

## POTENCIAL SOLAR NAS CIDADES

**Sara Freitas** – srefreitas@fc.ul.pt

**Paula Redweik** – pmredweik@fc.ul.pt

**Cristina Catita** – cmcatita@fc.ul.pt

**Miguel Centeno Brito** – mcbrito@fc.ul.pt

Instituto Dom Luiz – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

**Resumo.** *O recurso solar é indiscutivelmente uma fonte de energia a considerar quando se pensa na produção de energia no futuro. Principalmente quando está em causa o fornecimento de energia às grandes cidades, onde se verifica uma grande parte do consumo. Devido às características topográficas e morfológicas do ambiente urbano, os edifícios estão sujeitos a fenómenos dinâmicos de sombreamento, pelo que é essencial perceber como varia a radiação solar incidente e em que zonas de uma cidade haverá maior potencial solar. Neste estudo recorreu-se ao modelo de potencial solar SOL para estimar o potencial fotovoltaico em 3 áreas distintas localizadas em Lisboa, Portugal, e outra em Genebra, Suíça. Em duas das áreas verifica-se que o potencial total nas fachadas excede os 50% do potencial, sendo que nas outras áreas, apesar de o potencial nos telhados ser superior, a contribuição total através das fachadas seria suficiente quase para duplicar o potencial solar total. Considerando apenas pontos onde a irradiação excede os 900 kWh/m<sup>2</sup>/ano, é em Lisboa que as fachadas desempenham um papel mais importante, chegando a estimar-se um potencial superior a 150 kWh/ano por unidade de área construída.*

**Palavras-chave:** Energia solar fotovoltaica, meio urbano, fachadas

### 1. INTRODUÇÃO

Numa época de grande procura energética caracterizada por um aumento contínuo da população mundial, o aproveitamento de recursos energéticos, tais como o petróleo, tem exercido múltiplos impactos a nível político-económico e ambiental, cada vez mais presentes e evidentes na sociedade em geral. Neste contexto, a energia solar surge não só como uma alternativa renovável e livre de emissões, mas também como uma solução capaz de desempenhar um papel relevante no futuro da cadeia de abastecimento energético.

Devido à tendência de migração de grande parte da população das zonas rurais para os centros urbanos, o consumo energético tem aumentado significativamente nestas regiões. Consequentemente, também o interesse no conhecimento do potencial solar a nível do ambiente urbano e a procura por aplicações de energia solar que o aproveitem tem crescido, fazendo com que cada vez mais edifícios se tenham vindo a tornar pontos de produção de energia, conduzindo gradualmente a uma descentralização da produção e a uma maior autonomia dos edifícios face à rede de abastecimento. No entanto, a integração de sistemas solares em meio urbano nem sempre está livre de obstáculos ao usufruto de todo o seu potencial, principalmente porque ao longo do dia e do ano a posição do sol muda. Por norma, a instalação de um sistema solar num edifício é feita preferencialmente nos telhados, pois representam zonas com maior exposição solar, além de serem, à partida, as zonas menos ocupadas do envelope edificado e que permitem, assim, uma maior liberdade de inclinações e orientações dos módulos fotovoltaicos ou dos coletores térmicos. Já as fachadas dos edifícios, tipicamente verticais, à primeira vista não parecem bons locais, uma vez que, estando o sol grande parte do tempo acima do plano do horizonte, é esperado que um painel solar instalado numa fachada produza menos por unidade de área do que se estiver numa inclinação mais favorável. Porém, dado que nos aglomerados urbanos modernos a área das fachadas é muito superior à de telhados, estas acabam por representar uma fração relevante do potencial solar numa cidade através da junção de todas as suas pequenas contribuições.

