

## **MODELO SIMPLIFICADO PARA AVALIAÇÃO TÉCNICO ECONÓMICA DE UM SISTEMA RENOVÁVEL INTEGRADO**

**Rodrigues C.\*, Aelenei L.\***

\* Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038 Lisboa, Portugal,  
carlos.rodrigues@lneg.pt , laura.aelenei@lneg.pt

### **RESUMO**

O projeto IDEAS “Novel building Integration Designs for increased Efficiencies in Advanced climatically tunable renewable energy Systems” é um projeto financiado pelo Programa HORIZON2020, multidisciplinar que reúne várias temáticas científicas e competências para o desenvolvimento e demonstração de um novo conceito de design para integração em edifícios. O modelo combina várias tecnologias de energia renovável, incluindo solar fotovoltaica, solar térmica, armazenamento de energia térmica e bombas de calor (aerotérmica e geotérmica) acopladas a piso radiante. No presente trabalho os autores querem partilhar os resultados das atividades desenvolvidas na tarefa WP7 do projeto referente à análise tecno económica do novo conceito através do desenvolvimento de um modelo numérico usando o software MATLAB-Simulink. O modelo considera as características básicas dos componentes do sistema IDEAS e implementa um sistema de gestão de energia para satisfazer as necessidades energéticas associadas ao aquecimento e arrefecimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia Solar, Integração nos Edifícios, Armazenamento de Energia, NZEB

### **ABSTRACT**

IDEAS project “Novel building Integration Designs for increased Efficiencies in Advanced climatically tunable renewable energy Systems” is a project funded by the HORIZON2020 Program, a multidisciplinary project that brings together various scientific themes and competencies for the development and demonstration of a novel design concept for building integration. The model combines several renewable energy technologies including solar photovoltaic, solar thermal, thermal energy storage, geothermal and air source HP technology coupled with underfloor heating. In the present paper, the authors want to share the results of the activities developed in the WP7 of the project concerning the techno-economic analysis of the new concept through the development of a numerical model using the software MATLAB-Simulink. The model considers the basic characteristics of the components of the IDEAS system and implements an energy management system to satisfy the energy needs associated with heating and cooling.

**KEYWORDS:** Solar Energy, Building Integration, Energy Storage, NZEB

## INTRODUÇÃO

Os edifícios são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo de energia e 36% das emissões de CO<sub>2</sub> na União Europeia (EU), tornando-os o maior consumidor de energia na Europa. A publicação da nova Diretiva sobre o Desempenho Energético dos Edifícios em 2010 (EPBD, 2010) introduziu novos requisitos obrigando todos os edifícios novos, construídos a partir de 2020, a serem caracterizados por níveis mais elevados de desempenho energético, procurando explorar mais as fontes de energia renováveis disponíveis localmente numa base economicamente equilibrada e sem prejuízo para o conforto dos ocupantes. Para este fim, a partir 2020 todos os novos edifícios devem ser caracterizados por um balanço energético “quase nulo”. Um edifício de balanço energético quase nulo, ou nZEB, refere-se a um edifício com necessidades energéticas muito baixas, devido à adoção de medidas de eficiência, em que as necessidades serão supridas por fontes renováveis de energia. Consequentemente, a adoção de estratégias e medidas de eficiência energética, em conjunto com a integração e utilização de sistemas de energia renováveis (RES), no sector dos edifícios permite reduzir os consumos de energia e responder aos objetivos da política climática para 2030. Neste contexto, a investigação científica procura responder, através de atividades e projetos de investigação que visam a mitigação de soluções sustentáveis de eficiência energética, integração de renováveis e gestão de energia nos edifícios.

No presente trabalho os autores partilham alguns resultados dos trabalhos desenvolvidos no âmbito do projeto europeu aprovado no âmbito do programa Horizon 2020, “IDEAS-Novel building Integration Designs for increased Efficiencies in Advanced climatically tunable renewable energy Systems” (Home - Horizon 2020 IDEAS, 2020), relativamente a análise tecno económica do novo conceito relativamente ao desenvolvimento de um modelo numérico implementado no software MATLAB-Simulink. O projeto IDEAS visa desenvolver um sistema inovador integrado para edifícios, que combina várias tecnologias de energias renováveis, incluindo solar fotovoltaico, solar térmico, armazenamento de energia térmica e bombas de calor (aerotérmica e geotérmica) acopladas a piso radiante, Fig. 1.

## PROJETO IDEAS

### Conceito

O projeto IDEAS consiste no estudo, desenvolvimento e demonstração de um sistema avançado de produção, armazenamento e gestão inteligente de energia para ser integrado em edifícios residenciais e de serviços. O projeto propõe-se desenvolver a combinação de várias tecnologias de energia renovável, conforme se ilustra na Fig. 1.

