

Análise de custo-benefício da implementação de materiais de mudança de fase no Norte de Portugal

Catarina Araújo, MSc

Universidade do Minho
cba@civil.uminho.pt

André Pinheiro

Universidade do Minho
a61818@alunos.uminho.pt

Luís Bragança, PhD

Universidade do Minho
braganca@civil.uminho.pt

RESUMO

O sector dos edifícios contribui para 30% das emissões anuais de Gases de Efeito Estufa e consome cerca de 40% da energia. Contudo, o consumo de energia nos edifícios pode ser reduzido entre 30% a 80% através de tecnologias comercialmente disponíveis. A aplicação de tecnologias de armazenamento de energia térmica na envolvente dos edifícios tem sido indicada como um método benéfico para a melhoria da eficiência energética dos edifícios. Diversos estudos têm sido realizados, evidenciando as vantagens da implementação de materiais de mudança de fase na envolvente de edifícios. Este método permite reduzir o consumo energético no interior dos edifícios e consequentemente os impactos ambientais deste setor. Neste trabalho apresenta-se um estudo focado na análise da implementação de materiais de mudança de fase na envolvente de um edifício residencial unifamiliar, localizado em Vila Real. Esta análise, efetuada através de simulação dinâmica, teve como objetivo estudar os benefícios deste tipo de sistemas no que respeita ao consumo energético e ao conforto térmico no interior do edifício. Adicionalmente apresenta-se também uma análise da viabilidade económica desta solução. O estudo permitiu concluir que a adoção desta tecnologia permite reduzir as necessidades energéticas de edifícios. Verificou-se ainda que a adoção de materiais de mudança de fase permitiu melhorar o conforto térmico do edifício analisado, estando esta melhoria sobretudo relacionada com a estação de arrefecimento. Por fim, a análise de viabilidade económica demonstrou que estes materiais possuem ainda um investimento inicial bastante elevado o que pode condicionar a sua ampla aplicabilidade.

INTRODUÇÃO

A procura progressiva de energia a nível mundial é um assunto de crescente importância no que se refere às alterações climáticas e ao fornecimento de energia. O mundo consome elevadas quantias de combustíveis fósseis impulsionando as mudanças climáticas e reduzindo drasticamente as reservas de combustíveis fósseis. Um método para beneficiar o uso de energia globalmente é aumentar a eficiência energética dos edifícios.

O setor da construção europeu é responsável por cerca de 40% do consumo de energia (EU 2010). Atualmente a eficiência energética é um dos mais aspetos mais focados na gestão energética regional, nacional e internacional. A União Europeia propõe uma estratégia energética para 2020, que recomenda a redução de 20% no consumo de energia primária e das emissões de CO₂ e recomenda o aumento de 20% no consumo energético proveniente de fontes renováveis (EU 2017).

O Mercado mundial de energia é dominado pelos combustíveis fósseis a uma percentagem de cerca de 81% (IEA 2017). Contudo, os combustíveis estão a apresentar custos elevados devido à sua escassez, e a sua utilização está correlacionada com a emissão de gases nocivos para o ambiente.

Em Portugal este problema tem ainda mais relevância considerando que grande parte da energia consumida é importada. Segundo a DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia), a dependência de Portugal em termos de importação de energia foi em 2016 de 74,8% (DGEG 2016). Apesar de se verificar uma tendência para a descida deste valor (em 2015 correspondia a 78,3%), o país tem ainda um grande caminho a percorrer.

Por outro lado, apesar do seu clima temperado, Portugal é também um dos países da Europa onde mais se morre de frio (Fowler et al. 2015). É igualmente um dos países europeus onde se verifica um maior índice de pobreza energética (Simoes et al. 2016; Thomson & Snell 2013).

A aplicação de tecnologias de armazenamento de energia térmica na envolvente dos edifícios tem sido indicada como um método benéfico para a melhoria da eficiência energética dos edifícios. Este método permite reduzir os impactos ambientais relacionados com o consumo de energia (Pasupathy et al. 2008).

O armazenamento de energia térmica é um método de conservação temporária de energia para utilização futura. Em edifícios habitacionais esta energia pode ser utilizada para climatização de espaços de forma passiva ou em sistemas ativos (Iten et al. 2016). Pode atender assim a muitos setores como o comercial, o industrial e o habitacional. O armazenamento de energia térmica pode ser efetuado através de aquecimento ou arrefecimento de uma substância (armazenamento de calor sensível) ou através do processo de mudança de fase (armazenamento de calor latente) (Giro-Paloma et al. 2016).

