

# SIMULATION TOOLS FOR ENERGY PERFORMANCE EVALUATION OF BUILDINGS WITH MINIMUM MATERIAL RESOURCES

## Abstract

This paper presents the results of a Seminar / Workshop about simulation tools for energy performance evaluation of building's architectural design that was organized in the University of Minho's School of Architecture, located in Guimarães, North of Portugal. The theme of the Seminar / Workshop aims at sensitizing students to the importance of energy simulation as a tool to support the sustainable architecture design in early stages, introducing some simulation tools and giving examples of results obtained through them. The building envelope is the main element of control of gains and losses, and can be used to obtain passive and active energy gains. The reduction of weight in buildings by the introduction of lightweight construction systems and dry joints, using materials such as wood or steel, can contribute to eco-efficiency, in particular by reducing materials used on site, ease of transportation, assembly, reuse and recycling, but this reduction becomes complex in temperate climates due to the absence of thermal inertia. Lightweight constructions are generally characterized by reduced thermal inertia, which can result in a marked thermal oscillation and consequent increase in energy use. It is then necessary to compensate the lightness of the construction with well-weighted passive strategies: optimized thermal mass, increased insulation in the envelope, controlled ventilation, shading, well-oriented glazing, etc.). The simulation tools allow optimizing the passive strategies onto their limits in the design stage.

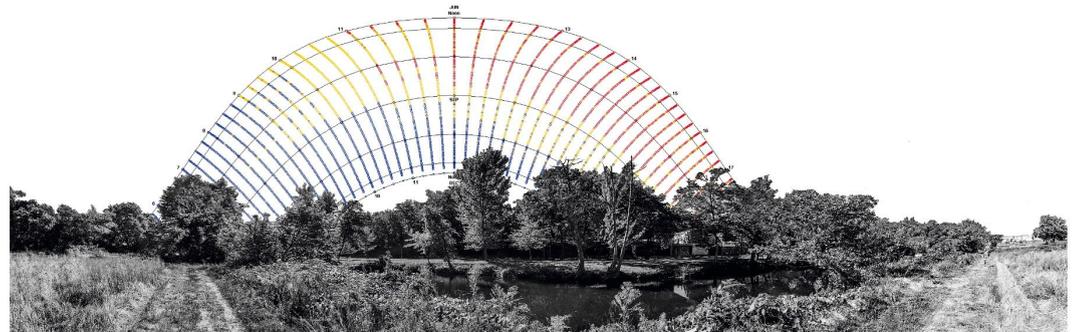
**Keywords:** Energy performance; Simulation tools; Architecture Design; Minimum material resources; Sustainability.

## Introduction

A design with sustainability concerns requires an approach at different scales and concepts that necessarily support it. Thus, the aim of the Course Studio 1B - Sustainability, is the study of architectural solutions that combine social, economic and environmental aspects harmoniously, focusing either on the organization of the territory, or on the choice of materials and strategies in the definition of construction systems and the organization of space, taking into account the consequences and interaction of these with the comfort mechanisms (preferably adaptive) in relation to climate, programmatic and operational constraints. The exercise developed during the classes of Studio 1B (Sustainability) in the academic year of 2018/2019 was the design of a touristic equipment. This unit was developed in two phases, the first being the analysis and choice of the site and the definition of 1 modular Studio

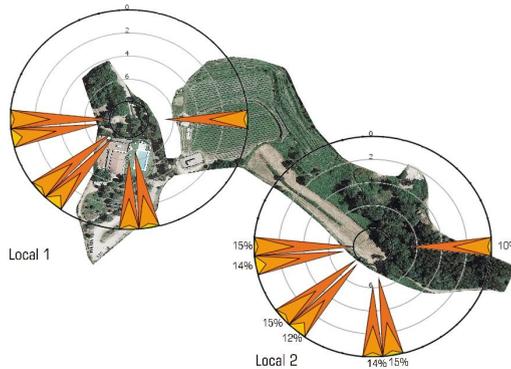
Fotografia Panorâmica Local 1

Vantagens: Boa vista sobre a paisagem; Boa proteção contra o vento; Bons acessos. | Oportunidades: Ligação com discoteca, piscina e mini-golf.  
Desvantagens: Não tem relação com o rio; Cai mais folhagem; Pouca luz solar; Ruído da discoteca. | Riscos: Conseguir pouca luz solar; Humidade.

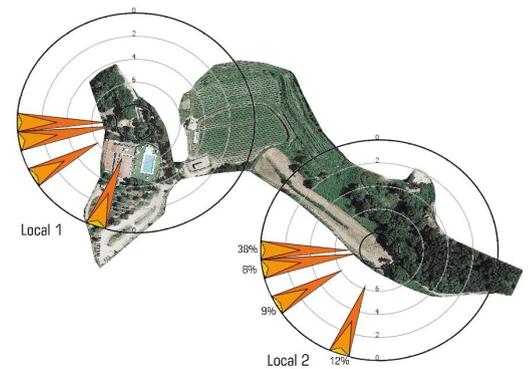


Carta Solar Local 2

Vantagens: Possível relação com o rio; Boa exposição solar; Alguma proteção contra o vento. | Oportunidades: Ligação com o rio e suas atividades.  
Desvantagens: Não tem grandes acessos; Sem estacionamento. | Riscos: Humidade e possibilidade de cheias.



Mapa dos Ventos - Inverno



Mapa dos Ventos - Verão

Fig. 1 - Climate analysis of the studied site: solar exposition and prevailing winds. Work of students Helder Oliveira, Rui Pinto, Ruben Araújo, Antoni Mas.

with 36m<sup>2</sup> of gross floor area, in which must necessarily be introduced vegetation as a spatial organization element and / or environmental control system. Local materials, inserted in lightweight modular systems, with justified reduced environmental impacts should be also incorporated. In a second stage the spatial organization of Studios (16x36m<sup>2</sup>) should be configured in modular association and the support equipment (with an area of 4x36m<sup>2</sup>) following the same principles of the modular Studio. Four additional modules adopting the same construction principles must be provided, whose programmatic definition was left to the student's consideration, with only one prerequisite that is to illustrate the sustainability concerns taken in the proposal. All modules in the future should be easily processed, disassembled and transported and thus being able to change use or location if necessary. The exterior arrangements should be defined, as well as the connection to the main equipment in the vicinity, namely a public park. This tourist equipment is to be located in Vizela,

in the margin of the River with the same name.