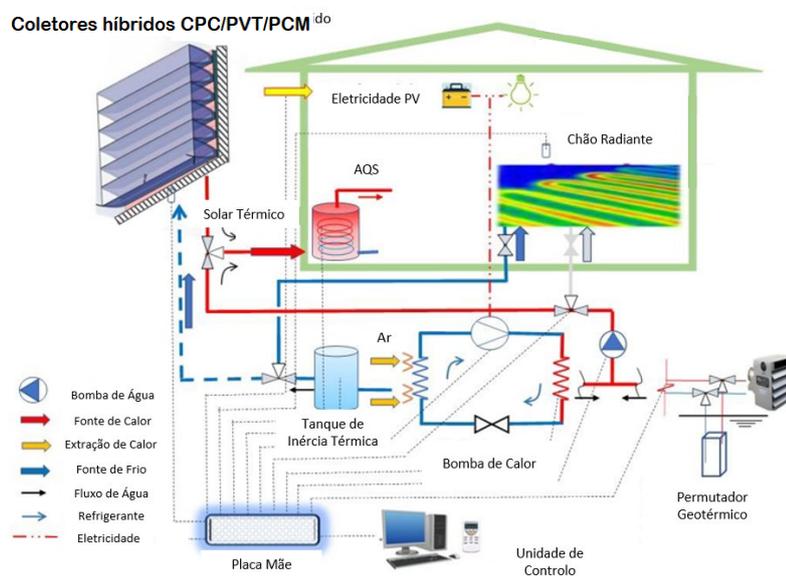


Fig. 1. Projeto IDEAS - Descrição Esquemática do Conceito, (Aelenei et.al., 2020)

As participações das diferentes tecnologias dependem da região, estação do ano e hora do dia. As tecnologias de armazenamento de energia em combinação com o fornecimento flexível de energia renovável podem cobrir a maior parte das necessidades de eletricidade, aquecimento e climatização. Para cumprir este objetivo o projeto inclui o desenvolvimento de uma ferramenta de gestão do armazenamento e abastecimento integrando energias renováveis provenientes de várias fontes. O conceito proposto no IDEAS pretende maximizar o aproveitamento destas energias desenvolvendo um edifício inovador na integração para além do atual estado da arte de fontes de energias renováveis (RES). No sistema CPC/PVT/PCM serão desenvolvidas a captação da radiação solar através da tecnologia de

concentração CPC e da aplicação de uma camada luminescente nas células PV, aumentando a produção de energia elétrica. Com a captação solar melhorada, a temperatura das células fotovoltaicas aumenta penalizando a eficiência PV, o que é minorado através da instalação de dissipadores de calor com incorporação de materiais de mudança de fase (PCM) que promovem a regulação da temperatura das células. O calor absorvido nas costas das células (PVT), poderá ser, assim, armazenado e utilizado em AQS, num sistema de aquecimento ambiente por piso radiante ou usado acoplado a bombas de calor aerotérmicas e/ou geotérmicas para baixar a temperatura do PV. O projeto teve início em maio de 2019 e os primeiros protótipos de coletores híbridos CPC/PVT/PCM construídos foram instalados num laboratório de demonstração em Itália tendo em vista a calibração dos modelos técnicos. Os protótipos finais estão a ser instalados em locais de demonstração do Projeto IDEAS, no campus da Universidade de Ferrara em Itália e em Mayo na Irlanda no Brackloon Community Centre.

## MODELAÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA INTEGRADO IDEAS

### Descrição do modelo

Para avaliar o desempenho técnico económico do sistema proposto no Projeto IDEAS, no âmbito da atividade WP7 foi desenvolvido um modelo numérico usando o software comercial MATLAB-Simulink. A hierarquia do modelo, em termos do diagrama principal e subsistemas IDEAS implementados, é apresentado na Fig. 2.

