BARBOSA

PROJETO GRÁFICO, EDITORAÇÃO E CAPA

ALEXANDRE AMINO MAULER

REVISÃO

EQUIPE DA EDITORA UFJF

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFJF

Ambiente construído e seu desempenho / Maria Aparecida Hippert, Orlando Celso Longo, Manuela Almeida (organizadores.) -- Juiz de Fora: Editora UFJF, 2022.

Dados eletrônicos (1 arquivo: 5,44 mb)

ISBN 978-65-89512-42-4

1. Avaliação de desempenho (Arquitetura). 2. Desempenho de materiais de construção. 3. Eficiência energética. 4. NBR 15.575. I. Hippert, Maria Aparecida. II. Longo, Orlando Celso. III. Almeida, Manuela. IV. Título.

CDU: 72

Este livro obedece às normas do Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa, promulgado pelo Decreto n. 6.583 de 29 de setembro de 2008.



EDITORA UFJF

RUA BENJAMIN CONSTANT, 790

CENTRO - JUIZ DE FORA - MG - CEP 36015-400

FONE/FAX: (32) 3229-7646 / (32) 3229-7645

editora@ufjf.edu.br / distribuicao.editora@ufjf.edu.br

www.ufjf.br/editora

Filiada à ABEU



Associação Brasileira
das Editoras Universitárias

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	8
Maria Aparecida Hippert, Orlando Celso Longo, Manuela Almeida	
CAPÍTULO 1 – DESEMPENHO NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM BREVE HISTÓRICO	10
Maria Aparecida Hippert, Orlando Celso Longo, White José dos Santos	
INTRODUÇÃO	10
DESEMPENHO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	10
NORMA BRASILEIRA DE DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES – NBR 15.575	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
CAPÍTULO 2 – NORMA BRASILEIRA DE DESEMPENHO – NBR 15.575: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	15
Maria Aparecida Hippert, Vitor Dias Lopes Nunes, Sheila Faria, Aldo Ribeiro de Carvalho, Diana Fiori Rubim	
INTRODUÇÃO	15
METODOLOGIA	16
RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
CAPÍTULO 3 – SISTEMAS CONSTRUTIVOS E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SOB A ÓTICA DA NORMA DE DESEMPENHO	30
Juliana Daniela Carla Sabino dos Santos, White José dos Santos	
INTRODUÇÃO	30
NORMA DE DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES – NBR 15.575	31
PROGRAMA BRASILEIRO DE QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DO HABITAT - PBQP-H	33

SUMÁRIO

MATERIAIS	34
SISTEMAS CONSTRUTIVOS	37
VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO	38
ENSAIOS DE MATERIAIS	40
CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

CAPÍTULO 4 – DESEMPENHO E DETERIORAÇÃO DOS MATERIAIS POR AGENTES BIOLÓGICOS NAS EDIFICAÇÕES

Matheus Pereira Mendes, Iara Furtado Santiago, Maria Teresa Barbosa

INTRODUÇÃO	44
MICROORGANISMOS EM EDIFICAÇÕES	45
CONDICIONANTES PARA ESTABELECIMENTO DE MICROORGANISMOS	47
DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES E A OCORRÊNCIA DOS MICROORGANISMOS	50
CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

CAPÍTULO 5 – INVESTIGAÇÃO DA ESTANQUEIDADE NAS FACHADAS DAS EDIFICAÇÕES

Ana Flávia Ramos Cruz, Vicente Junio de Oliveira Rosse, Maria Teresa Barbosa

INTRODUÇÃO	59
ESTANQUEIDADE EM VEDAÇÕES VERTICAIS	60
MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA ESTANQUEIDADE DOS ELEMENTOS VERTICAIS	61
REPRESENTAÇÃO DE DANOS EM EDIFICAÇÕES	66

SUMÁRIO

CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

CAPÍTULO 6 – REQUISITOS TÉRMICOS, ACÚSTICOS E DE VENTILAÇÃO EM EDIFÍCIOS E SUA COMPATIBILIZAÇÃO 76

Sandra Monteiro da Silva, Luís Bragança

INTRODUÇÃO	76
QUALIDADE ACÚSTICA DO AMBIENTE INTERIOR	77
QUALIDADE TÉRMICA E EXIGÊNCIAS DE VENTILAÇÃO DO AMBIENTE INTERIOR	79
CONFORTO ACÚSTICO, HIGROTÉRMICO E REQUISITOS DE VENTILAÇÃO	93
RESUMO DAS EXIGÊNCIAS	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

CAPÍTULO 7 – O BIM E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE SBTOOL^{PT-H} 108

José Pedro Carvalho, Luís Bragança, Ricardo Mateus, Manuela Almeida

INTRODUÇÃO	108
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	109
METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE	111
O BUILDING INFORMATION MODELLING (BIM) E A SUSTENTABILIDADE	113
PROCESSO/METODOLOGIA	116
RESULTADOS	120
CONCLUSÕES	123

SUMÁRIO

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
CAPÍTULO 8 – AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ESCALA NA RENTABILIDADE DAS INTERVENÇÕES DE REABILITAÇÃO DO EDIFICADO COM O OBJETIVO NZEB	130
Manuela Almeida, Ricardo Barbosa, Adriane Silva	
INTRODUÇÃO	130
A REABILITAÇÃO À ESCALA URBANA COM O OBJETIVO NZEB	133
A HABITAÇÃO SOCIAL COMO CASO DE ESTUDO – O BAIRRO DE SANTA TECLA	135
ABORDAGEM METODOLÓGICA DA INVESTIGAÇÃO	138
RENTABILIDADE DAS INTERVENÇÕES DE REABILITAÇÃO ENERGÉTICA	144
CONCLUSÕES	149
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150
SOBRE OS ORGANIZADORES	154

O BIM E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE SBTOOL^{PT}-H

JOSÉ PEDRO CARVALHO

LUÍS BRAGANÇA

RICARDO MATEUS

MANUELA ALMEIDA¹

UNIVERSIDADE DO MINHO

INTRODUÇÃO

O setor de construção de edifícios é responsável por inúmeros impactos negativos no ambiente. A relação entre os problemas ambientais e este setor já foi comprovada e é aceita pela comunidade científica (DONG; NG, 2015; LI *et al.*, 2017; WONG; KUAN, 2014). Na União Europeia (UE), o setor é responsável por cerca de 40% do total de energia consumida e 33% das emissões de CO₂. Com o aumento das exigências por parte da sociedade por edifícios mais eficientes, confortáveis e sustentáveis, a eficiência energética tem vindo a ganhar especial relevância, principalmente devido ao fraco desempenho energético do edificado existente e à utilização irracional de energia (HORTA, 2012). Para responder a esta necessidade, as autoridades europeias e mundiais têm aprovado regulamentações e recomendações com vista à redução das necessidades energéticas dos edifícios.

No entanto, o setor da construção apresenta ainda outros impactos significativos e, de forma a que estes sejam avaliados ao nível de outras dimensões além do ambiente, diversas metodologias de avaliação da sustentabilidade têm surgido por todo mundo, com o objetivo de avaliar e certificar a sustentabilidade dos edifícios e de auxiliar a tomada de decisão das equipas de projeto (HAPIO; VIITANIEMI, 2008; MATEUS; BRAGANÇA, 2011). Estas metodologias caracterizam-se por avaliarem uma série de características das construções ao nível das três dimensões da sustentabilidade – Ambiente, Sociedade e Economia – e de agregarem os resultados num único valor ou classificação sustentável (MATEUS; BRAGANÇA, 2011). Contudo, os objetivos destas não correspondem à realidade

1 E-mail: jpcarvalho@civil.uminho.pt, braganca@civil.uminho.pt, ricardomateus@civil.uminho.pt, malmeida@civil.uminho.pt

atual, sendo que as metodologias, tipicamente, apenas são aplicadas nas fases finais de projeto, onde a possibilidade de introdução de medidas que aumentem a sustentabilidade das construções é quase nula ou inviável devido aos elevados custos associados. Além disso, a maioria dos parâmetros destas metodologias requer o conhecimento de vários fatores e a necessidade de se proceder a um conjunto de cálculos que, quando uma modificação é introduzida, têm de ser repetidos.