## Sustainability Studio in UMinho University Architecture Integrated Master

The studies period of Sustainability Studio Curricular Unit is one semester, around 20 weeks of teacher / student contact in classes of 4 hours, 2 days per week. As the module "Sustainability" in which it is integrated, it is located in the first semester of the 4th year in the Architecture Integrated Master. The expected learning outcomes are: selection of specific research tools in Sustainability and architecture; analysing the chosen systems having in view the realization of a synthetic project exercise; solve and specify the project exercise by drawing, written and physical/virtual models; recognize the importance of interdisciplinary and team work; explain and argue about their own proposal and the colleague's proposals [1]. The Sustainability Studio course coordinator, the first author of this paper, is responsible for

the lecture classes introducing the exercises, where the first approaches to an environmental sensitive project are presented but also discussed, promoting the dialogue and feedback from students. It is proposed to the students, to research over concepts and building systems, in order to discuss and present these in the classes. A bulletin board space is available on the class to each group of students, in order to allow the presentation and discussion over the ongoing researches. The same is also possible on a virtual blackboard tool, available in the University of Minho, that allow teacher to post information, as well constitute a forum for evaluation, discussion, presence control, among other available tools. Some guest lectures occur each year, made by personalities invited due to their expertise on some specific aspects related with the program or the "themes" proposed. In the year 2018/2019, Dora Francese, professor from the Architecture Department of University of Naples Federico II came with Erasmus+ support and, apart from a presentation over sustainable construction, was also invited to discuss over the student's projects. Apart from theoretical and workshop presentations, other types of reflection moments are also included, like the visit of exemplar buildings in relation to the specific year program. In 2018/2019 the proposed program was a modular touristic resort in Vizela, and so a visit was made to Fabrica das Casas, a company located in Famalicão (a city located in close vicinity of Guimarães) that produces modular houses using a lightweight steel structure. Other theoretical presentations are also introduced in the curricular units of Compulsory 1 (Indoor Environmental Quality) and Seminar 1 (Sustainability), promoting an interdisciplinary collaboration with the Civil Engineering Department, responsible for these contents. The use of software and analytic techniques introduced in the taught courses is tested and consolidated through weekly design research exercises which will collectively form an overall sustainable approach [2, 3]. The work is separated in two main periods in which different scales and approaches are explored. Inside these periods several exercises are proposed to the students. The first exercise, called "territory analysis", lasts around 4 weeks and is done by groups of 3 or 4 students. It comprises a climatic analysis (solar exposure, dominant winds, precipitation, and temperatures), the pre-existences analysis (topography, vegetation, built volumes and façades, building systems and materials) and a social analysis (vicinity to equipment, transport accessibility, including inquiries to possible future users, etc.). In fig01 is shown an example of a climatic analysis of the site, using the software Climate Consultant, a simple to use graphic-based computer program that helps architects, builders, contractors, homeowners and students to understand the local climate. Based on annual 8760 hour EPW format climate data, it translates this into dozens of meaningful graphic displays. In fig02 is shown the example of an analysis of accessibilities to the most important cities in the vicinity of Vizela.

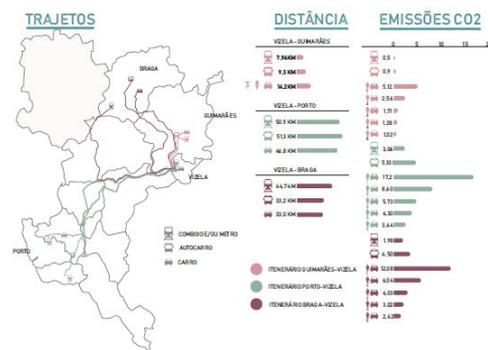


Fig. 2 - Transport accessibility analysis of Vizela, comparing CO2 emissions by using different types of transportation – work of students Margarida Mota, Cecília Rodrigues and Eliana Soares.

### Simulation Tools

Nowadays, the high energy performance requirements for buildings have increased the need to quantify the level of performance from the early stages of the project. In this sense, the simulation tools are particularly relevant for designers to test and validate design options more accurately in a range of cross-related parameters such as building form, solar exposure, shading elements, type of envelope elements, thermal inertia, insulation, ventilation, etc. Simulation tools are useful in the design of new buildings but also relevant for studying existing buildings with non-conventional building systems. If with conventional building systems is relatively simple and accurate to predict the thermal performance of a building using simplified calculation methods preconized by regulation, with non-conventional materials this type of calculation could not be so accurate to express the real behavior of the building. An example of buildings that use non-conventional building systems is the case of vernacular buildings. Cardinal *et al.* [4] consider that using simulation tools to estimate thermal performance and to test design alternatives is the most effective way to design or analyse non-conventional buildings, due to the range of complex variables it is necessary to evaluate. On the same topic, the research work that is being carried out by the two last authors of this paper in Project reVer ([www.rever.pt](http://www.rever.pt)) is studying the thermal performance of Portuguese vernacular buildings in real use conditions [5,6], and is using simulation tools to understand the strengths and weaknesses of different passive strategies, and to compare the performance of these buildings with the conventional buildings in the same conditions. In one case study, the results showed that the building had an adequate thermal performance during most of the year, even if its building elements do not comply with minimum requirements for the U-value defined by national regulation on the Energy Performance of Buildings [6,7]. Thus, this is an issue where simulation tools can have an important role on the validation of non-conventional solutions that could not comply with some specific requirements but that in a holistic performance analysis can achieve the same or similar performance goals. The example of vernacular

buildings is intended to establish a bridge to the current context, where the number of building renovation operations is considerable and where the application of some thermal regulation requirements is made by the book to comply the legal requirements, not taking into consideration specific features of each building. As in these examples, in work developed by the students in the design of tourism houses, where the occupation and use profiles are seasonal and variable (air conditioning, shading, ventilation, etc.), simulation tools are particularly useful to test non-conventional solutions. In the limit, and as a testing hypothesis, these solutions could not comply with legal requirements but could follow cost-optimal solutions that assure comfort conditions and energy efficiency during the occupation periods and be an alternative to other solutions defined for continuous occupation periods. Therefore, the use of simulation tools is useful to analyze if non-conventional building systems, especially when presenting very high or very low thermal inertia, can provide an adequate indoor thermal environment. Modular lightweight building systems present an increasing market penetration in Portugal, especially for rural tourism and weekend houses, with significant advantages, not just associated with the economic cost, but also to fast assembling and disassembling, flexibility, minimum use of materials, simplified licensing and dry joint building systems that allow easy reuse and recycling. However, they generally present low thermal inertia, what can be problematic in some climatic contexts, mostly in interior regions where the temperature swings are high and summer and winter are more extreme. The introduction to simulation tools in architecture courses is essential to give students the necessary skills to test and understand the impact of their design options in the overall thermal performance of the building, especially for non-conventional solutions. The thermal performance of the modular Studio designs, developed individually by the students in the Sustainability Studio, is generally evaluated in the Compulsory 1 Curricular Unit, in order to allow the verification of the compliance to the Portuguese regulation on the Energy Performance of Buildings, based on a simple degree-day model. However, and in complement to this verification of compliance, in the present academic year, a workshop was organized that included presentations and discussion about energy simulation software tools that could use the work of the students as case studies. The idea is that, related with the present year's program (modular touristic equipment) and, with the support from the co-authors of this paper, the energy simulation tools OpenStudio and DesignBuilder could help to integrate and evaluate some sustainable parameters into the conception design phase. Other presentation was done from a civil engineer, António Machado, working on the field of environmental studies. This last presentation focused on the use of computational tools and

workflows to explore, analyse, and visualize design issues in a parametric visual programming environment. Through demonstration using pre-prepared examples, were presented studies carried out in their initial stages of design, as well as forms of optimization and / or multidimensional analysis, thus comprising some workflows. The software + plugins used were: Rhinoceros3D, Grasshopper, Ladybug, Honeybee, Colibri, Design Explorer, Galapagos.