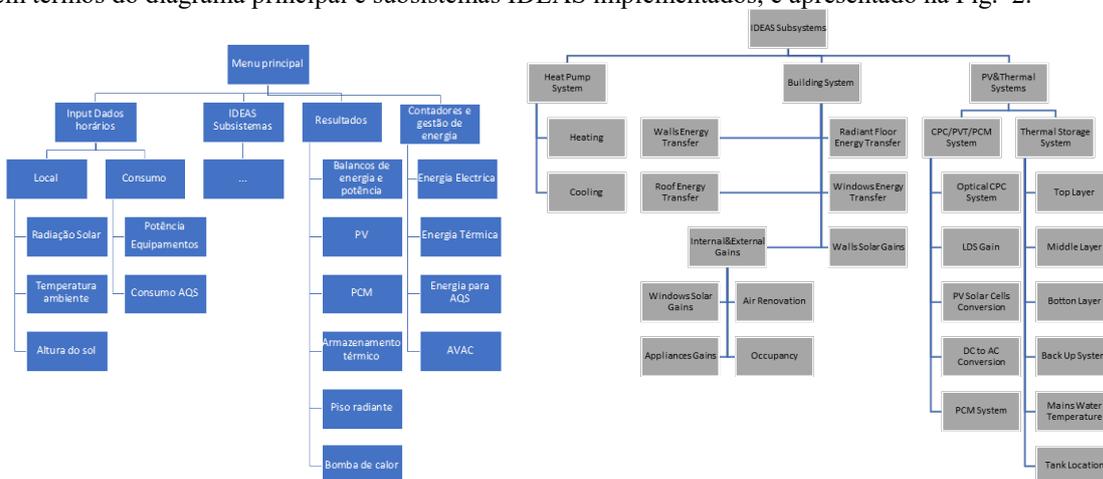


Fig. 2. Estrutura do modelo numérico/subsistemas

O modelo proposto combina várias tecnologias de energia renovável, incluindo solar fotovoltaica, solar térmica, armazenamento de energia térmica e bombas de calor (aerotérmica e geotérmica) acopladas a piso radiante e tem como entradas, valores horários de Radiação Solar e Temperatura Ambiente, de Anos Meteorológicos Típicos (para três zonas climáticas diferentes na Europa) e perfis de consumo estimados para a tipologia de edifício em estudo.

Quando se inicia a execução do Programa de simulação um Menu com a lista dos Locais com dados disponíveis é apresentado ao utilizador para escolha. Os dados do local são carregados para a memória e é realizado um pré-tratamento dos dados. No decorrer da simulação do funcionamento do sistema ao longo do ano é possível ao utilizador aceder a várias apresentações gráficas dos resultados para avaliação do desempenho dos diversos componentes.

### Implementação do modelo no Simulink

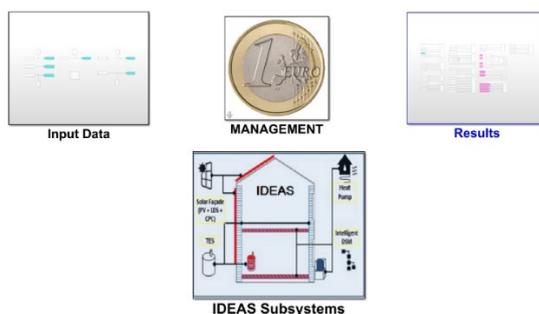


Fig. 3. Página principal no Simulink

O Programa no Simulink é desenvolvido a partir duma página principal, Fig. 3, que permite aceder a quatro blocos: Dados de Entrada, Subsistemas IDEAS, Gestão e Resultados, cada um deles responsável por tarefas específicas. O bloco de Dados de Entrada é responsável pela admissão e processamento de dados. O bloco de subsistemas IDEAS, Fig. 4, contém a representação computacional das diferentes tecnologias do projeto: o Aquecimento & Arrefecimento, o Sistema Edifício e o Protótipo CPC/PVT/PCM & Armazenamento de Energia Térmica. O Bloco de Gestão é responsável pelos cálculos energéticos, cálculos económicos, indicadores financeiros e transferência de dados. O bloco de Resultados permite aceder aos resultados mais importantes da simulação organizados sob a forma de várias representações gráficas e totalizadores.

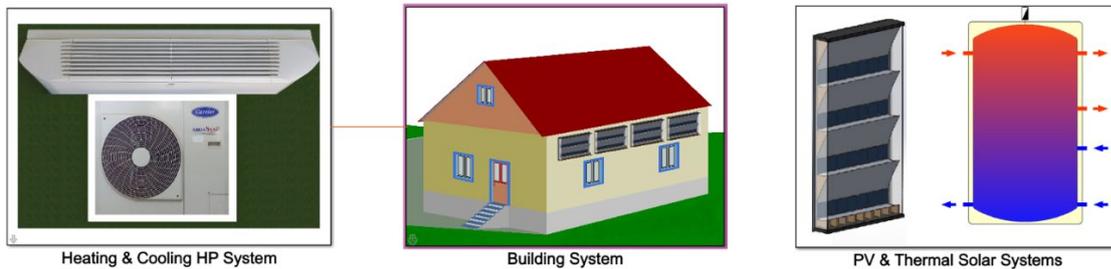


Fig. 4. Subsistemas IDEAS

Sistema solar PV & térmico, Subsistema CPC/PVT/PCM

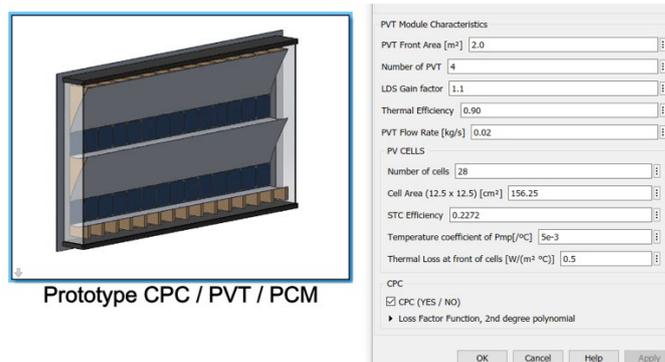


Fig. 5. Exemplo da caracterização dos subsistemas no modelo, protótipo CPC/PVT/PCM