A avaliação do potencial solar nas fachadas tem um grande interesse na vertente da energia fotovoltaica, primeiramente devido ao fator de custo dos próprios módulos. Inicialmente os módulos fotovoltaicos eram muito caros, inviabilizando a sua colocação num edifício numa situação que não a ótima. Isto é, na existência de poucos recursos para investimento, quaisquer painéis serão colocados preferencialmente nos telhados. Contudo, na última década, os preços caíram para cima de 10 vezes face ao preço inicial (NREL, 2010), tornando-se cada vez mais acessível instalar painéis, não só nos melhores sítios do edifício mas também no resto da área disponível, e portanto, nas fachadas. Por outro lado, as fachadas representam o grosso da área de um edifício e adquirem importância à medida que se começa a integrar muita energia solar na rede elétrica, pelo que outra das vantagens de aproveitar o potencial das fachadas reside no facto de as diferentes orientações das fachadas numa cidade permitirem a produção em diferentes horas do dia (i.e. uma fachada a Sul, no hemisfério norte, ou a Norte, no hemisfério sul, produz mais ao meio dia, outra virada a Este produz mais de manhã e a que está a Oeste produz ao fim da tarde), contribuindo para tornar o diagrama de produção mais abrangente ao longo do dia, pois cada fachada irá produzir melhor a determinada hora do dia (Brito et al., 2013). Além disso, também a acumulação de poeiras e outros detritos é minimizada estando os painéis instalados na vertical, evitando deste modo perdas de eficiência devidas a uma captação deficitária da radiação incidente.

Os edifícios em ambiente urbano, porém, estão sujeitos ao sombreamento devido a obstruções no meio ambiente, tais como edifícios adjacentes, árvores ou outras estruturas urbanas. Devido ao movimento aparente do sol ao longo do dia, também a projeção das sombras se altera, podendo inviabilizar de todo o aproveitamento da energia solar num dado local. Deste modo, é de extrema relevância conhecer não só o potencial solar numa dada área como interpretá-lo sob a perspectiva de uma tecnologia em particular, neste caso a fotovoltaica (Jardim et al., 2008). Para tal, atualmente existem modelos numéricos computacionais capazes de caracterizar fisicamente as superfícies em questão e determinar a intensidade da irradiação solar por elas recebida, de acordo com o grau de detalhe pretendido. Este conhecimento adquire uma importância ainda maior quando aplicado à escala das grandes cidades com vista à tomada de decisões (Freitas, 2015).

## 2. METODOLOGIA

O método utilizado para determinar a radiação solar incidente, desenvolvido na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e apelidado de Solar Out of Lidar (SOL), foi concebido através do *software* de cálculo numérico MatLab®, recorrendo a séries meteorológicas de referência (SolTerm para Lisboa e MeteoNorm para Genebra) e a uma formulação semi-anisotrópica da radiação difusa. Esta última é determinada pela multiplicação da radiação difusa recebida numa superfície horizontal pela razão entre o número de fontes de luz que iluminam um determinado ponto e o número total de fontes de luz. O conjunto de fontes de luz encontra-se distribuído equiangularmente pelo hemisfério celeste.. Dado que o MDS é obtido a partir de dados LiDAR re-amostrados a 1 ponto/m<sup>2</sup>, o cálculo da radiação nos telhados e chão é relativamente simples. Já o cálculo da radiação nas fachadas é realizado com base num algoritmo especial que constroi automaticamente pontos nas fachadas sabendo o valor da elevação no solo e no topo de edifício. Cria-se assim uma fileira vertical de pontos numa fachada que se designa por hiperponto, pelo que o algoritmo de sombreamento considera um *pixel* no MDS, complementado com os hiperpontos, como estando à sombra (recebendo somente radiação difusa) sempre que houver no perfil em análise, um outro pixel do MDS a “cortar” uma reta imaginária entre a posição do sol e o pixel em questão (a materialização matemática de um raio solar à hora da análise). Resumidamente, através desta metodologia, descrita em detalhe em (Redweik et al., 2013 e Catita et al, 2014), é possível calcular o potencial solar horário anual em qualquer orientação e inclinação, quer seja em telhados ou fachadas numa determinada área de estudo.