No armazenamento de energia por calor latente, utiliza-se o material de mudança de fase que absorve e armazena energia calorífica ambiente, quando este transita do estado sólido para o estado líquido, o que só acontece quando a temperatura que o rodeia é superior ao ponto de fusão do material. Em seguida, este liberta a energia anteriormente armazenada quando transita do estado líquido para o estado sólido, ou seja, quando a temperatura que o rodeia é inferior ao ponto de solidificação do PCM (Phase Change Material) (Cabeza 2014).

Através da mudança de fase de calor latente, os PCMs controlam as temperaturas num intervalo de tempo específico. Uma vez que a temperatura de mudança de fase está próxima da temperatura de conforto desejada, a energia usada para mudar de fase levará a um ambiente interior mais estável e confortável. O uso de PCMs também permite reduzir os períodos máximos de arrefecimento e aquecimento e, conseqüentemente, os picos de consumo de energia (Kalnæs & Jelle 2015).

Durante os últimos anos diversos estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de analisar as potencialidades do armazenamento de energia térmica através de materiais de mudança de fase (Alkan et al. 2009; Álvarez et al. 2013; Evola et al. 2014; Goia et al. 2014; Hed & Bellander 2006; Hunger et al. 2009; Karim et al. 2014; Medved & Arkar 2008; Navarro et al. 2016; Waqas & Kumar 2011). Estes estudos têm-se focado tanto em sistemas ativos (Alkan et al. 2009; Goia et al. 2014; Hunger et al. 2009; Karim et al. 2014; Navarro et al. 2016) como passivos (Álvarez et al. 2013; Evola et al. 2014; Hed & Bellander 2006; Medved & Arkar 2008; Waqas & Kumar 2011), demonstrando os benefícios destes materiais sob o ponto de vista da eficiência energética.

Tendo em conta os problemas identificados e as vantagens dos PCMs demonstradas por estes autores, este estudo pretende analisar a viabilidade da aplicação de materiais de mudança de fase num edifício localizado no Norte de Portugal. Esta análise será efetuada a três níveis: eficiência energética, conforto térmico e viabilidade económica.

METODOLGIA

Eficiência Energética

A parte inicial deste estudo foi destinada à análise das necessidades energéticas do caso de estudo perante a aplicação de materiais de mudança de fase. Esta análise foi efetuada com o recurso a uma

ferramenta de simulação dinâmica: EnergyPlus. No âmbito deste *software* foi considerado um algoritmo para análise do balanço térmico baseado em diferenças finitas. Alguns autores (P C Tabares-Velasco 2012; Tabares-Velasco et al. 2012), validaram a utilização deste *software*, no que refere à análise de tecnologias com incorporação de PCMs, usando o algoritmo de equilíbrio térmico baseado em diferenças finitas. Estes autores usaram uma abordagem semelhante à preconizada pela ASHRAE Standard 140 (ASHRAE 2004), que consiste em verificação analítica, teste comparativo e validação empírica. De acordo com esses estudos, este modelo pode ser usado com resultados anuais e mensais aceitáveis (Tabares-Velasco et al. 2012).

Para análise do impacto dos materiais de mudança de fase no consumo energético do edifício foi considerada a aplicação de uma camada de PCMs nas paredes exteriores e na laje de tecto. No total foi considerada a aplicação de PCMs numa área correspondente a 213m².

No que respeita aos materiais de mudança de fase foram analisados oito PCMs diferentes, com diferentes pontos de fusão: RT 15, RT 18, RT 21, RT22, RT 24, RT 25, RT 26 e RT28. Estes materiais apresentam um calor específico de 2 kJ/kg°C e uma condutibilidade térmica correspondente a 0,2 W/m°C. As restantes características dos materiais analisados são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos materiais de mudança de fase

	RT 15	RT18	RT21	RT22	RT24	RT25	RT26	RT28
Intervalo de fusão (°C)	10-17	17-19	18-23	20-23	21-25	22-26	25-26	27-29
Capacidade de armazenamento de calor (kJ/kg)	155	260	155	190	160	170	180	250
Densidade (kg/m³)	825	825	825	730	825	820	815	825

Conforto térmico

O conforto térmico foi analisado através de 2 indicadores, ambos baseados na temperatura operativa. A temperatura operativa é definida pela norma ISO 7730 (ISO 2005) como “a temperatura uniforme de um compartimento fechado, no qual um ocupante trocasse a mesma quantidade de calor por radiação e convecção do que a quantidade trocada no ambiente real não uniforme”. Este parâmetro representa assim a média ponderada da temperatura do ar e da temperatura radiante.