O subsistema CPC/PVT/PCM, Fig. 5, modela o protótipo desenvolvido e permite a sua caracterização em termos da área, número de módulos, fator de ganho da implementação LDS, eficiência térmica na transferência de calor para o PCM e caudal no PVT. Relativamente às células PV permite definir o número, a área, a eficiência STC (1000 Wm<sup>2</sup>, 25 °C), o coeficiente de temperatura da potência STC e as perdas térmicas. Relativamente ao CPC permite modelar as perdas óticas associadas à geometria do protótipo com a altura do Sol numa fachada vertical.

O subsistema está dividido em quatro subsistemas referentes à modelação do CPC, da conversão fotovoltaica em função da irradiação solar nas células e da respetiva temperatura, da conversão da energia elétrica produzida pelo PV em CC em energia elétrica em CA e finalmente do subsistema que modela a transferência de energia térmica com o PCM. A Fig. 6 mostra estes quatro subsistemas contidos dentro do Subsistema CPC/PVT/PCM.

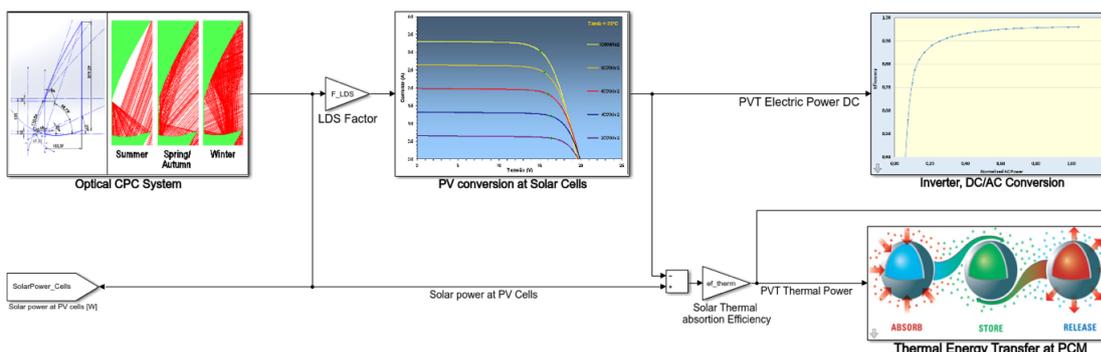


Fig. 6. Estrutura do modelo CPC/PVT/PCM – conversão elétrica e térmica

A fim de ilustrar o modelo desenvolvido, para os locais em estudo, consideramos um sistema constituído por 4 protótipos CPC/PVT/PCM, a que corresponde uma área de 8 m<sup>2</sup> e uma potência nominal PV, em condições STC (sem concentração), de 398 W.

A Fig. 7, mostra os perfis anuais para os quatro módulos montados numa Fachada de Lisboa. O primeiro gráfico mostra a radiação de energia solar disponível que atinge as células fotovoltaicas após concentração no CPC. O segundo a energia elétrica em CA produzida pelo sistema fotovoltaico com CPC e o terceiro a energia térmica disponível para aquecer o PCM.