### EnergyPlus

The EnergyPlus is probably the most well-known building energy simulation program (for heating, cooling, ventilation, lighting, water use, etc.). Beyond its acknowledged quality as a simulation engine, its widespread use is also because it is free software, open-source, and it runs on multiple operating systems. Its development is funded by the U.S. Department of Energy's (DOE) Building Technologies Office (BTO) and managed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL). EnergyPlus uses a simple spreadsheet-like interface that is not a user-friendly graphical interface. Therefore, several comprehensive graphical interfaces for EnergyPlus have been developed to allow to model and carry out simulations more easily, as the programs presented in the following sections.

### Openstudio

OpenStudio is a free and open-source assemblage of software tools to support whole building energy modeling using EnergyPlus simulation engine, and cutting-edge daylight analysis using Radiance. It was first released in April 2008 by the NREL National Renewable Energy Laboratory - the US Department of Energy, aiming to be a user-friendly environment based on the EnergyPlus and Radiance simulation engines. The graphical applications include the OpenStudio SketchUp Plug-in, OpenStudio Application, ResultsViewer and the Parametric Analysis Tool (PAT). The OpenStudio SketchUp Plug-in consents users to quickly create building geometry required for EnergyPlus energy simulation. Furthermore, OpenStudio also supports import of gbXML and IFC from 3rd party applications for geometry creation. OpenStudio is a fully featured user-friendly graphical interface to EnergyPlus models together with envelope, loads, schedules, and HVAC input capabilities. ResultsViewer enables browsing, plotting, and comparing simulation output data, especially time series. The Parametric Analysis Tool (PAT) allows the users to study the impact of applying multiple combinations of OpenStudio Measures to a base model as well as export of the analysis results for EDAPT submission. PAT allows the user to analyze energy conservation measures (ECM) in a systematic method, and provides the financial analysis if required.

"OpenStudio measure" is a ruby program or script that can access the OpenStudio model to create or make changes to the building energy model, and save a significant amount of time and efforts. Typically, a measure modifies an

existing OpenStudio model in order to implement a given energy conservation measure (ECM). For example, a measure might change the insulation rating of the exterior walls, change the window-to-wall ratio of a specific facade, or modify operational or occupancy schedules. Measures may also generate reports on the input and output of a given energy model; as such, these are referred to as reporting measures.

### DesignBuilder

The first version of DesignBuilder was released in 2005, with the first Graphical Interface available for the EnergyPlus simulation engine (from the US Department of Energy). The program has BIM interoperability making it easy to import 3D models. DesignBuilder is versatile software providing a number of simplified options for early design phases and model detail options for more complex calculations. The program allows analysis of energy consumption, carbon emissions, occupant comfort, illuminance, CFD, environmental impact assessment, etc.

### Energy modelling and evaluation

#### Energy modelling

The designs developed by the students were modelled in Openstudio and Designbuilder during the workshop, with the help of the co-authors of this paper Nzar Faiq and Jorge Fernandes, respectively.

#### Openstudio case study

Integration of Openstudio with a graphical tool like SkecthUp allows architectural designers to evaluate the energy performance of a building during early design stages. Most significantly, it empowers the designers to analyze the impact of various design components on energy performance and choose the optimal decision. Preliminary design studies to analyze and identify optimal Building shape and mass optimizations, orientation, Window to Wall Ratio (WWR) could be conducted using OpenStudio. It allows for easy integration of the design parameters and evaluate their energy performance effortlessly.

The following simulation results are from an energy model developed by the student Antoni Mas using Openstudio (fig03). The impact of various parameters like WWR, Shading, and Orientation on the heating and cooling energy requirements of a building were analyzed using the tool. Variations between the Energy Use

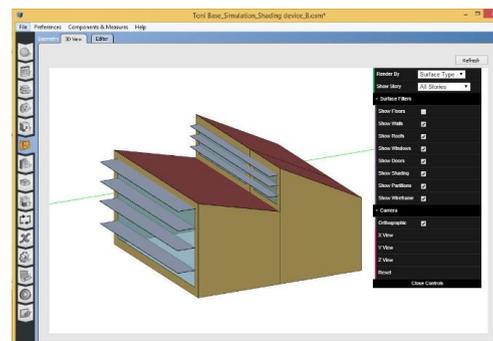


Fig. 3 - Screen captures from the simulations carried out in the workshop using Openstudio. Work from student Antoni Mas.

Intensities (EUI) for heating and cooling were considered to compare the impact of various design decisions. Daylighting controls were not considered in these studies and therefore the energy consumption for lighting remains the same for all the model options.

The results for the different design scenarios are presented in tab01 to tab03. The next paragraph describes and analyse the conclusions drawn from the results. For the WWR analysis, the heating and cooling EUI is lower for the option with the lowest WWR. This is expected since having smaller window areas minimize the heat losses and gains through the envelope. EUIs for both heating and cooling are directly proportional to the percentages of the WWR. This analysis helped the student to identify the optimal WWR for the building in accordance to the physical characteristics of the building; climate, location, construction, etc..

Tab. 1 - Comparison of EUI for heating and cooling for various WWR

	EUI (kWh/m <sup>2</sup> /year)			
	Base 40WWR	Case1 50WWR	Case2 60WWR	Case3 70WWR
Heating	35.7	36.9	37.9	40.5
Cooling	7.0	8.7	10.2	13.4

Tab. 2 - Comparison of EUI for heating and cooling for various quantities of surface shading

	EUI (kWh/m <sup>2</sup> /year)			
	Base	Case1 0.3X2 shades	Case2 0.3X3 shades	Case3 0.6X2 shades
Heating	40.5	42.2	42.2	42.3
Cooling	13.4	9.5	9.2	8.9

Tab. 3 - Comparison of EUI for heating and cooling for different Orientations

	EUI (kWh/m <sup>2</sup> /year)			
	Base South	Case1 East	Case2 North	Case3 West
Heating	42.2	39.5	44.6	43.3
Cooling	9.2	9.9	6.2	6.9

#### DesignBuilder case study

The modular studio design developed by the student Hélio Peixoto was evaluated using DesignBuilder. Screen captures of the simulations are presented on fig04. By the simulations carried out with DesignBuilder it was perceived the

performance of the studio in relation with the behaviour of shading devices and thus prove that it has the ideal operation, allowing shading in summer and still having advantageous gains in winter.

The results achieved allowed the adjustment in the module, as, for example, the reduction of the skylight area or the application of adjustable wooden slats.

The Autodesk Flow Design tool was also used by the student Hélio Peixoto taking in consideration the prevailing summer wind coming from the west that was used both in terms of passive cooling, as well as microgeneration (fig05).