Aproveitando a mudança de paradigma do setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) que tem modernizado e automatizado os atuais processos construtivos, surge a oportunidade de integrar nesta mudança as metodologias de avaliação da sustentabilidade. Uma das tecnologias que mais se tem destacado é o *Building Information Modelling* (BIM), que se apresenta como a mais recente técnica para elaborar projetos e que trará benefícios para toda a sociedade em geral, para as equipas de projeto e para a eficiência dos edifícios (EASTMAN, 2011). Perante as potencialidades que o BIM oferece para a indústria da AEC, este tem sido cada vez mais utilizado com o objetivo de reduzir as necessidades energéticas e de água, os custos ou as emissões de CO₂ dos projetos de construção (MOTAWA; CARTER, 2013; SOLLA; ISMAIL; YUNUS, 2016).

Posto isto, os objetivos do presente capítulo passam por avaliar os parâmetros da categoria da eficiência energética (C3) da metodologia de avaliação da sustentabilidade de edifícios SBTool^{PT-H}, com uso da metodologia BIM. Para tal, um caso de estudo foi modelado numa plataforma BIM e exportado para ferramentas BIM específicas de simulação de desempenho energético. Os resultados foram posteriormente conectados à folha de cálculo do SBTool^{PT-H} e uma avaliação da categoria C3 foi alcançada. Propõe-se ainda uma possível integração do processo metodológico utilizado numa *Application Programming Interface* (API), de forma a simplificar e otimizar o processo de avaliação com uso do BIM.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética dos edifícios é um pilar essencial para a sustentabilidade da edificação. O conceito consiste na otimização da utilização de energia, sem comprometer a qualidade e conforto do ambiente interior, através da utilização de tecnologias eficientes e de soluções passivas e ativas de construção que otimizem a eficiência energética (HORTA, 2012; RUPARATHNA; HEWAGE; SADIQ, 2016).

O crescimento e desenvolvimento da sociedade tem levado a um aumento das exigências de conforto e, conseqüentemente, nos consumos energéticos das populações. De forma a dar resposta a esta procura, é necessário encontrar soluções que tenham em consideração os fatores energéticos e, que ao mesmo tempo, promovam o conforto das populações. Atualmente, os principais motivos que levam a um aumento no consumo de energético, estão diretamente ligados ao fraco desempenho do edificado existente, construído antes das primeiras regulamentações térmicas, bem como ao uso irracional de energia por parte dos seus ocupantes (HORTA, 2012). É, portanto, necessário atuar

efetivamente nos edifícios, nomeadamente nos principais componentes/áreas que influenciam as necessidades energéticas de uma habitação (DGEG, 2004):

- aumento do isolamento térmico dos elementos opacos da envolvente;
- eliminação de pontes térmicas na envolvente do edifício;
- eliminação da presença de humidade;
- aumento do desempenho térmico das janelas;
- introdução de proteções solares adequadas;
- eliminação da ventilação não controlada;
- educação e formação dos ocupantes.

Com o aumento das preocupações com os impactos do setor dos edifícios no ambiente, a eficiência energética dos edifícios tem vindo a ganhar cada vez mais relevância. Em 2002, a União Europeia decidiu, efetivamente, regulamentar a problemática com a publicação da *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) (EUROPEAN PARLIAMENT, 2010), revista em 2010, com o objetivo de criar um instrumento legislativo global para promover a eficiência energética do edificado europeu, bem como reforçar as exigências mínimas de conforto térmico relativamente à construção e reabilitação energética de edifícios, certificação energética e aplicação de sistemas de energias renováveis. Em sua revisão, além da retificação das exigências mínimas, foi ainda introduzido o conceito de *Zero Energy Buildings*, que segundo a mesma diretiva é um

[...] edifício com necessidades quase nulas de energia (nearly ZEB) (...) com um desempenho energético muito elevado (...). As necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades (EUROPEAN PARLIAMENT, 2010).

Esta definição é considerada por vários autores como um pouco vaga, pois não impõe quaisquer tipos de limites, não fornece uma metodologia de cálculo e não define a percentagem de energia que deve ser proveniente de fontes renováveis, cabendo essa tarefa a cada Estado Membro, tornando o objetivo de criar uma definição comum quase impossível (AELENEI *et al.* 2013; SOUSA; SILVA; ALMEIDA, 2012).

A EPDB foi transcrita para o quadro legal português em 2013, através da aprovação de um novo pacote legislativo que atualizou e reforçou os três regulamentos existentes: o Decreto-Lei nº 118/2013, de 20 de Agosto, que contém o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) (MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO, 2013).

Com a aplicação destes regulamentos, o governo português ambiciona atingir as metas estabelecidas pela UE, reduzindo a fatura energética dos edifícios, aumentando e preservando a qualidade do ambiente interior e reduzindo os impactos no meio ambiente (TAVARES, 2013).

METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

Perante o aumento das preocupações com os impactos do setor dos edifícios, surgiu a necessidade de os avaliar e quantificar. Assim, durante os últimos 20 anos, várias organizações governamentais e privadas desenvolveram metodologias de avaliação da sustentabilidade (MAS) de edifícios por todo o mundo (MATEUS; BRAGANÇA, 2011).

As MAS caracterizam-se por avaliarem um número de características dos edifícios e agregarem os resultados numa avaliação ambiental ou nível de sustentabilidade (MATEUS; BRAGANÇA, 2011). Estas têm como principais objetivos implementar e divulgar medidas sustentáveis em projetos de construção, avaliar e monitorizar o desempenho dos edifícios e recolher informação para auxiliar a tomada de decisão nas diferentes fases de projeto (HAAPIO; VIITANIEMI, 2008; MATEUS; BRAGANÇA, 2011). Permitem ainda a oportunidade para que as equipas de projeto demonstrem os benefícios ambientais, económicos e sociais dos seus edifícios para as comunidades locais (WONG; ZHOU, 2015).

Algumas MAS foram desenvolvidas com o propósito de serem aplicadas por todo o mundo, enquanto outras foram desenvolvidas especificamente para serem adaptadas as características ambientais, económicas e socioculturais de determinadas regiões (HAAPIO; VIITANIEMI, 2008; KAMARUZZAMAN *et al.*, 2016). Contudo, todas elas necessitam ser práticas, transparentes, flexíveis e estar em constante desenvolvimento para que possam se adaptar a diferentes edifícios e à evolução tecnológica (MATEUS; BRAGANÇA, 2011).

A primeira MAS, a BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) surgiu em 1990 no Reino Unido e foi desenvolvida pelo BRE (*Building Research Establishment*). Esta, juntamente com o SBTool (*Sustainable Building Tool*), desenvolvido pela iiSBE (*International Initiative for a Sustainable Built Environment*) e com a LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), desenvolvida pela USGBC (*United States Green Building Council*), constituem a base de todas as outras metodologias utilizadas pelo mundo (KAMARUZZAMAN *et al.*, 2016; MATEUS; BRAGANÇA, 2011).

SBTOOL^{PT-H}

O SBTool foi desenvolvido e promovido pela organização internacional sem fins lucrativos iiSBE com o objetivo principal de criar um sistema flexível de avaliação de desempenho ambiental de edifícios que permita a sua adaptação a nível local e regional. Uma das versões personalizadas introduzida em Portugal, foi a transcrição e adaptação da metodologia internacional para a realidade dos edifícios residenciais portugueses – SBTool^{PT-H} – pela delegação iiSBE Portugal, que contou ainda com a colaboração do Laboratório de Física e Tecnologia das Construções da Universidade do Minho e da empresa Ecochoice. A metodologia SBTool^{PT-H} foi desenvolvida com os seguintes objetivos (MATEUS; BRAGANÇA, 2011):

- avaliar e certificar a sustentabilidade de edifícios novos, existentes e renovados, situados principalmente em zonas urbanas;
- apoiar as equipes de projeto desde as etapas preliminares de projeto;
- consciencializar os diversos decisores do mercado da construção para a adoção de soluções mais sustentáveis.

A avaliação através do SBTool^{PT-H} baseia-se na análise de 25 parâmetros, distribuídos por 9 categorias nas 3 dimensões da construção sustentável (Tabela 1). Cada parâmetro tem um peso diferente, de acordo com os regulamentos e práticas nacionais e lhe é atribuída uma classificação quantitativa que resulta da comparação entre dois *benchmarks* (níveis de referência): melhor prática e prática convencional. Posteriormente, cada classificação é normalizada de forma a estabelecer um valor adimensional, para evitar problemas do tipo “quanto maior melhor” ou “quanto maior pior” e para evitar os efeitos de escala na agregação dos parâmetros. Na classificação normalizada, 0 corresponde à prática convencional e 1 à melhor prática. Esta classificação é ainda convertida numa escala qualitativa que varia de E a A+, onde D corresponde à prática convencional e A à melhor prática.