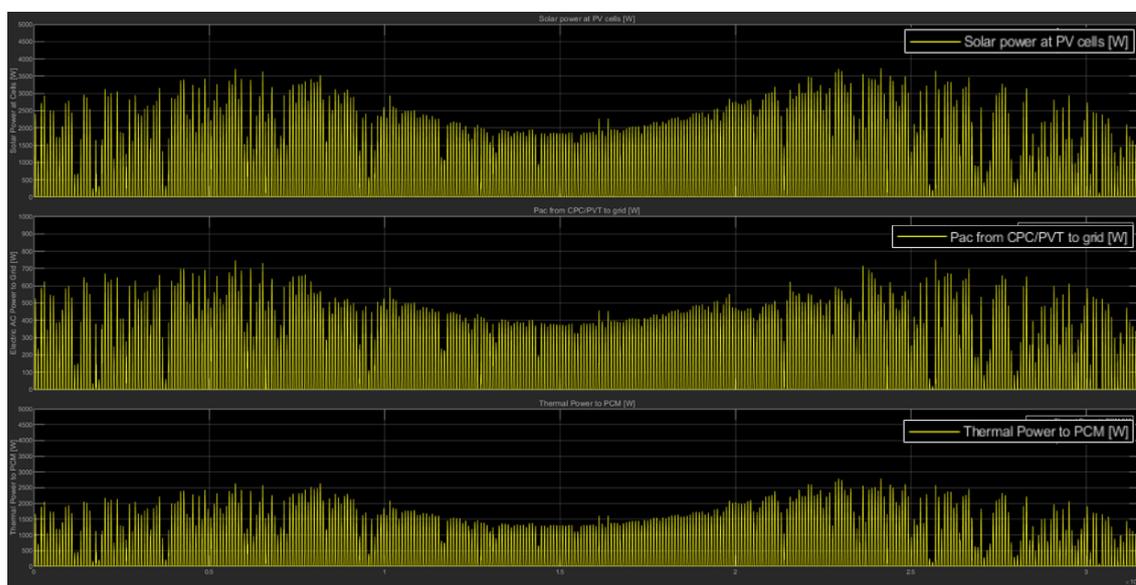


Fig. 7. Energia solar incidente nas células, energia elétrica entregue à rede e energia térmica no PCM

Na transferência de energia térmica, apenas a energia solar que atingiu o absorvedor (células) e não foi convertida em energia elétrica está disponível para conversão térmica. O subsistema responsável pela modelação da transferência de energia térmica com os materiais de mudança de fase, recorre à ferramenta Stateflow do Matlab que modela a temperatura do PCM de acordo com a fase do material (sólido, em fusão ou líquido) e os ganhos e perdas térmicas.

O modelo inclui controlo da circulação do fluido na parte posterior do PVT em função da temperatura. Em particular, atendendo a que a capacidade de armazenamento de energia térmica é limitada e que o funcionamento das células solares a temperaturas elevadas não é aconselhável, a circulação do fluido muda para um dissipador de calor externo, quando o valor limite de temperatura é atingido arrefecendo o PCM na parte posterior das células.

No Subsistema armazenamento de energia térmica, o principal objetivo da modelação é determinarmos as temperaturas dentro do depósito, resultantes das transferências de energia associadas aos diferentes caudais nos circuitos externos ligados, nomeadamente o circuito PCM, o circuito AQS e o circuito com o Piso Radiante. Para manter o modelo simples procedeu-se à implementação de um depósito de armazenamento térmico com três camadas consideradas com temperatura uniforme. A camada superior, onde a temperatura é mais elevada, recebe a água aquecida pelo protótipo CPC/PVT/PCM. Nesta camada, há também a extração de água para usos domésticos (AQS). A camada intermédia é responsável por manter o balanço energético entre a camada superior e a camada inferior, sendo a circulação pelo Piso Radiante feita nesta camada. Na camada inferior, pode entrar água fria da rede, se houver consumo de AQS, e sai água para circulação na parte posterior do PVT/PCM fechando o circuito. O sistema de armazenamento térmico é caracterizado pela capacidade, dimensões, coeficientes de perdas térmicas no topo, lado e fundo e pela temperatura de utilização no AQS e modelo da temperatura da água da rede a utilizar.

Como exemplo dos resultados da modelação na transferência de energia térmica entre o PCM e o armazenamento, na Fig. 8 são apresentados três gráficos com a ampliação dos resultados anuais para Lisboa referentes à energia térmica disponível para o PCM, à energia retirada do PCM (circulação do fluido) e à temperatura média do PCM. Os saltos observados no período noturno estão associados à extração de AQS que provoca a entrada de água da rede, reduzindo a temperatura do depósito no nível inferior, de tal forma que por vezes é menor que a do PCM e ativa a circulação de extração de energia do PCM. Os patamares observados na temperatura do PCM estão relacionados com a mudança de fase em que duas fases coexistem no material.

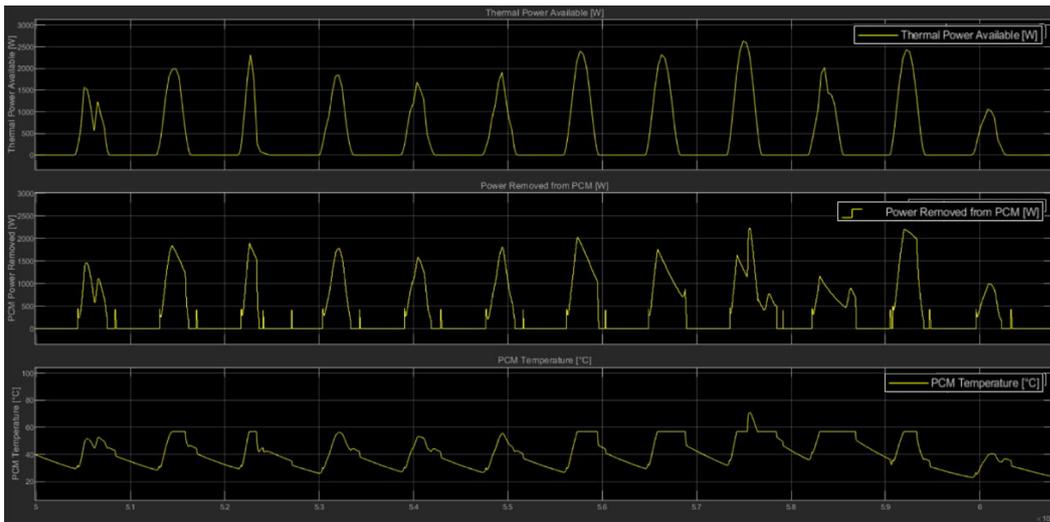


Fig. 8. Sistema PCM, ampliação dos resultados anuais para os primeiros 12 dias de março em Lisboa