Neste estudo, pretendeu-se determinar o potencial solar fotovoltaico em 4 zonas urbanas distintas (Fig. 1) recorrendo ao modelo SOL. A zona A situa-se no centro de Lisboa, Portugal, e foi construída por volta de 1950-60, incluindo tanto edifícios baixos e irregulares como blocos residenciais com cerca de 10 andares. A zona B, também em Lisboa, corresponde a um bairro desenvolvido no início do séc. XXI que contém ruas estreitas em parte preenchidas por árvores de grande porte, edifícios com cerca de 5 andares e pátios interiores. Por outro lado, a zona C, corresponde ao campus da Faculdade de Ciências em Lisboa, não representa um típico arnajo urbano, uma vez que inclui edifícios totalmente distintos entre si e relativamente espaçados. Finalmente, a zona D, situada em Genebra, Suíça, representa em grande parte edifícios residenciais com cerca de 6 andares com uma distribuição homogénea.

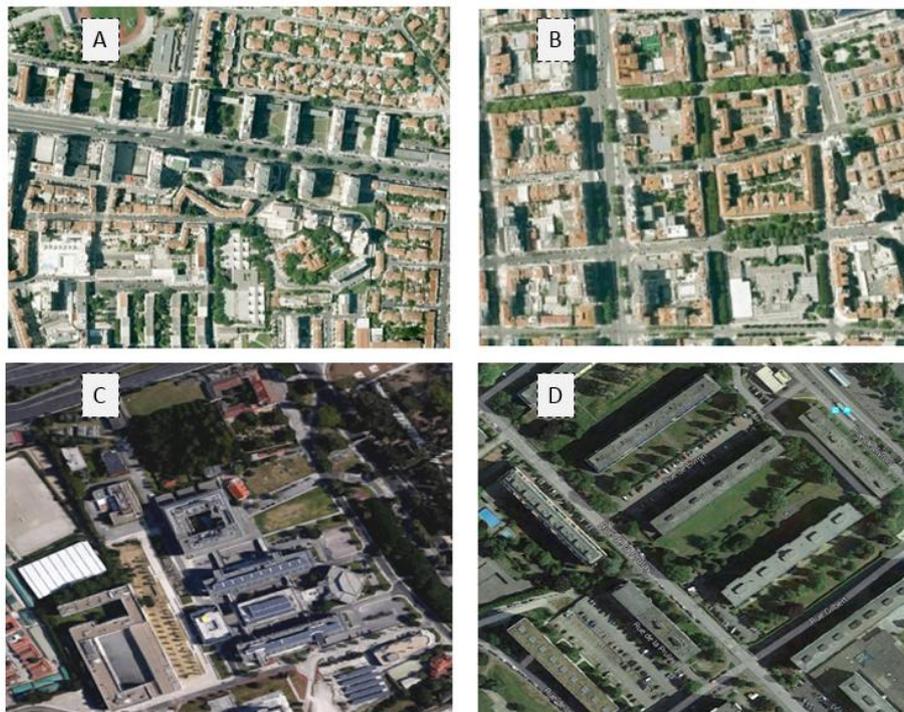


Figura 1- Vista aérea das 4 áreas em estudo: A (38.748N, 9.136W), B (38.739N, 9.145W) e C (38.757N, 9.158W) em Lisboa, Portugal, e D (46.232N, 6.044E) em Genebra, Suíça.

Os MDS utilizados em cada caso correspondem a uma área de aproximadamente 500x500 m<sup>2</sup> nos casos A e B, 400x380 m<sup>2</sup> para a área C e 300x300 m<sup>2</sup> na área D. Todos os MDS têm uma resolução espacial de 1 m<sup>2</sup>. Este aspecto é importante para a estimativa da electricidade produzida por módulos fotovoltaicos a partir do potencial solar calculado. Considerou-se uma eficiência de 15% típica de módulos de 1 m<sup>2</sup> e um factor de desempenho de 80%, assim como efeitos da temperatura na eficiência dos painéis (Marion et al. 2002):

$$PV = G \times 0.15 \times \left[ 1 - \Delta\eta \left( T_{amb} + \frac{T_{NOCT} - 20}{800} G - 25 \right) \right] \times 0.80 \quad (1)$$

onde  $PV$  é a electricidade estimada (Wh/m<sup>2</sup>),  $G$  é a irradiação global estimada (Wh/m<sup>2</sup>),  $\Delta\eta$  é o coeficiente de temperatura para a eficiência (-0,45 %/°C),  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente (°C),  $T_{NOCT}$  - Nominal Operating Cell Temperature – é a temperatura nominal dos sistemas em funcionamento (47° C). Por simplicidade, não se consideraram efeitos do sombreamento parcial nos módulos, uma vez que a resolução espacial (1 ponto por metro quadrado) é da ordem de magnitude da área do painel considerada.