Por um lado analisou-se o valor da temperatura operativa mínima atingida em cada compartimento na estação de aquecimento e o valor da temperatura operativa máxima na estação de arrefecimento. Por outro lado comparou-se a oscilação da temperatura operativa em semanas típicas para as estações de aquecimento e arrefecimento.

Viabilidade económica

O custo do ciclo de vida do edifício foi avaliado de acordo com o método proposto pelo regulamento delegado n.º 244/2012, de 16 de Janeiro de 2012 (EU 2012), conforme apresentado na equação 1.

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i(j)} \times R_d(i) - V_{f,\tau}(j)) \right] \quad (1)$$

Onde:

τ - Período

$C_g(\tau)$ – Custo global durante o período de cálculo

C_I – Custo de investimento inicial para a medida j

$C_{a,i}(j)$ - Custo anual durante o ano i para a medida j

$R_d(i)$ – Taxa de desconto para o ano i

$V_{f,\tau}(j)$ – Valor residual da j no final do período de cálculo

Foi tida em conta uma taxa de desconto (inflação) de 3%, assim como a evolução dos custos de energia. Os preços da energia previstos nas tendências energéticas da UE até 2030, publicados pela

Comissão Europeia em 2009, foram considerados para o período entre 2013 e 2030 (EC 2009). Para o período entre 2030 e 2046 foram utilizados os preços previstos no Energy Road Map 2050 (EC 2011)

Os custos de investimento para a solução de referência são estimados com base numa análise de mercado. Os custos de investimento para PCMs foram fornecidos pelo fabricante (Rubitherm 2017).

Caso de Estudo

De forma a proceder ao estudo proposto, foi considerado um edifício típico português. Este edifício corresponde a uma moradia unifamiliar, de um piso e tipologia T2, com área bruta de 110 m². Na Figura 1 apresentam-se as plantas e alçados deste edifício.

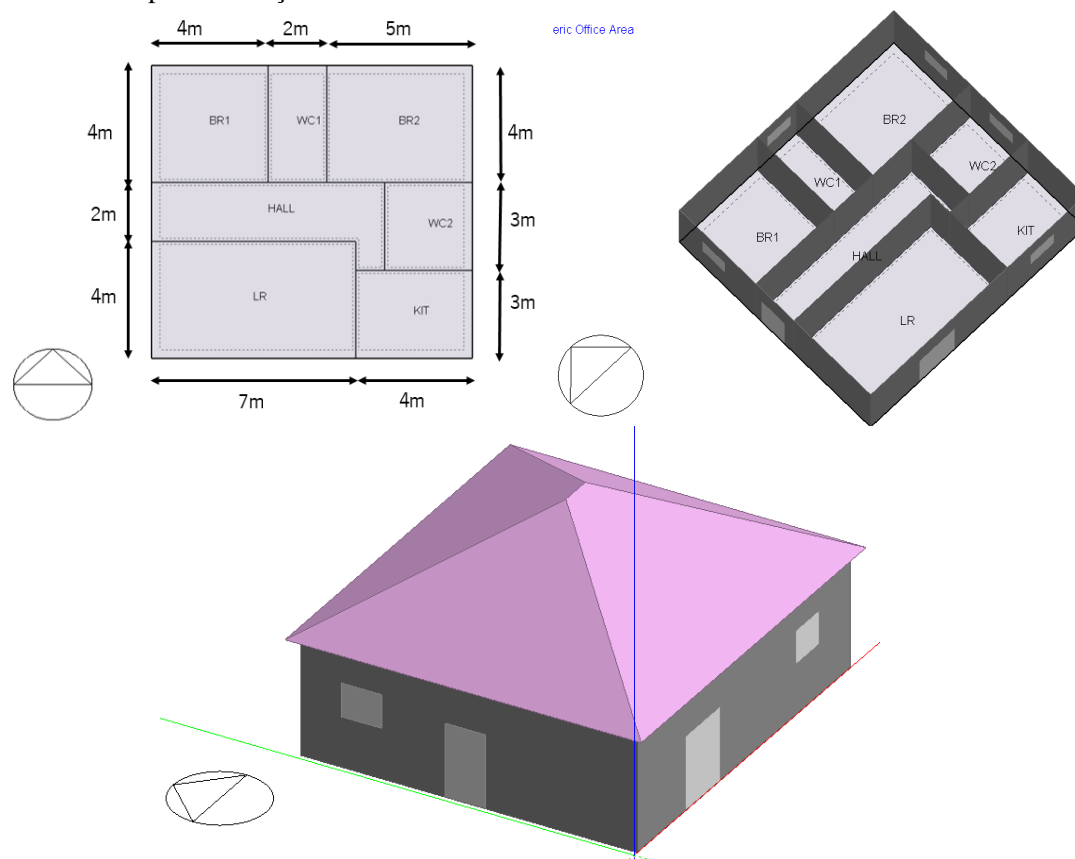


Figura 1. Caso de estudo.