### Subsistema Edifício

Este subsistema visa modelar uma casa ou edifício padrão típico, a fim de estimar como o conceito IDEAS irá influenciar o consumo de energia. Dependendo do país, os parâmetros que caracterizam o edifício podem ser alterados para dar cumprimento à legislação local. O utilizador pode alterar as dimensões do edifício, o número, dimensões e orientação das janelas bem como definir, a temperatura inicial, as propriedades do ar, do interior e as propriedades físicas dos mecanismos de transferência de calor, tais como a emissividade das paredes, piso, telhado e janelas e os coeficientes de convecção para a superfície das paredes no interior e exterior da casa. A temperatura no interior do edifício é influenciada pelas características da envolvente.

Na Fig. 9, mostra-se o subsistema Edifício capaz de calcular a temperatura no interior. O modelo simplificado considera que o edifício troca calor com o ambiente através das suas paredes e janelas. Cada componente da construção é simulado numa combinação de convecção térmica, condução térmica e massa térmica. Os ganhos externos e internos são também contemplados no interior deste subsistema, bem como a possibilidade de utilizar um piso radiante para aquecimento no edifício quando a energia térmica armazenada o permite. Para além das trocas de energia com o ambiente, a partir dos parâmetros que caracterizam os elementos construtivos no subsistema Edifício calculam-se também o coeficiente de transferência de calor das paredes, janelas e o coeficiente global do edifício. Estes valores permitem ao utilizador fazer uma comparação direta entre o desempenho energético do edifício que está a ser modelado e outros edifícios padrão.

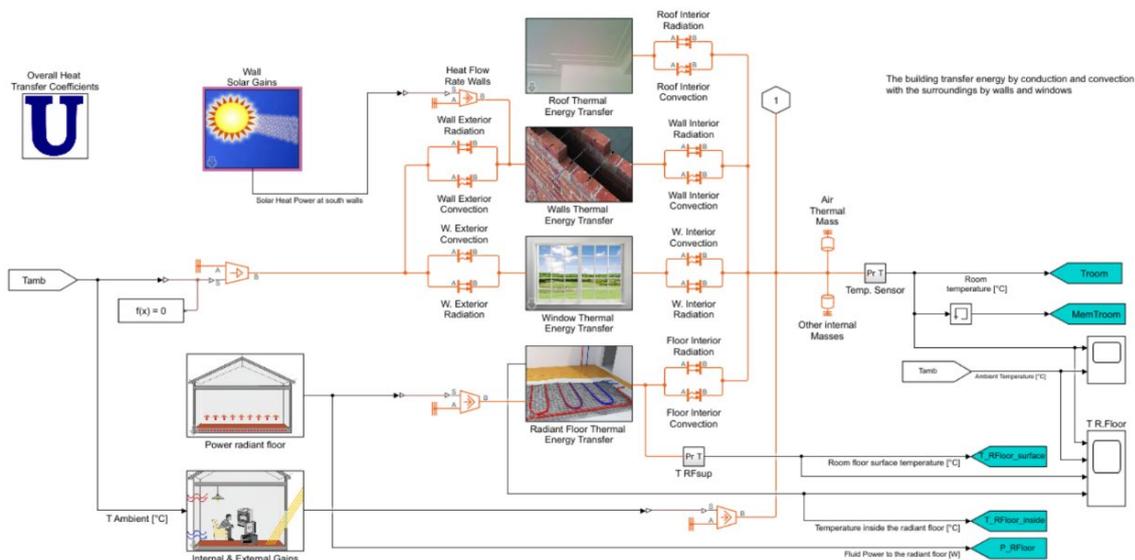


Fig. 9. Subsistema Edifício

## Sistema de Aquecimento & Arrefecimento

Na climatização do Edifício o IDEAS considera um sistema baseado numa bomba de calor, onde o subsistema de bomba de calor é responsável por ajustar a temperatura da casa de acordo com as necessidades de Aquecimento e Arrefecimento do edifício, numa zona de conforto pré-definida pelo utilizador. Dependendo do local de implementação, podem ser utilizados diferentes set-points para as temperaturas de conforto.