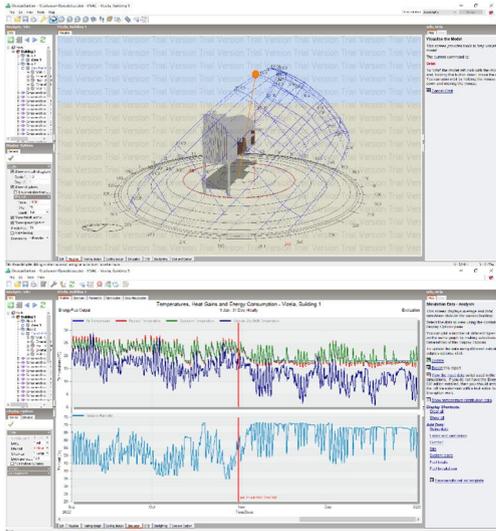


Fig. 4 - Screen captures from the simulations carried out in the workshop using DesignBuilder. Work from student Hélio Peixoto.

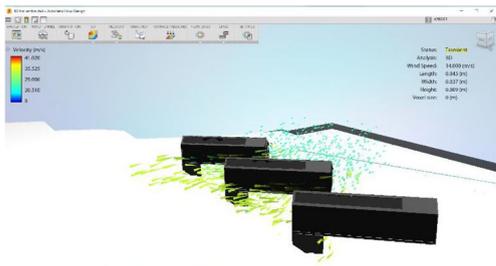


Fig. 5 - Screen captures from the wind flow simulations using Autodesk Flow Design. Work from student Hélio Peixoto.

The modelling and simulation goal should be planned to avoid a waste of time and unnecessary work. It should also be highlighted that the contact of the students with this type of tools allowed them to develop skills regarding the architectural details that really influence the thermal performance, in order that they know how to simplify the architectural model to be easily modelled in this type of tools without compromising the accuracy.

In the case study simulated with DesignBuilder three options were tested:

- Case 1 – the original version of the building as designed by the student, i.e., with a skylight in the north slope of the roof and shading in the windows facing south only;
- Case 2 – no skylight and additional adjustable shading slats in the windows facing west;
- Case 3 – no skylight and no adjustable shading slats.

Tab04 presents the energy demand for heating and cooling of the different options and the percentage of improvement of other design options.

Tab. 4 - Design Builder case study results

Design options	Heating kWh/m <sup>2</sup>	Cooling kWh/m <sup>2</sup>	% improvement
Case1	14.05	57.64	-
Case2	12.58	17.39	58.2
Case3	13.92	17.67	55.9

From the results, it can be verified that Case 2 has the best performance. The improvement is mainly in the cooling demand since Case 1 has excessive solar gains through the skylight and the windows facing west. By removing the skylight and by adding adjustable shading slats, it was possible to reduce energy demand for cooling in about 70% and the global performance in 58,2%.

The reduction of the glazed area in the roof also had a positive effect on heating demand since the heat losses by the envelope were also minimised. In Case 3, by removing the adjustable shading slats, the performance decreases a bit both for heating and cooling. As the results show, simulations were useful to test design options, and the overall performance of the building has significantly increased in comparison with Case 1.

### Conclusions

In a context of demand for high-performance buildings, the need for quantitative analysis makes more relevant the use of simulation tools to test and validate design alternatives and to analyze the overall performance of buildings. Therefore, the introduction to these tools and its use should be encouraged in architecture courses. The routine of using this type of tools is useful not only for the students to gain practice in the simplification of the simulation models but also to develop their critical sense in the interpretation of the results and of the impact of their design options in the overall thermal performance of the building.

In the seminar and workshops, the students had a glance of a range of tools available in the market and the opportunity to hands-on some tools to model their projects and analyze if their solutions were working. Some students had to change some solutions, as the size of windows and skylights, to minimize the risk of overheating, etc. The use of the simulation tools allowed the students to understand the impact of their design options in the overall thermal performance of the building, allowing significant improvements, in one of the students it arrived to almost 60% in comparison with the initial design. These tools are useful for architects and engineers to predict performance, optimize solutions and thus reduce the environmental impacts associated with the use of energy from non-renewable sources. However, they also have limitations, such as the complexity associated with the introduction of the schedules and of the mechanical systems, the

lack of sufficient data to characterize some non-conventional materials, and also the difficulty to insert some more complex geometries in the simulation software.

The growing market of refurbishment and extension of existing buildings is also an opportunity to apply these tools in the prediction of thermal performance, since in old towns the number of buildings using non-conventional building systems is significant. The impossibility of performing monitoring in all buildings makes it necessary to use these energy simulation tools.

### ACKNOWLEDGMENTS

First author thanks the financial support from the Project UID/AUR/04509/2013 by FCTMEC by national funding and, when applicable, FEDER co-financing under the new PT2020 partnership agreement - Lab2PT, School of Architecture/ University of Minho, Portugal. Third and fourth authors would like to acknowledge the support granted by the FEDER funds through the Competitivity and Internationalization Operational Programme (POCI) and by national funds through FCT— Foundation for Science and Technology within the scope of the project with the reference POCI-01-0145-FEDER-029328, and of the Ph.D. grant with the reference PD/BD/113641/2015.

### REFERENCES

- [1] P. Mendonça, "The Environment as Part of the Architectural Curricula in the University of Minho" in "Teaching a new Environmental Culture - The Environment as a Question of Architectural Education" da ENHSA - EAAE "European Network of Heads of Schools of Architecture - European Association for Architectural Education"; Nicosia, Cyprus, 2011, pp. 307-320; ISBN 978-2-930301-51-8.
- [2] P. Mendonça, "The Sustainability Studio in the Integrated Master in Architecture Course from the University of Minho" in Proceedings of the 2nd International Seminar from the Architecture and Urbanism Schools of Portuguese Language Academy - "Architecture Stages" Volume 2, Architecture and Urbanism Schools of Portuguese Language Academy, Lisbon, 2012, pp. 467-477; ISBN 978-972-9346-27-9.
- [3] P. Mendonça, "Living under a second skin - Environmental Impact reduction strategies of solar passive buildings in temperate climates", Doctorate Thesis in Civil Engineering, University of Minho: Guimarães, (2005).
- [4] N. Cardinale, G. Rospi, P. Stefanizzi, Energy and microclimatic performance of Mediterranean vernacular buildings: The Sassi district of Matera and the Trulli district of Alberobello, Build. Environ. 59 (2013) 590–598. doi:10.1016/j.buildenv.2012.10.006.
- [5] J. Fernandes, C. Pimenta, R. Mateus, S.M. Silva, L. Bragança, Contribution of Portuguese Vernacular Building Strategies to Indoor Thermal Comfort and Occupants' Perception, Buildings. 5 (2015) 1242–1264. doi:10.3390/buildings5041242.
- [6] J. Fernandes, R. Mateus, H. Gervásio, S. M. Silva & L. Bragança, Passive strategies used in Southern Portugal vernacular rammed earth buildings and their influence in thermal performance, Renewable Energy, 142 (2019) 345–363. doi:10.1016/j.renene.2019.04.098
- [7] DL118/2013, Decreto-Lei 118/2013: Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento

de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), Portugal, 2013. <http://dre.pt/pdf1s/2013/08/15900/0498805005.pdf>.