As soluções construtivas definidas para o caso de estudo foram selecionadas tendo em consideração as soluções tipicamente existentes em edifícios construídos em Portugal entre 1960 e 1990 (época construtiva à qual pertence a maioria dos edifícios existentes no país). Foi, no entanto adotado gesso cartonado como revestimento interior das paredes exteriores e tecto falso na laje superior do piso habitável. Estas soluções foram adotadas para garantir que a única diferença entre a solução de referências e as soluções com PCMs era a existências dos próprios PCMs (Tabela 2).

Tabela 2. Soluções construtivas do caso de estudo.

Elemento construtivo	Solução construtiva	U (W/m ² .°C)
Paredes exteriores	Parede simples com pano de 22 rebocado com 2 cm de reboco pelo exterior com revestida com gesso cartonado pelo interior	1.76
Paredes interiores	Parede simples com pano de 22 rebocada de ambos os lados com 2cm de reboco	1.76
Laje superior	Laje aligeirada com tecto falso	2.8
Cobertura	Cobertura inclinada com laje aligeirada	3.0
Pavimento	Laje de betão revestida com pavimento cerâmico	1.65
Envidraçados	Vidro simples e caixilharia de madeira	4.1

No que respeita aos sistemas de climatização, foi considerada a existência de equipamentos elétricos móveis para aquecimento e arrefecimento. De acordo com o preconizado pelo Decreto-Lei 18/2013 (Portugal 2013), foram consideradas as temperaturas de conforto de 18°C para o Inverno e 25°C para o Verão. No que respeita à ventilação, considerou-se que o edifício era naturalmente ventilado a uma taxa de 1 renovação de ar por hora.

No que se refere à ocupação do edifício, foi definida uma ocupação de três pessoas tendo em consideração que se trata de um edifício de tipologia T2. Durante um ano foi considerada a seguinte ocupação:

- Dias úteis (segunda a sexta-feira): As pessoas encontram-se no edifício, exceto das 8 às 19 horas.
- Fim-de-semana (Sábado e Domingo): As pessoas encontram-se 24 horas no edifício.

Admitiu-se a existência de estores nos vãos envidraçados. Relativamente a estes foi considerado o seguinte perfil de funcionamento: abertos durante o dia (das 7h às 19h) e fechados durante a noite na estação de aquecimento; totalmente abertos entre as 7h e as 8h, apenas 30% abertos entre as 8h e as 19h e fechados durante a noite na estação de arrefecimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Eficiência Energética

Na Figura 2 são apresentadas as necessidades energéticas do edifício em estudo considerando a solução de referência e a aplicação dos 8 PCMs estudados.