Tabela 1 – Categorias do SBTool^{PT-H}

Dimensão	Categoria	Número de parâmetros	Peso da dimensão (%)
Ambiente	C1 – Alterações climáticas e qualidade do ar exterior	1	40
	C2 – Uso de solo e biodiversidade	5	
	C3 – Energia	2	
	C4 – Materiais e resíduos sólidos	5	
	C5 – Água	2	
Sociedade	C6 – Conforto e saúde dos utilizadores	5	30
	C7 – Acessibilidade	2	
	C8 – Sensibilização e educação para a sustentabilidade	1	
Economia	C9 – Custos de ciclo de vida	2	30

Fonte: adaptado de CARVALHO *et al.* (2019)

Após a conclusão da quantificação individual de todos os parâmetros de avaliação, estes são agregados ao nível de cada categoria e de cada dimensão e, é atribuída uma classificação sustentável ao edifício, através da emissão de um certificado de sustentabilidade para o projeto (MATEUS; BRAGANÇA, 2011).

No que diz respeito à eficiência energética, o SBTool^{PT-H} considera dois parâmetros (*P7 – Consumo de energia primária não-renovável na fase de utilização* e *P8 – Quantidade de energia que é produzida no edifício através de fontes renováveis*) para avaliar a eficiência dos edifícios, inseridos na categoria C3 – Energia. O método de cálculo de ambos é baseado no REH, forçando os projetistas a realizar diversos e morosos cálculos para obter a informação necessária à sua avaliação.

Atualmente, em Portugal, o SBTool conta também com versões para edifícios hospitalares, de comércio e para áreas urbanas (BRAGANÇA; MATEUS, 2017; CASTRO; MATEUS, BRAGANÇA, 2017).

O BUILDING INFORMATION MODELLING (BIM) E A SUSTENTABILIDADE

De forma a responder ao aumento da procura por edifícios e processos mais eficientes, ecológicos e sustentáveis, diversas metodologias e tecnologias têm surgido para auxiliar as equipas de projeto a otimizar os seus projetos (BRYDE; BROQUETAS; VOLM, 2013). Dentre elas, destaca-se o *Building Information Modelling* (BIM), que apesar da sua recente implementação, já tem vindo a modificar o atual cenário de projetar e construir edifícios. O BIM caracteriza-se por um conjunto de políticas, processos e tecnologias que concebem uma metodologia de trabalho capaz de gerir toda a informação de um projeto e o seu desenho 3D, num modelo virtual, ao longo de todo o ciclo de vida da construção (SUCCAR, 2009). Esta mudança de paradigma trará impactos e benefícios, não só para o setor da construção, mas também para a sociedade em geral, como melhores construções, que requerem menos recursos e que operam de forma mais eficiente (EASTMAN, 2011).

A aplicação do BIM na Sustentabilidade passa por idealizar propostas eficientes para novas formas de arquitetura e engenharia, tentando sempre preservar o meio ambiente e os diversos ecossistemas, visando um novo modo de vida, uma nova educação ambiental e uma nova visão geral do impacto do desenvolvimento humano no planeta. Através da sobreposição e agrupamento de informação multidisciplinar num único modelo, o BIM cria uma excelente oportunidade para incorporar medidas sustentáveis ao longo de um projeto (AZHAR *et al.*, 2011). Adicionalmente, permite ainda a rápida verificação de incompatibilidades, melhora a colaboração e a comunicação entre os diversos intervenientes num projeto, reduz tempos e minimiza custos (JALAEI; JRADE, 2015; MOTAWA; CARTER, 2013). Segundo Azhar *et al.* (2010), as fases de projeto e pré-construção, são as principais fases onde se devem tomar decisões acerca da introdução de medidas sustentáveis nos projetos. Sendo estas também as fases onde o BIM pode mais contribuir para um projeto, torna-se clara a influência que o BIM pode ter na construção de edifícios mais sustentáveis.

Em 2008, Krygiel e Nies, listaram os principais aspetos em que o BIM pode contribuir para melhorar o nível de sustentabilidade de um projeto (KRYGIEL; NIES, 2008):

- apoio na orientação do edifício;
- redução da massa/peso do edifício;
- realização de análises de iluminação natural e artificial;
- reutilização de água;
- estimativa da produção de energia renovável;
- modelação energética;
- introdução de materiais sustentáveis.

A metodologia BIM pode também contribuir em outros aspetos que podem ser relacionados com questões sustentáveis, como a produção automática de mapas de quantidades e orçamentos, a redução da utilização e otimização de recursos e a gestão de resíduos provenientes da construção e demolição (GÖKGÜR, 2015).

Com recurso às capacidades e potencialidades do BIM, as equipas de projeto têm uma preciosa ferramenta para auxiliar a tomada de decisão, com base em informação detalhada sobre diferentes cenários de reabilitação, de soluções construtivas, de sistemas de climatização, de orientações e de materiais, de forma a que possam selecionar o melhor *design* e soluções que otimizem a eficiência energética, a produção de energia e, conseqüentemente, a sustentabilidade de um projeto, numa fase preliminar, com poucos recursos humanos e financeiros e em pouco tempo. Um estudo de Azhar *et al.* (2011), provou que a utilização do BIM com o objetivo de desenvolver edifícios mais sustentáveis, pode gerar economias significativas no custo total da obra ao longo de um período de 10 anos, traduzindo-se em economia de aproximadamente 20% no caso da *University of South Carolina Campus*. Um outro projeto que utilizou o BIM para a construção de um edifício mais sustentável – *Shangai Tower* – permitiu não só a introdução de sistemas de energia renovável e reutilização de água, bem como a utilização de menos 32% de materiais de construção quando comparado com uma tipologia de edifício semelhante. Esta redução, deu-se graças à otimização do *design* do edifício, onde foi possível diminuir em 15% as necessidades de vidro e em 24% a carga do vento, o que levou à utilização de menos aço na estrutura (CASSINO *et al.*, 2010).

Através do modelo virtual e da interoperabilidade entre diversos programas de simulação e modelação, o BIM permite que os projetistas realizem diferentes tipos de análises e estimativas durante as fases iniciais de projeto: análises de desempenho energético, análises acústicas, identificação de padrões solares, introdução de energias renováveis, estimativa do consumo de água, gestão de resíduos e recursos, seleção de materiais, entre outros (LU *et al.*, 2017; MOTAWA; CARTER, 2013). Estas análises, realizam-se sobretudo em ferramentas BIM – programa que só realiza um tipo de análise específica – utilizadas através da exportação do modelo virtual da plataforma de modelação nos formatos *Industry Foundation Classes* (IFC) – plataforma neutra baseada em objetos que descreve dados da indústria de construção civil (já registado pela ISO) – e *Green Building XML* (gbXML) – mais utilizado para partilha de informação para análises de sustentabilidade e térmicas, dada a sua capacidade de incorporar informação térmica descritiva do modelo (ABANDA; BYERS, 2016; EL-DIRABY; KRIJNEN; PAPAGELIS, 2017).

Apesar de todas as vantagens, os programas BIM ainda não estão orientados para a construção sustentável (CARVALHO; BRAGANÇA; MATEUS, 2019). Apesar de alguns já considerarem questões da sustentabilidade, estes ainda não contemplam a maioria, nem a totalidade dos pilares da construção sustentável. Além da necessidade de sensibilizar as equipas de projeto e os donos de obra para estas questões, é necessário que os programas BIM contemplem ainda mais aspetos relativos à sustentabilidade, é necessário maturar os processos utilizados e melhorar a interoperabilidade entre os diversos programas, bem como os respetivos formatos de partilha de informação (AZHAR *et*

al., 2011; KAMARUZZAMAN *et al.*, 2016; RAFFEE; HASSAN; KARIM, 2015). No entanto, é consensual que o BIM já se apresenta como uma importante ferramenta para as equipes de projeto e para os edifícios, gerando economias e benefícios significativos.