## **FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS COM RECURSOS MATERIAIS MÍNIMOS**

### **Resumo**

Este artigo apresenta os resultados de um workshop organizado na Escola de Arquitetura da Universidade do Minho, localizada em Guimarães, norte de Portugal. O tema do Seminário / Workshop visa sensibilizar para a importância da simulação energética como uma ferramenta para apoiar o projeto de arquitetura sustentável, introduzindo algumas ferramentas de simulação e dando exemplos de resultados obtidos através destas. A envolvente do edifício é o principal elemento de controle de ganhos e perdas e pode ser usada para obter ganhos de energia passiva e ativa. A redução de peso nas construções pela introdução de sistemas leves de construção e junta seca, utilizando materiais como madeira ou aço, pode contribuir para a eco-eficiência, em particular pela redução de materiais utilizados no local, facilidade de transporte, montagem, reutilização e reciclagem, mas essa redução torna-se complexa em climas temperados devido à ausência de inércia térmica. As construções leves são geralmente caracterizadas por inércia térmica reduzida, o que pode resultar numa oscilação térmica acentuada e consequente aumento no consumo de energia. É então necessário compensar a leveza da construção com estratégias passivas bem ponderadas: massa térmica otimizada, aumento do isolamento na envolvente, ventilação controlada, sombreamento, envidraçados bem orientados, etc.). As ferramentas de simulação permitem otimizar as estratégias passivas até aos seus limites em fase de projeto.

**Palavras-chave:** Desempenho energético; Ferramentas de simulação; Projeto de arquitetura; Recursos materiais mínimos; Sustentabilidade.

### **Introdução**

Um projeto com preocupações de sustentabilidade requer uma abordagem a diferentes escalas e conceitos que necessariamente o suportam. Dessa forma, o objectivo da Unidade Curricular Atelier 1B – Sustentabilidade, é o estudo de soluções arquitetónicas que conjuguem numa forma harmoniosa aspectos sociais, económicos e ambientais, incidindo quer sobre a organização do território, quer sobre a escolha dos materiais e estratégias na definição dos sistemas construtivos e na organização do espaço, tendo em conta as consequências e interação dos mesmos com os mecanismos de conforto (preferencialmente adaptativos) em relação com as condicionantes climáticas, programáticas e operacionais. O exercício desenvolvido durante as aulas de Atelier 1B (Sustentabilidade) no ano académico de 2018/2019 foi o projeto de um equipamento turístico. Esta unidade foi desenvolvida em duas fases, sendo a primeira a análise e escolha do local e a definição de 1 estúdio modular com 36m<sup>2</sup> de área bruta, em que deveria necessariamente ser introduzida vegetação como elemento de organização espacial e/ou sistema de controle ambiental. Também deveriam ser incorporados materiais locais, inseridos em sistemas modulares leves, com impactos ambientais justificadamente reduzidos. Numa segunda fase foi definido o conjunto do equipamento composto pelos Estúdios (16x36m<sup>2</sup>) em associação modular e pelos equipamentos de apoio (com uma área de 4x36m<sup>2</sup>) seguindo os mesmos princípios do módulo do Estúdio. Teriam de ser previstos 4 módulos adicionais adotando os mesmos princípios construtivos, cuja definição programática ficou a cargo dos discentes tendo como único pré-requisito o de ilustrar as preocupações de sustentabilidade tidas na proposta. Todos os módulos, no futuro, deveriam poder ser facilmente transformados, desmontados e transportados e dessa

forma mudar de uso ou de local, se necessário. Foram definidos os arranjos exteriores, bem como pensada a ligação aos principais equipamentos existentes na proximidade, nomeadamente, um parque público. Este equipamento turístico está localizado em Vizela, na margem do rio com o mesmo nome.

### **O Atelier de Sustentabilidade do Mestrado Integrado em Arquitetura**

O período de estudos da Unidade Curricular do Atelier de Sustentabilidade é de um semestre, cerca de 20 semanas de contato professor / aluno em aulas de 4 horas, 2 dias por semana. À semelhança do Módulo de “Sustentabilidade” em que está integrado, localiza-se no primeiro semestre do 4º ano do Mestrado Integrado em Arquitetura. Os resultados esperados de aprendizagem são: Selecionar ferramentas de Investigação específica em Sustentabilidade de Edifícios; Analisar sistemas escolhidos tendo em vista a realização de um exercício projetual de síntese; Resolver exercício projetual e especificar sob a forma de peças desenhadas, escritas e maquete / modelo virtual; Explicar e argumentar sobre o exercício projetual realizado [1].

O coordenador da unidade curricular Atelier de Sustentabilidade, primeiro autor deste artigo, é responsável pelas aulas onde são apresentados e discutidos os exercícios e as primeiras abordagens a um projeto ambientalmente sensível, promovendo o diálogo com os alunos. Propõe-se a estes investigar sobre conceitos e sistemas construtivos, com vista à apresentação e discussão nas aulas. Um espaço de afixação está disponível na sala para cada grupo de alunos, a fim de permitir a apresentação das investigações em curso. O mesmo também é possível numa ferramenta virtual, designada por “blackboard” disponível na Universidade do Minho, que permite ao professor inserir informações, além de constituir um fórum de avaliação, discussão, controle de presença, entre outras ferramentas. São promovidas algumas apresentações anualmente, por personalidades convidadas, devido à sua experiência em alguns aspectos específicos relacionados com o programa ou os “temas” propostos. No ano de 2018/2019, Dora Francese, professora do Departamento de Arquitetura da Universidade de Nápoles Federico II, veio com apoio do programa Erasmus+ e, além de uma apresentação sobre construção sustentável, foi também convidada a discutir criticamente os projetos dos alunos. Além das apresentações teóricas e aulas práticas, são também promovidos outros momentos de reflexão, como a visita a edifícios exemplares em relação ao programa a desenvolver em cada ano específico. Em 2018/2019, o programa proposto era um resort turístico modular em Vizela e nesse sentido foi feita uma visita à empresa Fabrica das Casas, em Famalicão (cidade localizada nas proximidades de Guimarães) que produz casas modulares com estrutura de aço. Outras apresentações teóricas também são introduzidas nas unidades curriculares Obrigatória 1 (Qualidade Ambiental Interior) e Seminário 1 (Sustentabilidade), promovendo uma colaboração interdisciplinar com o Departamento de Engenharia Civil, responsável por esses conteúdos. O uso de software e técnicas analíticas introduzidas nos cursos ministrados é testado e consolidado através de exercícios semanais de projeto, que formam no seu conjunto uma abordagem sustentável de carácter holístico [2, 3]. O trabalho é dividido em duas fases principais nas quais diferentes escalas e abordagens são exploradas. Vários exercícios são propostos aos alunos. O primeiro exercício consiste numa análise do território. Dura cerca de 4 semanas e é realizado por grupos de 3 ou 4 alunos. Compreende uma análise climática (exposição solar, ventos dominantes, precipitação e temperaturas), a análise de pré-existências (topografia, vegetação, volumes e fachadas construídas, sistemas e materiais de construção) e uma análise social (equipamentos, acessibilidade de transporte, incluindo consultas a

possíveis usuários futuros etc.). Na fig01 é mostrado um exemplo de análise climática, usando o software Climate Consultant, um programa de utilização simples que visa ajudar arquitetos, construtores, empreiteiros, proprietários e estudantes a entender o clima local. Com base em dados climáticos anuais no formato EPW referentes a 8760 horas, o software produz dezenas de análises gráficas de fácil interpretação. Na fig02 é mostrado o exemplo de uma análise de acessibilidades às mais importantes cidades localizadas na proximidade de Vizela.