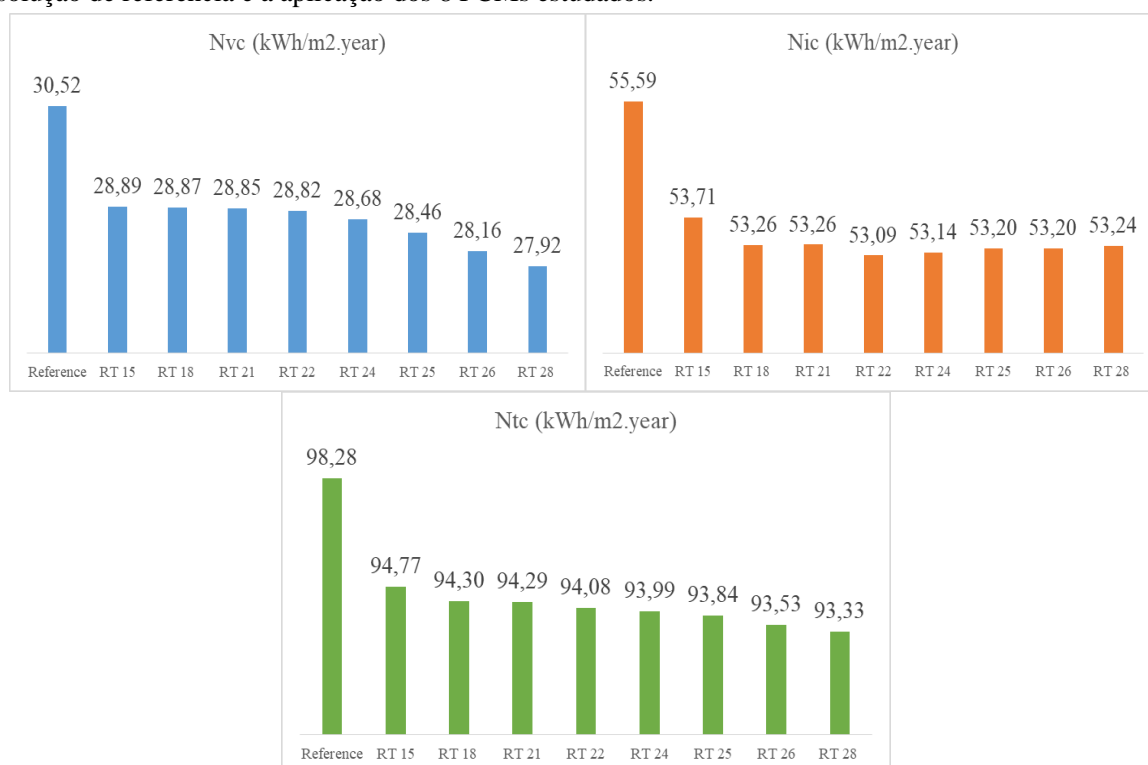


Figura 2. Necessidades energéticas do caso de estudo com solução de referências e com implementação dos materiais de mudança de fase.

É possível verificar que a implementação de materiais de mudança de fase na envolvente do edifício permite diminuir as necessidades energéticas na estação de aquecimento e de arrefecimento. Em média esta diminuição corresponde a aproximadamente 2 kWh.m².ano em ambas as estações.

No que respeita às necessidades de arrefecimento, verifica-se que o PCM que produziu melhores resultados, RT28, permitiu diminuir as necessidades de energia para aquecimento em 2,60 kWh.m².ano, o que representa uma diminuição de cerca de 9%. Por outro lado, na análise da estação de aquecimento verificou-se que o PCM com melhores resultados foi o RT22, permitindo obter uma redução das necessidades energéticas para aquecimento de cerca de 5%.

Relativamente às necessidades de energia primária totais, o PCM com melhor desempenho foi também o RT28, permitindo reduzir cerca de 4,95 kWh.m².ano a este índice. Por este motivo, nos pontos que se seguem esta (RT28) será a solução que será considerada para análise de conforto térmico e da viabilidade económica.

Conforto térmico

O conforto térmico foi analisado tendo por base os valores da temperatura operativa no interior dos compartimentos.

Nas Figuras 3 e 4 apresenta-se a temperatura operativa mínima e máxima obtida em cada compartimento com a solução de referência e com a solução que inclui o PCM RT28.

Temperatura Operativa Mínima

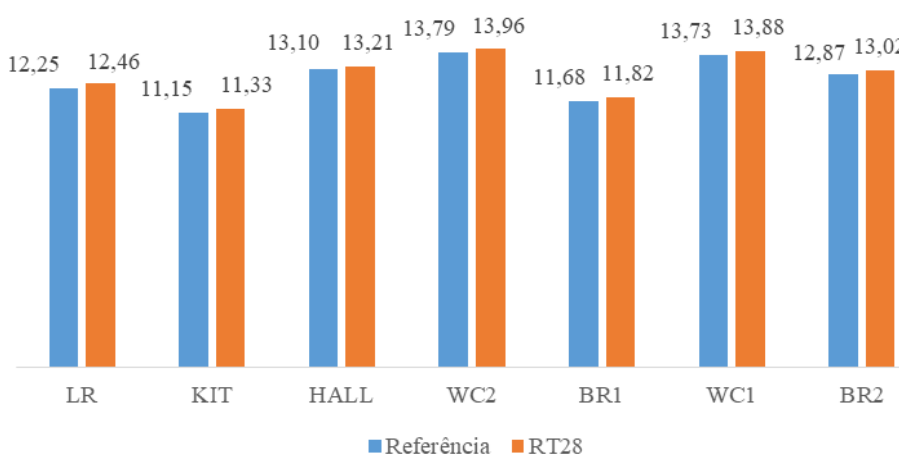


Figura 3. Temperatura Operativa Mínima atingida em cada compartimento durante um ano.