Prova disso é a importância dada pela UE ao paradigma do BIM, que promoveu o desenvolvimento de uma norma BIM europeia, onde Portugal se encontra representado pela CT197, Comissão Técnica delegada pelo Instituto Português da Qualidade. Outro avanço, foi o financiamento do projeto de investigação BIMcert (<http://www.energybimcert.eu>) ao abrigo do programa H2020. Este, pretende desenvolver um conjunto de ferramentas BIM, que permitirá que as equipes de projeto, geograficamente dispersas, usem esta metodologia para melhorar a colaboração e a troca de informação com o objetivo de testar abordagens BIM para a elaboração de edifícios verdes e passivos, de forma a contribuir para a melhoria da eficiência energética do edificado europeu.

BUILDING ENERGY MODELLING (BEM)

No que diz respeito à eficiência energética, o BIM já vem sendo utilizado na otimização do desempenho energético dos edifícios – *Building Energy Modelling* (BEM) (GARWOOD *et al.*, 2018; GOURLIS; KOVACIC, 2017; GUZMÁN GARCIA; ZHU, 2015), tendo já sido alvo de vários estudos e os benefícios da sua utilização comprovados. Atualmente, existe uma série de ferramentas BIM que permitem que as equipes de projeto obtenham informação importante para suportar as tomadas de decisão em fases relativamente iniciais de um projeto. Assim, é possível comparar o desempenho de diferentes soluções construtivas e melhorar a eficiência energética de um edifício, muito antes da sua construção ou reabilitação. Consequentemente, é possível diminuir os custos de operação e emissões do edifício, ao mesmo tempo que se aumenta o conforto e o bem-estar dos ocupantes, sem a utilização de muitos recursos.

Relativamente aos atuais desenvolvimentos e investigações na área, Azhar e Brown (2009) utilizaram as ferramentas de simulação *Autodesk Green Building Studio* (GBS), *Autodesk Ecotec* (descontinuado) e *Integrated Environmental Solutions Virtual Environment* (IESVE), para avaliar uma série de créditos da metodologia de avaliação da sustentabilidade LEED. Algumas das conclusões identificaram o IESVE como “*aparentemente o mais versátil e poderoso em termos de capacidade de análise*”, enquanto que apontou o GBS como um dos menos capazes, dada a falta de certo tipo de análises sustentáveis. Um estudo de revisão realizado por Lu *et al.* (2017) comparou o tipo de análises realizadas por 12 ferramentas de simulação de desempenho energético. Novamente, em destaque, o IESVE e o GBS foram identificados como os mais abrangentes, apresentando diferenças no que toca aos utilizadores finais. Enquanto o GBS é mais indicado para Arquitetos e Designers, o IESVE é ainda indicado para Engenheiros e Proprietários, o que demonstra a sua maior aplicabilidade.

Kim *et al.* (2015) desenvolveram uma aplicação BIM para a base de dados do *Modelica*, com o objetivo de representar a semântica de objetos BIM. Desta forma, tornaram possível a conversão dos atributos dos modelos na plataforma *Autodesk Revit*, como a tipologia, a geometria ou os

materiais do edifício, em parâmetros de introdução para a realização de simulações energéticas no *Modelica*, melhorando a interoperabilidade entre ambos os programas. Apesar dos bons resultados alcançados, os autores reconheceram algumas diferenças nos resultados, quando confrontados com o sistema de validação – *The Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) Modelica Buildings Library*, validado através da *ANSI/ASHRAE Standard 140-2007*. Gourlis, Kovacic (2017) aumentaram a parada, com a realização de análises energéticas a edifícios industriais, utilizando o *EnergyPlus*. Concluíram que a abordagem BIM ainda não está suficientemente madura e que é ainda necessário despende algum tempo e assumir parâmetros para as simulações. De qualquer forma, foi possível realizar as análises pretendidas e otimizar a eficiência energética do edifício, produzindo economias de elevado impacto.

Um estudo elaborado por Carvalho; Silva; Mateus (2016) utilizou o GBS e o *DesignBuilder* no processo de reabilitação energética de um edifício residencial. Através da simulação de vários cenários de reabilitação, foi possível comparar diferentes soluções construtivas, bem como os resultados das duas ferramentas. Além de se ter conseguido otimizar o desempenho energético ao nível dos vários elementos da envolvente do edifício, concluiu-se que a principal potencialidade do BIM está no apoio à tomada de decisão dos projetistas nas fases mais precoces de projeto. Contudo, nenhuma das ferramentas anteriores se revelou adequada para a simulação do desempenho de edifícios portugueses, dada a disparidade dos métodos de cálculo com a legislação portuguesa (REH). Assim, recomenda-se que seja utilizado o *CYPETHERM REH*, cujo método de cálculo é baseado no REH e considera os requisitos mínimos nele definidos.

Uma conclusão comum a todos os estudos na área, aponta a existência de uma falha de interoperabilidade entre plataformas de modelação e ferramentas BIM, sendo necessário proceder à melhoria dos formatos de partilha, de modo a não perder informação durante a exportação/importação do arquivo (KIM *et al.*, 2016; OLAWUMI; CHAN, 2018).

PROCESSO/METODOLOGIA

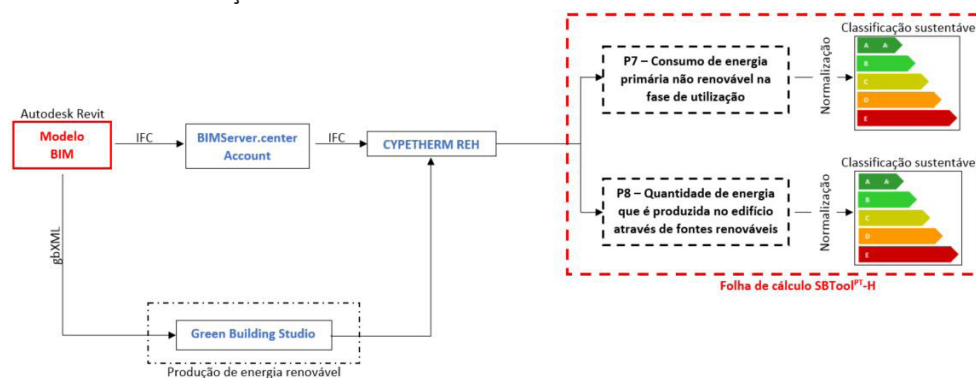
O principal objetivo deste estudo passa pela utilização do BIM para a otimização do desempenho energético de um edifício e posterior avaliação de uma metodologia de avaliação da sustentabilidade – SBTool^{PT-H}.

De forma a realizar esta análise, foi definido um caso de estudo representativo de uma parte do edificado português e modelado com apoio da plataforma BIM *Autodesk Revit*. Posteriormente, o modelo BIM foi exportado para o *CYPETHERM REH* através de IFC para realizar simulações de desempenho energético. O processo de exportação teve por base a utilização do *plug-in* existente do *BIMServer.center*, que atuou como plataforma intermediária entre o *Autodesk Revit* e o *CYPETHERM REH*. No entanto, visto que para realizar simulações nesta ferramenta de análise, além da informação proveniente do *Autodesk Revit*, é ainda necessário ter conhecimento da produção aproximada de energia renovável no edifício, foi necessário exportar o modelo para o GBS. O GBS foi selecionado

dada a existência de um *plug-in* para o *Autodesk Revit* e dada a facilidade de estimar a produção de energia renovável. Após introdução e ajuste de toda a informação no *CYPETHERM REH*, é realizada a simulação do desempenho energético do edifício.

Os resultados obtidos são posteriormente utilizados para a avaliação da categoria de eficiência energética do SBTool^{PT-H}, que é composto pelos parâmetros *P7 – Consumo de energia primária não-renovável na fase de utilização* e *P8 – Quantidade de energia que é produzida no edifício através de fontes renováveis*. De forma a demonstrar o processo de otimização, a simplicidade de efetuar alterações no edifício e o suporte à tomada de decisão potenciadas pelo BIM, as soluções construtivas do edifício foram modificadas e melhoradas e uma nova simulação realizada. Todo este processo, encontra-se resumido na Figura 1.