### **Ferramentas de Simulação**

Atualmente, os requisitos de alto desempenho energético para os edifícios aumentaram a necessidade de se quantificar o nível de desempenho, desde as fases preliminares de projeto. Neste contexto, as ferramentas de simulação são particularmente relevantes para os projetistas testarem e compararem, com maior precisão, diferentes opções de projeto, variando, por exemplo, parâmetros relacionados com a forma da construção, exposição solar, elementos de sombreamento, tipo de envolvente, inércia térmica, isolamento térmico e ventilação. As ferramentas de simulação são úteis no projeto de novos edifícios, e também muito relevantes no estudo de edifícios existentes que utilizam sistemas construtivos não convencionais. Se nos edifícios com sistemas construtivos convencionais é relativamente simples, e preciso, utilizar métodos de cálculo simplificados e/ou preconizados pelos regulamentos para prever o desempenho térmico de uma construção, no caso de edifícios que utilizam materiais não convencionais, estes métodos podem não ser tão precisos para expressar o comportamento real de uma construção. Um exemplo de construções onde se utilizam sistemas de construção não convencionais são os edifícios vernáculos. Cardinal et al. [4] consideram que a utilização de ferramentas de simulação para estimar o desempenho térmico e testar alternativas de projeto é a maneira mais eficaz de projetar ou analisar edifícios não convencionais, devido à panóplia de variáveis complexas que é necessário avaliar. No mesmo domínio, o trabalho de investigação de Jorge Fernandes e Ricardo Mateus (Projeto reVer - [www.rever.pt](http://www.rever.pt)) tem como objetivo estudar o desempenho térmico de edifícios vernáculos portugueses, em condições reais de utilização [5, 6]. Esta investigação utiliza ferramentas de simulação para identificar os pontos fortes e fracos de diferentes estratégias passivas e comparar o desempenho deste tipo de edifícios com o de edifícios convencionais nas mesmas condições. Num estudo de caso do referido projeto, os resultados mostraram que o edifício teve um desempenho térmico adequado durante a maior parte do ano, mesmo sabendo que os seus elementos construtivos não satisfazem os requisitos mínimos para o coeficiente de transmissão térmica (U) definidos pelo regulamento nacional sobre o desempenho energético dos edifícios [6, 7]. Neste contexto, as ferramentas de simulação podem ter um papel importante na validação de soluções não convencionais, que não respeitem alguns requisitos térmicos específicos, mas que, numa análise holística do desempenho, possam ter desempenho igual ou semelhante. O exemplo de edifícios vernáculos visa estabelecer uma ligação para o contexto atual, onde o número de operações de renovação de edifícios é considerável e onde a aplicação de alguns requisitos da regulamentação térmica é feita sem a prévia análise da especificidade das características de cada edifício. Tal como neste tipo de edifícios, o trabalho desenvolvido pelos estudantes no projeto de habitações de turismo, onde os perfis de ocupação e utilização são sazonais e variáveis (ar condicionado, sombreamento, ventilação, etc.) e os materiais e soluções construtivas muito diferentes dos utilizados normalmente no projeto de edifícios, as ferramentas de simulação são particularmente úteis para testar as diferentes soluções. No limite, e como uma hipótese de teste, essas soluções podem não

cumprir os requisitos legais, mas podem resultar em soluções de custo ótimo, que garantem as condições de conforto e eficiência energética durante os períodos de ocupação, sendo uma alternativa válida a outras soluções, mais adequadas para períodos de ocupação contínua. Deste modo, é útil a utilização de ferramentas de simulação na fase de projeto para analisar se sistemas de construção não convencionais podem ser utilizados na criação de um ambiente térmico interno adequado, especialmente quando estes apresentam inércia térmica muito alta ou muito baixa. Os sistemas modulares leves de construção apresentam uma crescente penetração no mercado da construção em Portugal, especialmente para o turismo em espaço rural e habitações de férias, com vantagens significativas, não apenas associadas ao custo de construção mais reduzido, mas também à rápida montagem e desmontagem, flexibilidade, uso mínimo de materiais, licenciamento simplificado e por utilizarem elementos de construção de juntas secas, que potenciam a sua reutilização e reciclagem. No entanto, geralmente apresentam baixa inércia térmica, o que pode ser problemático em alguns contextos climáticos, principalmente em regiões interiores, onde as amplitudes térmicas são elevadas e o verão e o inverno apresentam temperaturas mais extremas. A introdução de ferramentas de simulação nos cursos de arquitetura é essencial para fornecer aos alunos as competências necessárias para testarem e entenderem as influências das diferentes opções de projeto no desempenho térmico global do edifício, especialmente no caso de soluções não convencionais. O desempenho térmico dos projetos modulares desenvolvidos pelos estudantes na Unidade Curricular Atelier de Sustentabilidade é geralmente avaliado na Unidade Curricular Qualidade Ambiental Interior, com o objetivo de verificar a sua conformidade com a regulamentação portuguesa sobre Desempenho Energético de Edifícios. Esta regulamentação permite estimar o consumo energético de um edifício através de um método simplificado semi-estático, baseado no número de graus-dia. No entanto, e em complemento a essa verificação de conformidade regulamentar, no presente ano letivo foi organizado um workshop que incluiu apresentações e discussões sobre ferramentas informáticas de simulação energética que se poderiam aplicar no trabalho a desenvolver pelos alunos. O objetivo passou por, com o apoio dos autores deste artigo, desenvolver competências nos alunos no domínio da utilização das ferramentas de simulação na avaliação e integração de alguns parâmetros de sustentabilidade, desde as fases preliminares de projeto. Para além desta apresentação, foi feita outra por um engenheiro civil, António Machado, que trabalha na área de estudos ambientais. A referida apresentação focou-se na utilização de ferramentas informáticas e estruturação dos fluxos de informação para explorar, analisar e visualizar problemas de projeto num ambiente de programação visual parametrizado. Através da demonstração, utilizando exemplos pré-preparados, foram apresentados estudos realizados em fases preliminares de projeto, bem como formas de otimização e/ou análise multidimensional, compreendendo alguns fluxos de informação. Os programas informáticos e os plugins utilizados foram: Rhinoceros3D, Grasshopper, Ladybug, Honeybee, Colibri, Design Explorer e Galapagos.