Temperatura Operativa Máxima

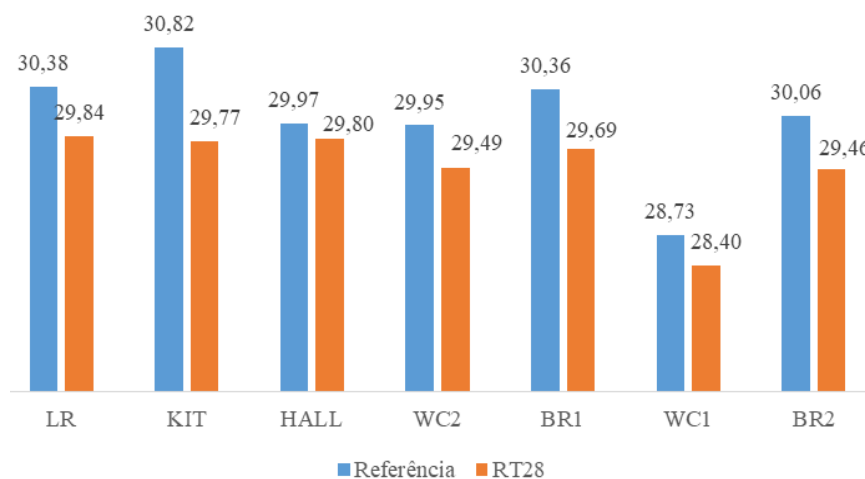


Figura 4. Temperatura Operativa Máxima atingida em cada compartimento durante um ano.

Nas Figuras anteriores é possível verificar que a implementação de materiais de mudança de fase permite obter ligeiras melhorias ao nível do conforto térmico.

Nas Figuras 5 e 6 é apresentada a oscilação da temperatura operativa durante uma semana típica de Inverno (entre 22 e 28 de Janeiro) e durante uma semana típica de Verão (entre 15 e 21 de Julho).

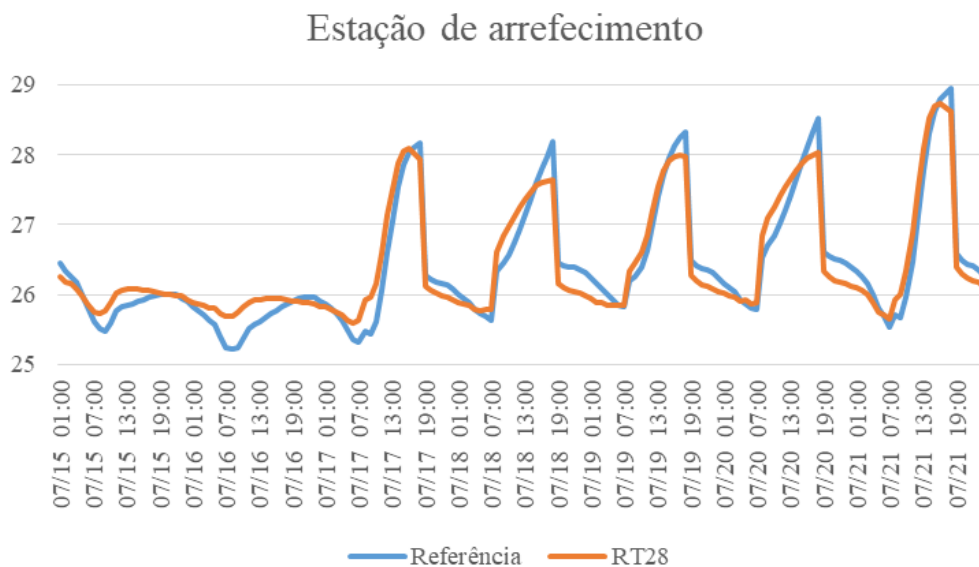


Figura 5. Oscilação da temperatura operativa dentro do edifício durante uma semana típica de Verão.