Figura 1 – Procedimento de simulação

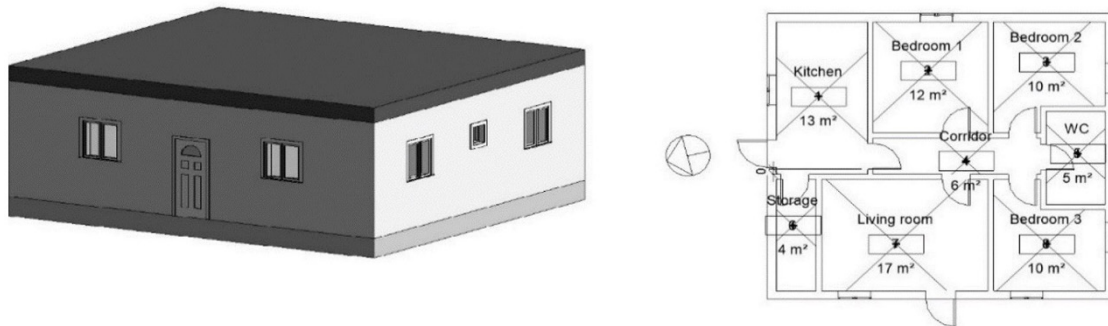


Fonte: adaptado de CARVALHO *et al.* (2019)

A avaliação dos parâmetros do SBTool^{PT-H}, consiste, para o parâmetro P7 na comparação das necessidades de energia primaria do edifício (N_{tc}) – fornecidas pelo *CYPETHERM REH* – com dois *benchmarks*: prática convencional portuguesa (N_t) – também fornecida pelo *CYPETHERM REH* – e melhor prática ($0.25 \times N_t$). No caso do parâmetro P8, a energia renovável produzida no edifício – fornecida pelo GBS – será também comparada com dois *benchmarks*: prática convencional portuguesa (produção de energia renovável que suporte 50% das necessidades para aquecimento de águas sanitárias) e melhor prática (produção de energia renovável que suporte 90% das necessidades totais de energia primária) – ambos fornecidos pelo *CYPETHERM REH*.

Relativamente ao caso de estudo, é necessário que ter em consideração a área de aplicação do SBTool^{PT-H} – edifícios residenciais portugueses, maioritariamente situados em área urbanas – e que seja representativo de uma parte do edificado português. Assim, modelou-se uma habitação unifamiliar, apresentada na Figura 2, localizada em Braga, Portugal, com uma área útil de 75 m² e 6.3 m² de área envidraçada. Os coeficientes de transmissão térmica (U) e as taxas de renovação de ar adotadas, encontram-se descritas na Tabela 2. As características dos materiais foram definidas de acordo com o ITE 50 (LNEC, 2006) e a eficiência dos sistemas (aquecimento, arrefecimento, águas quentes sanitárias e produção de energia renovável) foi mantida constante em todas as simulações.

Figura 2 – Modelo de simulação



Fonte: Autores (2019)

Tabela 2 – Parâmetros de simulação

Ventilação Natural		
R_{phi}		0.4
R_{phv}		0.6
Elemento	Coeficiente de Transmissão Térmica - U (W/(m ² °C))	
	Referência	Otimizado
Paredes Exteriores	0.39	0.34
Paredes Interiores	1.59	1.59
Laje de Piso	0.35	0.32
Laje de Esteira	0.35	0.31
Janela – Vidro	2.00	1.50
Janela – Caixilharia	2.50	1.80
Portas Exteriores	2.00	1.50
Portas Interiores	2.50	2.00

Fonte: Autores (2019)

GREEN BUILDING STUDIO

Antes de se proceder à realização das simulações no CYPETHERM REH, é necessário estimar a quantidade de energia renovável que pode ser produzida no edifício. Para tal, exportou-se o modelo BIM para o GBS através do *plug-in* existente no *Autodesk Revit*. A única informação requerida pelo programa, diz respeito ao tipo e preço do painel fotovoltaico a introduzir, o custo da energia local e, por fim, o período de retorno pretendido. O próprio GBS já considera a geometria importada do *Autodesk Revit* e estima a produção de diferentes áreas de painéis colocados na cobertura.

Os resultados da análise, apresentados na Tabela 3, mostram que é possível produzir um máximo aproximado de 3262 kWh/ano através de 19 m² de painéis fotovoltaicos do tipo *Single*

Crystalline com 13.8% de eficiência. Para efeitos de cálculo no *CYPETHERM REH*, será adotada uma área de painéis de 11 m², com a capacidade de produzir 1933 kWh/ano, o que se traduz em economia de 387 €/ano.

Tabela 3 – Produção de energia renovável – Green Building Studio

Área do painel (m ²)	Exposição solar	Obstruções	Energia Anual (kWh/ano)	Poupanças potenciais	
				Ano/m ²	Ano
5	64.1%	0	892	35,09 €	€ 178
8			1 390		€ 278
11			1 933		€ 387
14			2 525		€ 505
19			3 262		€ 652

Nota: Custo da energia local: 0,20 €/kWh

Fonte: Autores (2019)

CYPETHERM REH

Na posse da informação anterior, é agora possível iniciar o processo de simulação no *CYPETHERM REH*. O processo começa com a exportação do modelo BIM desde o *Autodesk Revit* para a plataforma *BIMServer.center* através do *plug-in Open BIM*. Seguidamente, já no *CYPETHERM REH*, inicia-se um novo projeto através da importação do modelo BIM da mesma plataforma. Cabe realçar a importância de definir o diretório da biblioteca de materiais do *Autodesk Revit*, de maneira a que as características dos materiais, representativas do edificado português e de acordo com o ITE 50, sejam também importadas para a ferramenta de simulação.

Após a importação do modelo, inicia-se a fase de verificação das características importadas do edifício. Antes de mais nada, é necessário definir a localização do edifício (caso não tenha sido importada) no mapa de Portugal, a altitude a que se encontra e a distância à costa. Seguidamente, verificam-se e corrigem-se, se necessário, as características dos vários elementos do edifício, desde as paredes exteriores e interiores, lajes e vãos exteriores e interiores. Parâmetros como os coeficientes de absorção, tipologia de soluções, dispositivos de sombreamento e algumas características dos envidraçados, muito provavelmente não foram possíveis de definir no *Autodesk Revit* e, devem por isso, ser estabelecidos. Posteriormente, é necessário caracterizar os sistemas de aquecimento, arrefecimento, águas quentes sanitárias (AQS) e produção de energia presentes no edifício. É nesta fase em que se introduz a quantidade de energia produzida a partir de fontes renováveis, anteriormente calculada no GBS. Por fim, é necessário definir o método de cálculo para as pontes térmicas lineares, automaticamente reconhecidas pelo programa, dada a modelação paramétrica efetuada no *Autodesk Revit*. Para o presente caso, foram selecionados os valores simplificados definidos no REH.

RESULTADOS

Neste estudo foram simulados dois cenários para o edifício, em que o segundo resultou da otimização dos coeficientes de transmissão térmica da envolvente. Esta otimização deu-se através do aumento/troca do isolamento térmico no *Autodesk Revit*, que foi automaticamente atualizado no *CYPETHERM REH*, demonstrando a facilidade em comparar diferentes soluções.

Os resultados das simulações – necessidades de aquecimento (N_{ic}), de arrefecimento (N_{vc}), de energia primária (N_{tc}) e de AQS (Q_a), bem como os respetivos limites – para o modelo de referência e para o modelo otimizado, apresentam-se na Tabela 4. As diferenças entre os dois modelos produziram uma redução de quase 7 kWh/m².ano nas necessidades de aquecimento e de 0,29 kWh/m².ano nas necessidades de arrefecimento, apenas através da otimização da envolvente do edifício. Ambos os modelos, atingiram a classificação energética A, resultante da equação N_{tc}/N_t , de acordo com o método de cálculo preconizado no REH.

Tabela 4 – Resultados CYPETHERM REH

Modelo	N_{ic} (kWh/m ² .ano)	N_{vc} (kWh/m ² .ano)	N_{tc} (kWh _{PE} /m ² .ano)	Q_a (kWh/ano)
Referência	46.71	4.50	46.44	2139.45
Otimizado	39.82	4.21	40.71	
Valor limite	N_i (kWh/m ² .ano)	N_v (kWh/m ² .ano)	N_t (kWh _{PE} /m ² .ano)	
	56.41	8.01	138.39	

Fonte: Autores (2019)

Com esta informação, é possível exportar os dados para a folha de cálculo do SBTool^{PT-H}, de maneira a avaliar os parâmetros P7 e P8.