#### EnergyPlus

O EnergyPlus é provavelmente o programa mais conhecido no domínio da simulação do comportamento energético dos edifícios (para estimar as necessidades de aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação, preparação de água quente, entre outros.). Além da sua reconhecida qualidade como método de simulação, a utilização generalizada também se deve ao facto do programa ser de utilização livre, ao seu código aberto e à possibilidade de ser executado em diferentes sistemas operativos. O seu desenvolvimento é financiado pelo Departamento de Tecnologias de Construção (BTO) do

Departamento de Energia dos EUA (DOE) e gerenciado pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL).

O EnergyPlus usa uma interface simples, baseada numa folha de cálculo, e por conseguinte não apresenta uma interface gráfica muito intuitiva. Em resposta a esta desvantagem foram desenvolvidas diferentes interfaces gráficas para o EnergyPlus, de modo a permitir modelar e realizar simulações mais facilmente, referindo-se a título de exemplo os programas apresentados nas seções seguintes.

#### Openstudio

O OpenStudio é um conjunto gratuito e de código-fonte aberto de ferramentas informáticas que permitem modelar o consumo total de energia de um edifício, com base no método de simulação EnergyPlus. Adicionalmente, permite a analisar o Fator de Luz do Dia (FLD) dos espaços interiores através do método Radiance. Este conjunto de ferramentas foi lançado pela primeira vez em abril de 2008 pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável do Departamento de Energia dos EUA (NREL), com o objetivo de facilitar os processos de simulação do comportamento energético, e encontra-se baseado nos métodos de simulação EnergyPlus e Radiance.

Os aplicativos gráficos incluem o plug-in OpenStudio SketchUp, o aplicativo OpenStudio, o ResultsViewer e a Parametric Analysis Tool (PAT). O plug-in OpenStudio SketchUp possibilita aos utilizadores a criação expedita da geometria do edifício necessária à simulação energética através da utilização do método EnergyPlus. Adicionalmente, para a criação da geometria, o OpenStudio também suporta a importação de ficheiros com o formato gbXML e IFC de aplicativos de terceiros. O OpenStudio é uma interface gráfica acessível e com os recursos necessários para a modelação em EnergyPlus, incluindo parâmetros relacionados com a envolvente, cargas, períodos de ocupação e definição dos sistemas de ventilação e ar condicionado (HVAC). O ResultsViewer permite navegar, visualizar e comparar os resultados da simulação, especialmente as séries temporais. O Parametric Analysis Tool (PAT) permite que os utilizadores analisem o impacto da aplicação de várias combinações predefinidas de Medidas do OpenStudio num modelo base, bem como exportem os resultados da análise para o Energy Design Assistance Program Tracker (EDAPT). O PAT permite analisar, de forma sistemática, medidas de conservação energética e possibilita a análise financeira da sua implementação. O "OpenStudio measure" é um programa ou script que permite alterar o modelo do OpenStudio, implementando no modelo energético do edifício pacotes de medidas de melhoria do comportamento energético, de uma forma simples e expedita. Normalmente, a implementação de uma medida modifica o modelo existente do OpenStudio para responder a uma determinada medida de conservação de energia (ECM, do inglês Energy Conservation Measure). Por exemplo, uma medida pode alterar as especificações do isolamento das paredes exteriores, ajustar a proporção entre as áreas envidraçadas e as opacas da envolvente vertical exterior, e alterar os perfis de operação e ocupação dos espaços interiores. Este programa também pode gerar relatórios sobre as entradas e saídas associadas a um determinado modelo energético; documento esse denominado de reporting measures (relatório do impacto das medidas).

#### DesignBuilder

A primeira versão do DesignBuilder foi lançada em 2005, sendo a primeira interface gráfica disponível para o método de simulação energética EnergyPlus (do Departamento de Energia dos EUA). O programa possui interoperabilidade BIM, facilitando a importação de modelos 3D. O DesignBuilder é um programa informático versátil, que fornece várias opções simplificadas para as fases iniciais do projeto e

opções mais complexas que permitem uma análise mais detalhada do modelo energético. O programa permite a análise do consumo de energia, emissões de dióxido de carbono, nível de conforto dos ocupantes, iluminação, dinâmica computacional dos fluidos (CFD, do inglês Computational Fluid Dynamics), avaliação de impacte ambiental, entre outros.

#### Modelação energética e avaliação

##### Modelação Energética

Os projetos desenvolvidos pelos alunos foram modelados no OpenStudio e DesignBuilder durante o workshop, com a ajuda dos co-autores deste artigo, Nzar Faiq e Jorge Fernandes, respectivamente.

##### OpenStudio: caso de estudo

A integração do OpenStudio com uma ferramenta gráfica como SketchUp permite que os projetistas avaliem o desempenho energético de um edifício durante as etapas iniciais do projeto. Para além disso, permite que os projetistas analisem o impacto de vários componentes do projeto no desempenho energético e escolham a melhor solução. Os estudos preliminares de projeto para analisar e identificar otimizações da forma e massa do edifício, orientação solar, a percentagem de área de janela em relação à área de parede (WWR), podem ser realizadas com o OpenStudio. O programa permite uma fácil integração dos parâmetros do projeto e uma avaliação sem esforço do seu desempenho energético. Os resultados da simulação realizados com OpenStudio são do modelo desenvolvido pelo aluno Antoni Mas (fig03). O impacte dos vários parâmetros (WWR, sombreamento e orientação) nas necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício foram analisados. Para comparar o impacte das várias opções, foram também consideradas as variações entre a intensidade de uso de energia (EUI) para aquecimento e arrefecimento. O controlo da iluminação natural não foi considerada nestes estudos e, portanto, o uso de energia para iluminação é igual em todas as opções do modelo.

Os resultados para os diferentes cenários de projeto estão apresentados nas tab01 a tab03. O seguinte parágrafo descreve e analisa as conclusões retiradas dos resultados.

Para a análise do WWR, a Intensidade de Uso de Energia (EUI) para aquecimento e arrefecimento é menor para a opção com o menor WWR. É um resultado esperado, uma vez que menores áreas de janelas reduzem as perdas de calor e os ganhos através da envolvente do edifício. Os valores da EUI para aquecimento e arrefecimento são diretamente proporcionais às percentagens do WWR. Essa análise ajudou o aluno a identificar a WWR ideal para o edifício de acordo com as características físicas do edifício; clima, localização, construção, etc.

##### DesignBuilder: caso de estudo

O projeto modular do estúdio desenvolvido pelo aluno Hélio Peixoto foi modelado e simulado no DesignBuilder. Os exemplos das simulações realizadas estão representadas na fig04.

Das simulações realizadas, foi possível perceber o desempenho do estúdio em função do tipo de dispositivo de sombreamento e, assim, comprovar que o modelo possuía a operação ideal, permitindo sombreamento no verão mas mantendo os ganhos de calor vantajosos no período de inverno.

Os resultados da simulação permitiram realizar ajustes no módulo, nomeadamente, a redução da área envidraçada da clarabóia e a aplicação de ripas de madeira ajustáveis num dos alçados.