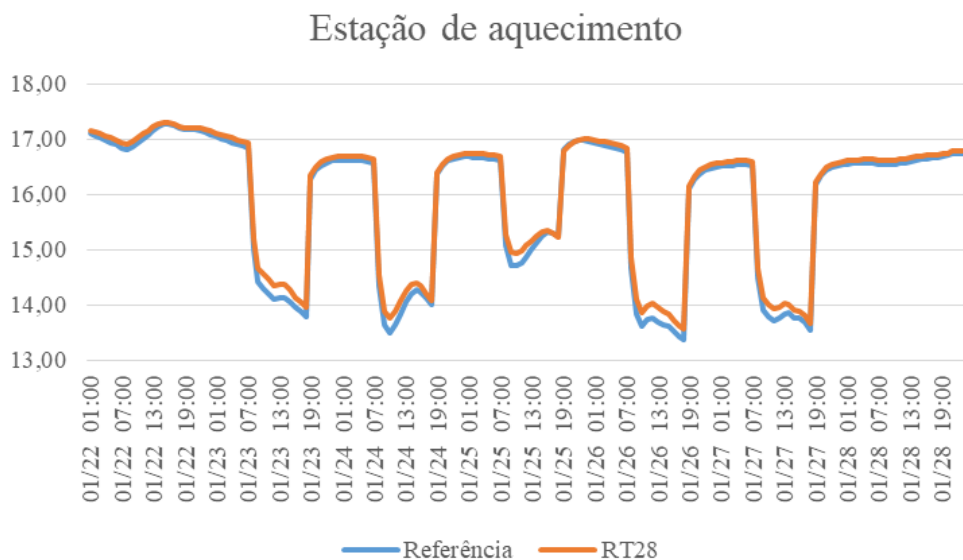


Figura 6. Oscilação da temperatura operativa dentro do edifício durante uma semana típica de Inverno.

No que respeita à estação de aquecimento verifica-se que a implementação de PCMs permitir obter temperaturas mínimas superiores em todos os compartimentos. Contudo a diferença entre a situação com PCMs e a solução de referência é muito pequena. Já no que se refere à estação de arrefecimento verifica-se que em alguns compartimentos a adoção de PCMs permitiu baixar a temperatura operativa aproximadamente em 0,5°C.

Conclusões semelhantes podem ser retiradas da análise das Figuras 5 e 6. Embora se observe que na estação de aquecimento a adoção de PCMs permita baixar os picos inferiores da temperatura, é na estação de arrefecimento onde se verificam maiores vantagens. Nesta estação a implementação de PCMs para além de levar a uma diminuição dos picos de temperatura, permitem ainda diminuir a sua oscilação.

Análise Económica

Na Tabela 3 apresenta-se a análise de viabilidade económica. Nesta análise comparou-se a diferença entre a solução de referência e a solução que inclui aplicação do PCM RT28.

Através destes dados verifica-se que os custos de investimento necessários para implementar esta solução são cerca de duas vezes superiores aos custos da solução de referência. No que respeita aos custos operacionais, num ciclo de vida de 30 anos, a adoção de materiais de mudança de fase, para este caso de estudo, permite obter uma poupança de cerca de 80€ anuais.

Tabela 3. Análise Económica.

	Custos iniciais	Custos Operacionais	Custos de Ciclo de Vida
Referencia	€11 653	€49 837	€61 490
PCM (RT22 + RT28)	€25 847	€47 327	€73 174
Diferença	+ €14 193	- €2 510	+ €11 683

Embora se verifique que tipo de tecnologia apresenta benefícios em termos de consumo energético, a diminuição nos custos operacionais não é suficiente para tornar os custos de investimento atrativos. Contudo, deve ter-se em atenção que os resultados obtidos nesta análise são altamente dependentes das características do edifício, da sua localização e correspondentes condições climáticas, do tipo de material de mudança de fase escolhido e do respetivo custo inicial (Mustaparta et al. 2013).

CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se um estudo focado na análise dos custos e dos benefícios (consumo energético e conforto térmico) da implementação de materiais de mudança de fase na envolvente de um edifício localizado em Vila Real, Norte de Portugal.

Verificou-se que este tipo de materiais permite diminuir o consumo energético dos edifícios. Ao nível da estação de arrefecimento, considerando todos os materiais estudados verificou-se uma diminuição do consumo energético entre 5% a 9%. Já no que respeita às necessidades energéticas para aquecimento e verificou-se uma diminuição entre 3% a 5%. Por fim, verificou-se que a implementação de materiais de mudança de fase no edifício estudado permite reduzir as necessidades energéticas globais do edifício entre 4% a 5% do seu valor inicial.

A análise ao conforto térmico demonstrou que a adoção de materiais de mudança de fase pode contribuir para diminuir as oscilações de temperatura no interior dos espaços. No caso do edifício e localização geográfica analisados verificou-se que as vantagens desta solução são verificadas sobretudo na estação de arrefecimento.

Por fim, a análise de viabilidade económica demonstrou que estes materiais possuem ainda um investimento inicial bastante elevado o que pode condicionar a sua aplicabilidade em contexto real.