Para atingir este mesmo ponto, com o procedimento tradicional, seriam necessários uma série de cálculos e um moroso processo de identificação de toda a informação de cálculo (área útil do edifício, área dos elementos, orientação, coeficientes de transmissão térmica, conexões, entre outros), bem como os parâmetros definidos no REH. Adicionalmente, seria ainda necessário calcular as pontes térmicas e definir todos os sistemas manualmente. Com a utilização do BIM, toda esta informação foi acessada com muito mais rapidez, além da definição automática de parâmetros de simulação e identificação das características dos elementos construtivos.

PARÂMETRO 7

Para a avaliação do parâmetro P7 – *Consumo de energia primária não-renovável na fase de utilização*, procedeu-se à comparação das necessidades de energia primária do edifício (P_{ENR}), com

a prática nacional (P_{ENR^*}) e melhor pratica (P_{ENR}^*), para ambos os modelos, referência e otimizado (Figura 3). A avaliação sustentável dos modelos encontra-se na Tabela 5.

Figura 3 – Parâmetro 7 – Resultados para o modelo de referência e otimizado

	T	Nº F	Ap/F (m ²)	Ap (m ²)	Ntc (kgep/m ² .ano)	Nt (kgep/m ² .ano)	Melhor prática	Prática convencional	PENR
Referência	T3	1	75,44	75,44	46,44	138,39	34,60	138,39	46,44
Otimizado	T3	1	75,44	75,44	40,71	138,39	34,60	138,39	40,71

Benchmarks		Benchmarks	
Melhor Prática:	$P_{ENR}^* = 0,25 \times Nt = \boxed{34,60}$ (Kgep/m ² .ano) (P 7.2)	Melhor Prática:	$P_{ENR}^* = 0,25 \times Nt = \boxed{34,60}$ (Kgep/m ² .ano) (P 7.2)
Prática convencional:	$P_{ENR^*} = Nt = \boxed{138,39}$ (Kgep/m ² .ano) (P 7.3)	Prática convencional:	$P_{ENR^*} = Nt = \boxed{138,39}$ (Kgep/m ² .ano) (P 7.3)
Solução:	$P_{ENR} = Ntc = \boxed{46,44}$ (Kgep/m ² .ano)	Solução:	$P_{ENR} = Ntc = \boxed{40,71}$ (Kgep/m ² .ano)

Normalização		Normalização	
$\overline{P_{ENR}} = (P_{ENR} - P_{ENR^*}) / (P_{ENR}^* - P_{ENR^*}) = \boxed{0,89}$ (P 7.4)		$\overline{P_{ENR}} = (P_{ENR} - P_{ENR^*}) / (P_{ENR}^* - P_{ENR^*}) = \boxed{0,94}$ (P 7.4)	

Fonte: Autores (2019)

Tabela 5 – Avaliação parâmetro 7

Nível	Condições	Referência	Otimizado
A+	$\overline{P_{ENR}} > 1,00$		
A	$0,70 < \overline{P_{ENR}} \leq 1,00$	X	X
B	$0,40 < \overline{P_{ENR}} \leq 0,70$		
C	$0,10 < \overline{P_{ENR}} \leq 0,40$		
D	$0,00 \leq \overline{P_{ENR}} \leq 0,10$		
E	$\overline{P_{ENR}} < 0,00$		

Fonte: Autores (2019)

No caso do modelo de referência, a comparação das necessidades de energia primária do edifício ($P_{ENR} = 46,44$ kgep/m²/ano), com a prática convencional ($P_{ENR^*} = 138,39$ kgep/m²/ano) e melhor pratica ($P_{ENR}^* = 34,60$ kgep/m²/ano), resultou num valor normalizado de 0,89 ($\overline{P_{ENR}}$), que equivale a uma classificação de nível A. O mesmo nível foi alcançado para o modelo otimizado, na comparação das necessidades de energia primária ($P_{ENR} = 40,71$ kgep/m²/ano) com as respetivas práticas nacionais, embora com um valor normalizado ligeiramente superior, de 0,94 ($\overline{P_{ENR}}$).

Toda a informação necessária para o cálculo pode ser rapidamente obtida com apoio do BIM. Com o reconhecimento automático da área do edifício, dos elementos construtivos e das

características dos materiais, o tempo necessário para avaliar este parâmetro é drasticamente reduzido, além do *CYPETHERM REH* definir automaticamente os parâmetros de simulação de acordo com o REH e produzir simultaneamente as necessidades energéticas e respetivos limites, nas unidades necessárias para o SBTool^{PT}-H. Modificações e comparação de soluções revelaram-se também ser processos rápidos e simples, permitindo assim avaliar o desempenho de diferentes opções.

PARÂMETRO 8

No que diz respeito ao parâmetro *P8 – Quantidade de energia que é produzida no edifício através de fontes renováveis*, procedeu-se à comparação da energia produzida pelo edifício com a prática convencional e melhor prática nacional, para ambos os modelos em análise (Figura 4). Aqui utiliza-se novamente a estimativa para a produção de energia renovável (1933 kWh/ano), calculada anteriormente no GBS. Esta foi definida como energia proveniente de painéis fotovoltaicos para uso exclusivamente elétrico (Eren).

No modelo de referência, a comparação da produção de energia do edifício ($P_{ER} = 25,62$ kWh/m²/ano), com a prática convencional ($P_{ER*} = 14,35$ kWh/m²/ano) e melhor prática ($P_{ER}^* = 72,48$ kWh/m²/ano), resultou num valor normalizado de 0,19, equivalente a uma classificação de nível C.

Relativamente ao modelo otimizado, mais uma vez, atingiu uma classificação de nível idêntico, mas com um valor normalizado ligeiramente superior de 0,23 ($\overline{P_{ER}}$). De realçar que este aumento apenas de deveu à redução das necessidades de aquecimento e arrefecimento, visto que foi adotado o mesmo valor para a produção de energia renovável. A avaliação da sustentabilidade encontra-se na Tabela 6.

Figura 4 – Parâmetro 8 – Resultados para o modelo de referência e otimizado

	T	NºF	Ap/F (m ²)	Ap (m ²)	Nic (kWh/m ² .ano)	Nvc (kWh/m ² .ano)	Qa (kWh/ano)	ERen (kWh/ano)	Ntc (kgep/m ² .ano)	Nt (kgep/m ² .ano)	Ntc' (kgep/m ² .ano)	Ntc'' (kWh/m ² .ano)	PER (kWh/m ² .ano)
Referência	T3	1	75,44	75,44	46,71	4,50	2139	1933,00	46,44	138,39	181,2	72,48	25,62
Otimizado	T3	1	75,44	75,44	39,82	4,21	2139	1933,00	40,71	138,39	160,2	64,08	25,62

Benchmarks				Benchmarks			
Melhor Prática:				Melhor Prática:			
$P_{ER}^* = Ntc'' \frac{(P 8.1)}{(P 8.2)}$				$P_{ER}^* = Ntc'' \frac{(P 8.1)}{(P 8.2)}$			
$P_{ER}^* = 72,48$ (kWh/m ² .ano)				$P_{ER}^* = 64,08$ (kWh/m ² .ano)			
Prática convencional: $P_{ER*} = 0,50 \times NAQS = \frac{(P 8.2)}{(P 8.3)}$				Prática convencional: $P_{ER*} = 0,50 \times NAQS = \frac{(P 8.2)}{(P 8.3)}$			
$P_{ER*} = 14,35$ (kWh/m ² .ano)				$P_{ER*} = 14,35$ (kWh/m ² .ano)			
Solução:				Solução:			
$P_{ER} = \frac{(P 8.3)}{(P 8.3)}$				$P_{ER} = \frac{(P 8.3)}{(P 8.3)}$			
$P_{ER} = 25,62$ (kWh/m ² .ano)				$P_{ER} = 25,62$ (kWh/m ² .ano)			
Normalização				Normalização			
$\overline{P_{ER}} = (P_{ER} - P_{ER*}) / (P_{ER}^* - P_{ER*}) = \frac{(P 8.4)}{(P 8.4)}$				$\overline{P_{ER}} = (P_{ER} - P_{ER*}) / (P_{ER}^* - P_{ER*}) = \frac{(P 8.4)}{(P 8.4)}$			
$\overline{P_{ER}} = 0,19$				$\overline{P_{ER}} = 0,23$			

Fonte: Autores (2019)

Tabela 6 – Avaliação parâmetro 8

Nível	Condições	Referência	Otimizado
A+	$\overline{P}_{ENR} > 1,00$		
A	$0,70 < \overline{P}_{ENR} \leq 1,00$		
B	$0,40 < \overline{P}_{ENR} \leq 0,70$		
C	$0,10 < \overline{P}_{ENR} \leq 0,40$	X	X
D	$0,00 \leq \overline{P}_{ENR} \leq 0,10$		
E	$\overline{P}_{ENR} < 0,00$		

Fonte: Autores (2019)

Neste caso, a utilização do *Autodesk Revit* e do *CYPETHERM REH* forneceram quase toda a informação necessária à avaliação, com exceção da produção de energia renovável, que teve ser calculada no GBS, traduzindo-se numa desvantagem. Isto leva a que a otimização deste parâmetro, sem sair do *CYPETHERM REH*, seja apenas possível através da redução das necessidades energéticas do edifício. Caso contrário, um novo valor para a produção de energia, proveniente do GBS, teria de ser adotado. De qualquer modo, a avaliação do parâmetro é otimizada em termos de tempo, visto que a informação produzida pelo *CYPETHERM REH* numa só simulação, permite avaliar ambos os parâmetros P7 e P8.