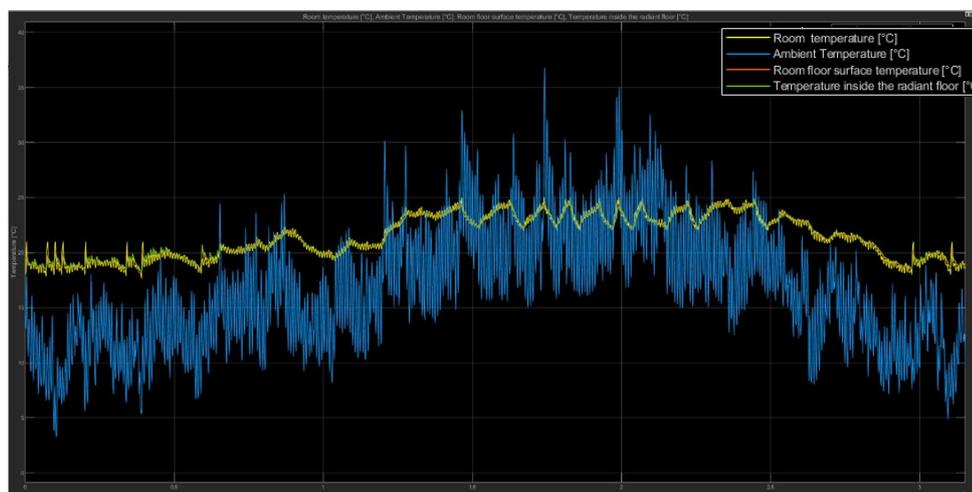


Fig. 10. Temperaturas exteriores e interiores no edifício com os componentes IDEAS em Lisboa

Na Fig. 10, apresentam-se os resultados obtidos, com os componentes ativos da climatização que integram o subsistema da bomba de calor e o piso radiante em funcionamento, em termos das temperaturas exteriores e interiores num edifício em Lisboa. Em termos de set-points, o aquecimento inicia-se a uma temperatura interior inferior a 18 °C e prolonga-se até uma temperatura interior de 21 °C. O arrefecimento começa a uma temperatura interior superior a 25 °C e prolonga-se até se atingir uma temperatura interior de 22 °C. Observa-se que a temperatura no interior do Edifício permanece entre os intervalos que são definidos pelo utilizador. Verifica-se que o edifício em Lisboa apresenta necessidades de aquecimento e arrefecimento, a que correspondem consumos elétricos da Bomba de Calor para manter as temperaturas de conforto no interior do edifício que apresentamos na Fig. 11.

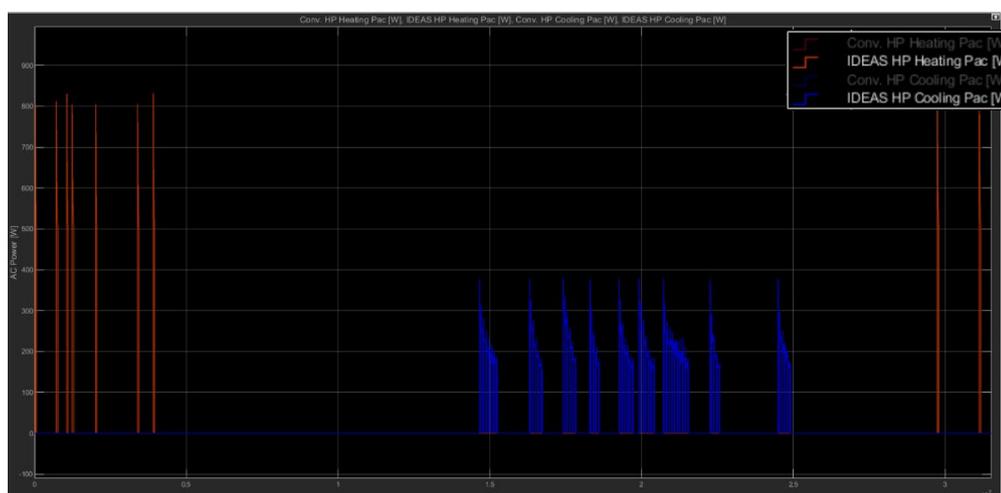


Fig. 11. Consumo elétrico para aquecimento e arrefecimento ao longo do ano em Lisboa

## RESULTADOS MODELAÇÃO EM DIFERENTES LOCAIS

Seguindo procedimentos idênticos ao descrito para Lisboa, utilizou-se o modelo para simular o mesmo tipo de edifício, com os mesmos consumos de eletricidade e AQS, os mesmos componentes IDEAS e os mesmos set-points na temperatura de conforto, nas cidades de Ferrara em Itália e Dublin na Irlanda, com condições climáticas diferentes. A fim de estimar a contribuição dos componentes IDEAS para as necessidades energéticas em eletricidade e AQS foi considerada uma casa unifamiliar habitada por uma família com 4 pessoas. Os consumos foram estimados a partir de

consumos reais sendo no estudo considerado um consumo anual em AQS de 58 m<sup>3</sup> a uma temperatura de 50 °C e um consumo anual de eletricidade de 2100 kWh pelos eletrodomésticos habituais numa habitação da classe média.