A ferramenta Autodesk Flow Design também foi usada pelo aluno, tendo em consideração o vento predominante do verão vindo do oeste, que foi aproveitado tanto numa estratégia de arrefecimento passivo como em microgeração de energia (fig05). É importante realçar que na modelação e simulação os objetivos a atingir devem ser planeados para evitar perdas de tempo e trabalho desnecessários. Neste

sentido, destaca-se ainda que o contato dos alunos com este tipo de ferramentas permitiu-lhes desenvolver competências em relação aos detalhes arquitetónicos que realmente influenciam o desempenho térmico, por forma a que conseguissem simplificar o modelo para ser facilmente modelado neste tipo de ferramentas sem comprometer a precisão dos resultados finais.

#### Análise comparativa

No caso de estudo simulado com o DesignBuilder foram testadas três opções:

- Opção 1 - a versão original do edifício, projetada pelo aluno, ou seja, com uma clarabóia na inclinação norte do telhado e sombreamento nas janelas voltadas apenas para o sul;
- Opção 2 - sem clarabóia e ripas de sombreamento ajustáveis adicionais nas janelas voltadas para oeste;
- Opção 3 - sem clarabóia e sem ripas de sombreamento ajustáveis.

A Tab04 apresenta as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento das diferentes opções e a percentagem de melhoria de outras opções de design. A partir dos resultados, pode-se verificar que a Opção 2 tem o melhor desempenho. A melhoria está principalmente nas necessidades de arrefecimento, uma vez que a opção 1 apresenta ganhos solares excessivos através da clarabóia e das janelas voltadas para oeste. Com a remoção da clarabóia e com a inserção de ripas de sombreamento ajustáveis, foi possível reduzir as necessidades de energia para arrefecimento em cerca de 70% e o desempenho global em 58,2%.

A redução da área envidraçada na cobertura também teve um efeito positivo nas necessidades de aquecimento, uma vez que as perdas de calor por esta envolvente também foram minimizadas. Na opção 3, removendo as ripas de sombreamento ajustáveis, o desempenho diminuiu um pouco, tanto para aquecimento como para arrefecimento. Como os resultados mostram, as simulações foram úteis para testar as opções de projeto, e o desempenho geral do edifício aumentou significativamente em comparação com a Opção 1.

#### Conclusões

Num contexto de exigência por edifícios de elevado desempenho, a necessidade de análises quantitativas torna mais relevante o uso de ferramentas de simulação para testar e validar alternativas de projeto e analisar o desempenho geral dos edifícios. Assim, a introdução destas ferramentas e seu uso devem ser incentivados nos cursos de arquitetura. A rotina de uso deste tipo de ferramenta é útil não apenas para os alunos ganharem prática na simplificação dos modelos de simulação, mas também para desenvolver o seu sentido crítico na interpretação dos resultados e do impacto das suas opções de projeto no desempenho térmico global do edifício.

No seminário e nas oficinas, os alunos viram uma variedade de ferramentas disponíveis no mercado e a oportunidade de praticar com algumas para modelar os seus projetos e analisar se as soluções eram funcionais. Alguns alunos tiveram que mudar algumas soluções, como o tamanho das janelas e clarabóias, para minimizar o risco de sobreaquecimento, etc. O uso de ferramentas de simulação permitiu que os alunos entendessem o impacto das suas opções de projeto no desempenho térmico geral do edifício, permitindo melhorias significativas, nomeadamente um dos alunos conseguiu uma melhoria de quase 60% em comparação com o projeto inicial.

Estas ferramentas são úteis para arquitetos e engenheiros para prever o desempenho, otimizar soluções e, assim, reduzir os impactes ambientais associados ao uso de energia de fontes não renováveis. No entanto, estas também têm limitações, tais como: a complexidade associada à introdução dos perfis de utilização e sistemas complementares mecânicos, a falta de dados suficientes para caracterizar alguns materiais não convencionais e a dificuldade em inserir

geometrias mais complexas.

O crescente mercado da reabilitação e ampliação de edifícios existentes é também uma oportunidade de aplicar estas ferramentas na previsão de desempenho térmico, uma vez que nos centros históricos o número de edifícios que utilizam sistemas de construção não convencionais é significativo. A impossibilidade de realizar monitorizações em todos os edifícios torna necessário o uso destas ferramentas de simulação de energia.

#### AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece o apoio financeiro do Projeto UID/AUR/04509/2013 da FCTMEC por fundos nacionais e, quando aplicável, co-financiamento pelo FEDER sob o novo contrato de parceria PT2020 - Lab2PT, Escola de Arquitetura / Universidade do Minho, Portugal. Os terceiro e quarto autores gostariam de agradecer o apoio concedido pelos fundos do FEDER através do Programa Operacional de Competitividade e Internacionalização (POCI) e pelos fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projeto com a referência POCI-01-0145-FEDER-029328 e da bolsa de doutoramento com a referência PD/BD/113641/2015.

#### REFERÊNCIAS

- [8] P. Mendonça, "The Environment as Part of the Architectural Curricula in the University of Minho" in "Teaching a new Environmental Culture - The Environment as a Question of Architectural Education" da ENHSA - EAAE "European Network of Heads of Schools of Architecture - European Association for Architectural Education"; Nicosia, Cyprus, 2011, pp. 307-320; ISBN 978-2-930301-51-8.
- [9] P. Mendonça, "The Sustainability Studio in the Integrated Master in Architecture Course from the University of Minho" in Proceedings of the 2nd International Seminar from the Architecture and Urbanism Schools of Portuguese Language Academy - "Architecture Stages" Volume 2, Architecture and Urbanism Schools of Portuguese Language Academy, Lisbon, 2012, pp. 467-477; ISBN 978-972-9346-27-9.
- [10] P. Mendonça, "Living under a second skin - Environmental Impact reduction strategies of solar passive buildings in temperate climates", Doctorate Thesis in Civil Engineering, University of Minho: Guimarães, (2005).
- [11] N. Cardinale, G. Rospi, P. Stefanizzi, Energy and microclimatic performance of Mediterranean vernacular buildings: The Sassi district of Matera and the Trulli district of Alberobello, Build. Environ. 59 (2013) 590-598. doi:10.1016/j.buildenv.2012.10.006.
- [12] J. Fernandes, C. Pimenta, R. Mateus, S.M. Silva, L. Bragança, Contribution of Portuguese Vernacular Building Strategies to Indoor Thermal Comfort and Occupants' Perception, Buildings. 5 (2015) 1242-1264. doi:10.3390/buildings5041242.
- [13] J. Fernandes, R. Mateus, H. Gervásio, S. M. Silva & L. Bragança, Passive strategies used in Southern Portugal vernacular rammed earth buildings and their influence in thermal performance, Renewable Energy, 142 (2019) 345-363. doi:10.1016/j.renene.2019.04.098
- [14] DL118/2013, Decreto-Lei 118/2013: Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), Portugal, 2013. <http://dre.pt/pdf1s/2013/08/15900/0498805005.pdf>.