CONCLUSÕES

Perante as potencialidades que a utilização de metodologias BIM proporciona à indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), este novo paradigma pode vir a tornar-se essencial, não só para a otimização das construções e dos processos construtivos, mas também para o potenciamento do desempenho dos edifícios, do conforto dos ocupantes e, conseqüentemente, da sustentabilidade do edificado construído.

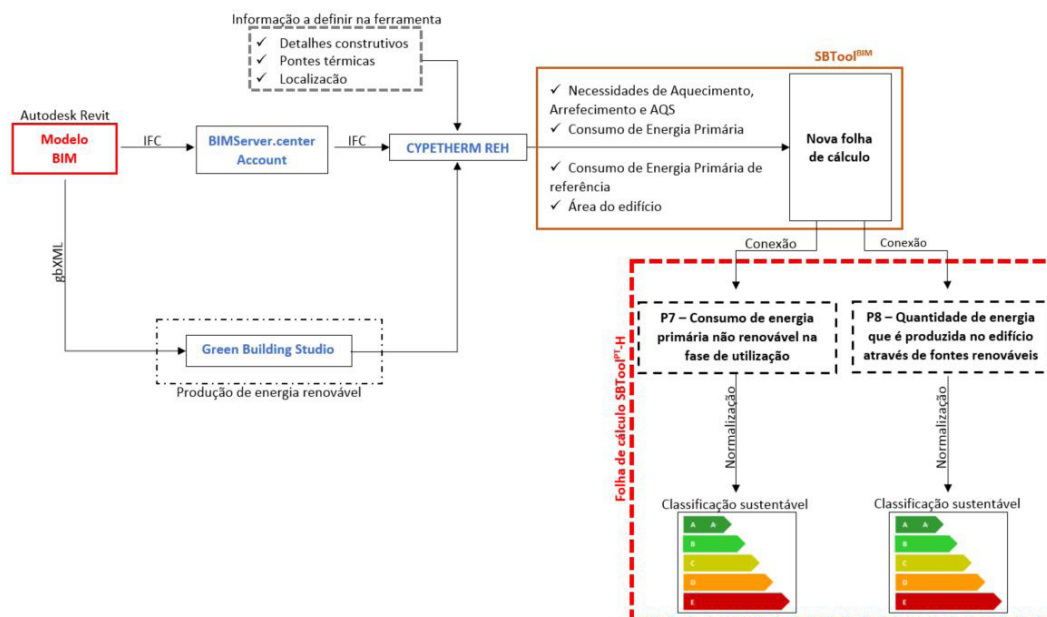
Apesar do BIM ainda não estar devidamente focado para a construção sustentável, tem um grande potencial para tal. A sua integração nas metodologias de avaliação da sustentabilidade, permite a articulação destas com outras disciplinas de projeto, melhorando a partilha de informação, reduzindo o tempo necessário para a avaliação e possibilitando o aumento do nível de sustentabilidade dos edifícios.

No que diz respeito à eficiência energética, cada vez mais existem ferramentas BIM que simulam e consideram aspetos energéticos dos modelos virtuais. A possibilidade dos projetistas em selecionar e comparar o desempenho energético e os custos associados de diferentes cenários

de reabilitação e de soluções construtivas, cria a oportunidade para que os projetistas otimizem a eficiência energética e a produção de energia renovável dos edifícios, numa fase preliminar do projeto, com poucos recursos e em pouco tempo.

O presente estudo identificou e aplicou os programas BIM mais adequados à simulação do desempenho energético de edifícios residenciais portugueses, bem como relacionou os resultados obtidos com uma metodologia de avaliação da sustentabilidade. Desta forma, demonstrou a aplicabilidade e os benefícios que o BIM apresenta para estes processos. Contudo, identificou também algumas restrições e limitações desta metodologia, como a necessidade de se utilizar várias ferramentas BIM para realizar a análise pretendida, alguma perda de informação na exportação do modelo virtual, nomeadamente na geometria do mesmo e ainda o moroso processo na conexão dos resultados obtidos com a avaliação dos parâmetros da metodologia de avaliação da sustentabilidade. Com base no processo metodológico utilizado e de forma a simplificar e automatizar a integração das metodologias BIM para avaliação da categoria de eficiência energética do SBTool^{PT-H}, propõe-se ainda o desenvolvimento de uma API – SBTool^{BIM}. Esta pretende conectar diretamente os resultados das simulações com a folha de cálculo do SBTool^{PT-H}, sem a interferência do utilizador e de acordo com os fluxos de informação e processos de avaliação apresentados na Figura 5. Com o desenvolvimento deste tipo de API, o processo de avaliação seria agilizado e automático, possibilitando às equipas de projeto rapidamente conhecer e melhorar a classificação obtida nos parâmetros em questão. Adicionalmente, esta API pode ainda abranger outros parâmetros da mesma metodologia.

Figura 5 – SBTool^{BIM} – Avaliação dos parâmetros P7 e P8 do SBTool^{PT-H}



Fonte: Adaptado de CARVALHO *et al.* (2019)

Apesar de todas as vantagens, no BIM, a realização de simulações de desempenho energético e a utilização de metodologias de avaliação da sustentabilidade, ainda não são uma prática corrente na maioria dos escritórios de projeto. Além da necessidade de consolidar processos, ainda existem algumas falhas de interoperabilidade entre as plataformas e as ferramentas de simulação BIM. Estas, bem como os formatos de partilha de informação precisam ainda de ser mais desenvolvidos, de forma a considerarem mais aspetos energéticos e sustentáveis, bem como melhorar a partilha de informação. Adicionalmente, a falta de conhecimento sobre a matéria, a falta de normalização e o elevado custo de investimento em programas e formação, assumem-se também como fatores que dificultam a implementação do BIM.

De qualquer forma é unânime que a utilização do BIM constitui uma grande vantagem para as equipas de projeto, para os edifícios e para a sociedade, produzindo benefícios de elevado impacto. É previsível que, em curto prazo, o BIM venha a se tornar uma importante ferramenta na materialização de edifícios mais eficientes, confortáveis e, por conseguinte, mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABANDA, F. H., BYERS, L. An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). *Energy*, [s.l.], v. 97, p. 517–527. 2016. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.12.135>

AELENEI, L.; AELENEI D.; GONÇALVES, H.; LOLLINI, R.; MUSALL, E. ; SCOGNAMIGLIO, A.; CUBI E.; NOGUCHI M. Design issues for net zero-energy buildings. *Open House International*, [s.l.], v. 38, p. 7–14. 2013. Disponível em: <<https://docentes.fct.unl.pt/aelenei/publications/design-issues-net-zero-energy-buildings>>.

AZHAR, S.; BROWN, J. BIM for Sustainability Analyses. *International Journal of Construction Education and Research*, [s.l.], v. 5, n. 4, p.276-292, 25 nov. 2009. Informa UK Limited. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15578770903355657>.

AZHAR, S.; BROWN, J. W.; SATTINENI, A. A Case Study of Building Performance Analyses Using Building Information Modeling. In: Proceedings of the 27th international symposium on automation and robotics in construction. 2010, Bratislava, Slovakia. *Proceedings [...]* Bratislava: ISARC-27, 2010. DOI: <https://doi.org/10.22260/ISARC2010/0023>.