Na Tabela 1, é apresentado para comparação um resumo dos principais resultados da simulação anual para Lisboa, Ferrara e Dublin. A tabela mostra a energia solar incidente na superfície dos módulos CPC/PVT/PCM, montados na fachada vertical orientada a sul e a energia incidente nas células fotovoltaicas após concentração. São apresentadas também a energia solar térmica utilizada em AQS, a energia de backup necessária para se atingir a temperatura de utilização no consumo de AQS, a energia solar utilizada pelo piso radiante e também as perdas térmicas no PVT, na dissipação de energia e perdas no sistema de armazenamento. Os valores da energia eléctrica produzida pelo PVT, a energia eléctrica utilizada pela Bomba de Calor para satisfazer as necessidades de aquecimento e arrefecimento e o consumo de carga dos aparelhos são apresentados, bem como o consumo total de energia dos edifícios, o total da energia solar utilizada (térmica e eléctrica), a fracção solar e a eficiência global do sistema.

Atendendo aos valores do recurso solar disponível a fracção de utilização de energia solar utilizada no consumo (Fracção Solar) para o sistema IDEAS apresentado é mais elevada em Lisboa com 59,0 %, enquanto a fracção solar em Ferrara é de 40,8 % e em 30,7 %. A eficiência global obtida (energia utilizada / energia solar incidente) para os três locais é muito semelhante com valores de 27,3 %, 27,4 % e 26,0 % respectivamente.

Tabela 1. Sumário dos resultados obtidos nas simulações ao longo do ano para Lisboa, Ferrara e Dublin

| Loc.    | Em. Sol. Mod (kW h) | En.S ol. Cel (kW h) | Em. Sol. AQS (kW h) | Em. Sol. Bck (kW h) | Em. Cha o Rad . (k Wh ) | PV T Per d. Ext (k Wh ) | Dis. Ext. (k Wh ) | Tq. Per d (k Wh ) | En. PVT_ AC (kWh ) | En. Bo. Cal. (k Wh ) | En. AC Car g. (k Wh ) | En. Tot. Util (k Wh ) | ES. Util . (k Wh ) | Fra c. Sol . | Ef. Gl ob. |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------|------------|
| Lisboa  | 10248               | 4540                | 1753                | 476                 | 163                     | 201                     | 48                | 1068              | 878                | 244                  | 2101                  | 4736                  | 2794               | 0,590        | 0,273      |
| Ferrara | 8041                | 3492                | 1417                | 957                 | 95                      | 148                     | 14                | 786               | 694                | 841                  | 2100                  | 5409                  | 2206               | 0,408        | 0,274      |
| Dublin  | 6760                | 2592                | 1006                | 1666                | 213                     | 96                      | 0                 | 481               | 536                | 735                  | 2099                  | 5718                  | 1755               | 0,307        | 0,260      |

## CONCLUSÕES

O modelo técnico IDEAS numérico desenvolvido permite compreender e testar numericamente diferentes cenários, componentes e condições de funcionamento. Vários parâmetros que caracterizam os componentes do sistema, edifícios, clima local, necessidades de energia do utilizador e custo da energia podem ser alterados.. A análise global do desempenho dos componentes em desenvolvimento no projeto IDEAS, nomeadamente a utilização dos CPCs, das camadas luminescentes e dos armazenamentos em materiais de mudança de fase, nos módulos PVT, a utilização conjunta de Bombas de Calor Aerotérmicas e Geotérmicas, assim como o desenvolvimento do sistema de gestão global do sistema, permitirá ter uma visão completa das vantagens técnico económicas do sistema para edifícios residenciais, comerciais e públicos. Possibilita assim associar uma análise técnico-económica ao interesse deste tipo de equipamentos em edifícios no âmbito do conceito geral de edifícios nZEB.

## AGRADECIMENTOS

O projeto “IDEAS - Novel building Integration Designs for increased Efficiencies in Advanced climatically tunable renewable energy Systems” é financiado pelo programa de investigação e inovação da União Europeia Horizon 2020, através do contrato No 815271.

## REFERÊNCIAS

Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>, [Acedido a 27 maio de 2022]

Horizon 2020 IDEAS | Novel building Integration Designs for increased Efficiencies in Advanced climatically tunable renewable energy Systems, <https://www.horizon2020ideas.eu/> , [Acedido a 27 maio de 2022]

Aelenei L., Brites M.J., Joyce A, Esteves M.A., Rodrigues C., Barros H., Valente D. (2020), Novo modelo de integração de sistemas avançados de energia renovável nos edifícios. CIES2020, Livro de Comunicações, Gonçalves H. e Romero M. (Ed.). Lisboa, Portugal: LNEG, 3-5 novembro, 2020, p. 1123-1130.