REFERÊNCIAS

- Alkan, C. et al., 2009. Preparation, characterization, and thermal properties of microencapsulated phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(1), pp.143–147. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024808002869> [Accessed September 21, 2017].
- Álvarez, S. et al., 2013. Building integration of PCM for natural cooling of buildings. *Applied Energy*, 109, pp.514–522. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913000998> [Accessed September 21, 2017].
- ASHRAE, 2004. *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*, Atlanta, GA.
- Cabeza, L.F., 2014. *Advances in Thermal Energy Storage Systems : Methods and Applications* Luisa Cabeza., Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781782420880> [Accessed September 21, 2017].
- DGEG, 2016. *Balanço Energético - Sintético 2016*, Available at: <http://www.dgeg.pt/wwwbase/wwwinclude/ficheiro.aspx?access=1&id=15901>.
- EC, 2011. Communication from the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee of the Regions - Roadmap to a Resource Efficient Europe , COM(2011) 571 Final.
- EC, 2009. *EU Energy Trends to 2030 – Update 2009*, European Commission, Directorate-General for Energy.
- EU, 2012. Commission Delegated Regulation (EU) n° 244/2012 of 16 January 2012.
- EU, 2010. *Directive 31/2010/EU of 19 May 2010 on the energy performance of buildings* E. Parliament, ed.,

- EU, 2017. European Union - Climate Action - 2020 climate & energy package. Available at: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en [Accessed September 21, 2017].
- Evola, G., Marletta, L. & Sicurella, F., 2014. Simulation of a ventilated cavity to enhance the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings. *Energy and Buildings*, 70, pp.480–489.
- Fowler, T. et al., 2015. Excess winter deaths in Europe: A multi-country descriptive analysis. *European Journal of Public Health*, 25(2), pp.339–345.
- Giro-Paloma, J. et al., 2016. Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, pp.1059–1075. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115010102> [Accessed September 21, 2017].
- Goia, F., Perino, M. & Serra, V., 2014. Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype. *Solar Energy*, 100, pp.217–233. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13005197> [Accessed September 21, 2017].
- Hed, G. & Bellander, R., 2006. Mathematical modelling of PCM air heat exchanger. *Energy & Buildings*, 38, pp.82–89.
- Hunger, M. et al., 2009. The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), pp.731–743. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946509001267> [Accessed September 21, 2017].
- IEA, 2017. *WORLD ENERGY BALANCES: AN OVERVIEW Global trends*, Available at: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyBalances2017Overview.pdf>.
- ISO, 2005. ISO 7730 - Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- Iten, M., Liu, S. & Shukla, A., 2016. A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, pp.175–186.
- Kalnæs, S.E. & Jelle, B.P., 2015. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, 94(7491), pp.150–176.
- Karim, L. et al., 2014. New phase-change material components for thermal management of the light weight envelope of buildings. *Energy and Buildings*, 68(PART B), pp.703–706. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813005537> [Accessed September 21, 2017].
- Medved, S. & Arkar, C., 2008. Correlation between the local climate and the free-cooling potential of latent heat storage. *Energy and Buildings*, 40(4), pp.429–437.
- Mustaparta, O., Silva, S. & Leitão, D., 2013. Potentialities of using PCM in residential buildings in Portugal. *Book of Proceedings - PORTUGAL SB13, CONTRIBUTION OF SUSTAINABLE*, pp.229–236.
- Navarro, L. et al., 2016. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 2. Integration as passive system. *Renewable Energy*. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115300860>.
- P C Tabares-Velasco, C.C.M.B. and C.B.N., 2012. Verification and Validation of EnergyPlus Conduction Finite Difference and Phase Change Material Models for Opaque Wall Assemblies. *Building and Environment*, (July), pp.1–55.
- Pasupathy, A., Velraj, R. & Seeniraj, R. V., 2008. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), pp.39–64. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032106000724> [Accessed September 21, 2017].
- Portugal, 2013. Decreto-Lei nº118/2013 de 20 de Agosto. *Diário da República*, 1.^a série — N.º 159 — 20 de agosto de 2013.
- Rubitherm, 2017. Rubitherm - Phase Change Materials. Available at: <https://www.rubitherm.eu/en/> [Accessed January 20, 2017].
- Simoes, S.G., Gregório, V. & Seixas, J., 2016. Mapping Fuel Poverty in Portugal. In *Energy Procedia*. pp. 155–165. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610216316708> [Accessed March 14, 2017].
- Tabares-Velasco, P.C., Christensen, C. & Bianchi, M., 2012. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. *Building and Environment*, 54, pp.186–

196. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132312000583> [Accessed May 29, 2017].

Thomson, H. & Snell, C., 2013. Quantifying the prevalence of fuel poverty across the European Union. *Energy Policy*, 52, pp.563–572.

Waqas, A. & Kumar, S., 2011. Utilization of latent heat storage unit for comfort ventilation of buildings in hot and dry climates. *International Journal of Green Energy*, 8(1), pp.1–24.