AZHAR, S.; CARLTON, W. A.; OLSEN, D.; AHMAD, I. Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis. *Automation in Construction*, [s.l.], v. 20, n. 2, p.217-224, mar. 2011. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.019>.

BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. Avaliação da sustentabilidade das operações de reabilitação urbana. In: *II Encontro Nacional Sobre Reabilitação Urbana e Construção Sustentável: do edifício para a escala urbana: atas da conferência*. 2017, Portugal. Ata [...] Portugal: SBE, 2017. p. 21–30. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/48354>>.

BRYDE, D.; BROQUETAS, M.; VOLM, J. M. The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, [s.l.], v. 31, n. 7, p.971-980, out. 2013. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>.

CARVALHO, J. P.; BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. Optimising building sustainability assessment using BIM. *Automation in Construction*, [s.l.], v. 102, p.170-182, jun. 2019. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.021>

CARVALHO, J. P.; SILVA, S. M.; MATEUS, R. Using BIM to streamline the energy renovation processes of residential buildings during the early design stages. In Green Lines Institute for Sustainable Development (Ed.). In: *International Conference on Sustainable Housing Planning, Management and Usability Sustainable Housing 2016*. 2016, Porto. *Proceedings* [...] Porto: Green Lines Institute for Sustainable Development, 2016. p. 435–444. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/43388>>

CASSINO, K. E.; BERNSTEIN, H. M.; ASCE, F. A. L.; GUDGEL, J.; FITCH, E. *Green BIM: How Building Informations Modelig is Contributing to Green Desing and Construction*. SmartMarket Report. McGraw-Hill: Bedford, 2010. Disponível em: <www.analyticsstore.construction.com>

CASTRO, M. DE F.; MATEUS, R.; BRAGANÇA, L. Development of a healthcare building sustainability assessment method – Proposed structure and system of weights for the Portuguese context. *Journal of Cleaner Production*, [s.l.], v. 148, p.555-570, abr. 2017. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.005>.

DGEG. *Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais Iniciativa promovida e financiada por (DGGE / IP-3E)*. Lisboa: DGEG, 2004. Disponível em: <www.p3e-portugal.com>

DONG, Y. H.; NG, S. T. A life cycle assessment model for evaluating the environmental impacts of building construction in Hong Kong. *Building and Environment*, [s.l.], v. 89, p.183-191, jul. 2015. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.020>.

EASTMAN, C. M. *BIM handbook : a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

EL-DIRABY, T.; KRIJNEN, T.; PAPAGELIS, M. BIM-based collaborative design and socio-technical analytics of green buildings. *Automation in Construction*, [s.l.], v. 82, p.59-74, out. 2017. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.004>.

EUROPEAN PARLIAMENT, C. of the E. U. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Brussels: Official Journal of the European Union, 2010.

GARWOOD, T. L.; HUGHES, B. R.; OATES, M. R.; O'CONNOR, D.; HUGHES, R. A review of energy simulation tools for the manufacturing sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 81, p.895-911, jan. 2018. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.063>

GÖKGÜR, A. *Current and future use of BIM in renovation projects Ata Gökgür*. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2015 Disponível em: <<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/218421/218421.pdf>>

GOURLIS, G.; KOVACIC, I. Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings – A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 68, p.953-963, fev. 2017. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.009>.

GUZMÁN GARCIA, E.; ZHU, Z. Interoperability from building design to building energy modeling. *Journal of Building Engineering*, [s.l.], v. 1, p.33-41, mar. 2015. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.03.001>.

HAAPIO, A.; VIITANIEMI, P. A critical review of building environmental assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*, [s.l.], v. 28, n. 7, p.469-482, out. 2008. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2008.01.002>.

HORTA, R. M. C. *Construção sustentável de edifícios de balanço energético quase zero* (Sustainable construction of nearly zero-energy buildings). 2012, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2012. Disponível em: <<https://run.unl.pt/handle/10362/9143>>

JALAEI, F.; JRADE, A. Integrating building information modeling (BIM) and LEED system at the conceptual design stage of sustainable buildings. *Sustainable Cities and Society*, [s.l.], v. 18, p.95-107, nov. 2015. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.007>.

KAMARUZZAMAN, S. N.; SALLEH, H.; WENG LOU, E. C.; EDWARDS, R.; WONG, P. F. Assessment Schemes for Sustainability Design through BIM: Lessons Learnt. In MATEC Web of Conferences, The 4th International Building Control Conference, 2016. *Proceedings [...]* Kuala Lumpur, Malaysia: EDP Sciences, 2016. Vol. 66, n. 00080. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20166600080>

KIM, H.; SHEN, Z.; KIM, I.; KIM, K.; STUMPF, A.; YU, J. BIM IFC information mapping to building energy analysis (BEA) model with manually extended material information. *Automation in Construction*, [s.l.], v. 68, p.183-193, ago. 2016. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.002>.

KIM, J. B., JEONG; W., CLAYTON, M. J.; HABERL, J. S.; YAN, W. Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation. *Automation in Construction*, [s.l.], v. 50, p.16-28, fev. 2015. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.011>.

KRYGIEL, E.; NIES, B. *Green BIM : successful sustainable design with building information modeling*. 1. Ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

LI, Y.; CHEN, X.; WANG, X.; XU, Y.; CHEN, P.-H. A review of studies on green building assessment methods by comparative analysis. *Energy and Buildings*, [s.l.], v. 146, p.152-159, jul. 2017. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.076>.

LNEC. *Coefficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios* (Heat Transfer Coefficients from building envelope elements). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.

LU, Y.; WU, Z.; CHANG, R.; LI, Y. Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. *Automation in Construction*, s.l.], v. 83, p.134-148, nov. 2017. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.024>.

MATEUS, R.; BRAGANÇA, L. Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the methodology SBToolPT-H. *Building and Environment*, [s.l.], v. 46, n. 10, p.1962-1971, out. 2011. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.023>.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO. *Decreto-Lei 118/2013*, 2013-08-20. Portugal: MEE, 2013. Disponível em: <<https://dre.pt/pesquisa/-/search/499237/details/maximized>>

MOTAWA, I.; CARTER, K. Sustainable BIM-based Evaluation of Buildings. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, [s.l.], v. 74, p.419-428, mar. 2013. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.03.015>.

OLAWUMI, T. O.; CHAN, D. W. M. Identifying and prioritizing the benefits of integrating BIM and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey of international experts. *Sustainable Cities and Society*, [s.l.], v. 40, p.16-27, jul. 2018. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.033>.

RAFFEE, S. M.; HASSAN, Z.; KARIM, M. S. A. Enhancement of Sustainability Assessment of Building Projects using Building Information Modelling (BIM)., In: Proceedings of The 3rd National Graduate Conference (NatGrad2015), 8-9 April. 2015, Selangor, Malaysia. *Proceedings* [...] Selangor: Universiti Tenaga Nasional (Ed.), 2015. Disponível em: <<http://dspace.uniten.edu.my/handle/123456789/10219>>

RUPARATHNA, R.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. Improving the energy efficiency of the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 53, p.1032-1045, jan. 2016. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.084>

SOLLA, M.; ISMAIL, L. H.; YUNUS, R. Investigation on the potential of integrating BIM into green building assessment tools. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, [s.l.] v. 11, n.4, p. 2412–2418, 2016. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4114.0881>

SOUSA, J. R. B.; SILVA, S. M.; ALMEIDA, M. G. DE. Energy rehabilitation of Portuguese residential building stock through its transformation into NZEB. In Seminário Reabilitação Energética de Edifícios. 2012, Minho. *Proceedings* [...] Minho: Universidade do Minho, 2012. p. 41–48. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/21333>>

SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, [s.l.], v. 18, n. 3, p.357-375, maio 2009. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>.

TAVARES, F. *Metodologia para edifícios de balanço energético nulo*. 2013. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/11461/1/Tavares_2013.pdf>

WONG, J. K.-W.; KUAN, K.-L. Implementing ‘BEAM Plus’ for BIM-based sustainability analysis. *Automation in Construction*, [s.l.], v. 44, p.163-175, ago. 2014. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.04.003>.

WONG, J. K. W.; ZHOU, J. Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Automation in Construction*, [s.l.], v. 57, p.156-165, set. 2015. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003>