### 3. RESULTADOS

Na Fig. 2 encontram-se os mapas da irradiação solar acumulada no periodo de um ano nas 4 áreas em estudo. É de salientar o potencial mais elevado nos telhados e chão do que nas superfícies verticais, tanto nas áreas situadas em Lisboa (A, B e C) como na área em Genebra (D).

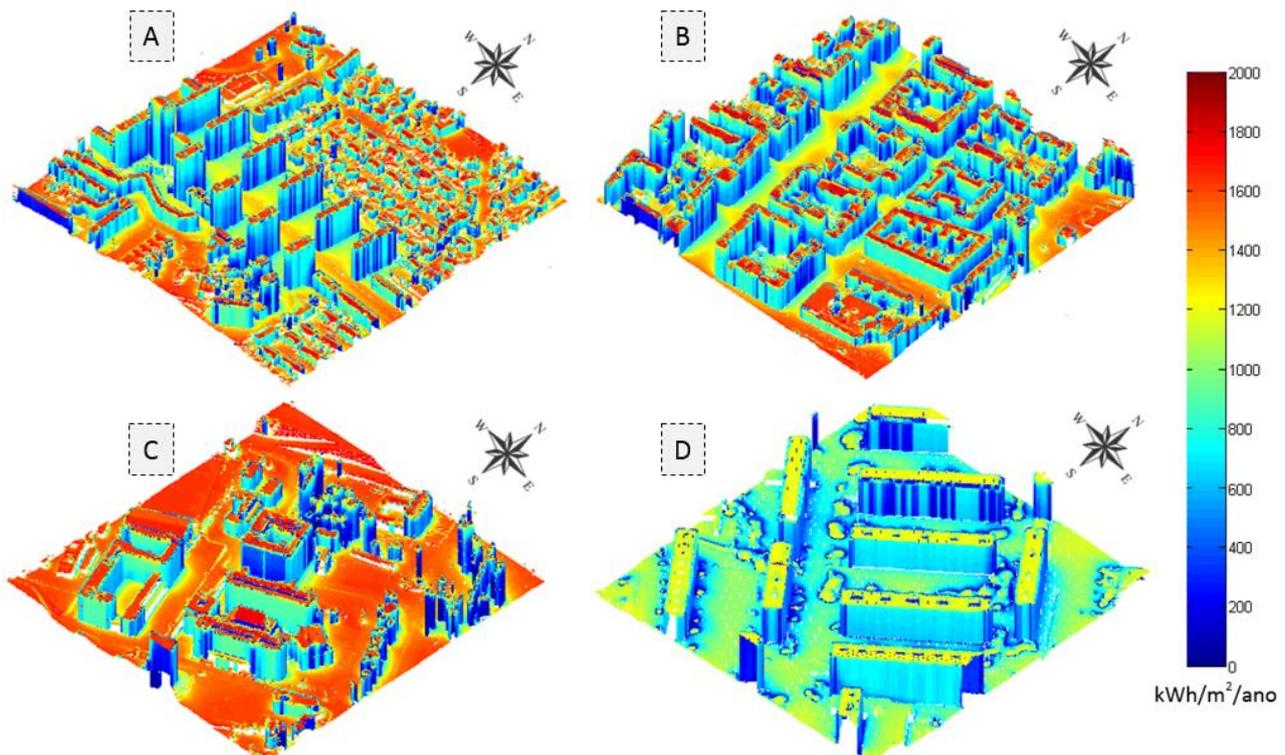


Figura 2- Irradiação solar anual calculada para as 4 áreas: A, B e C em Lisboa, Portugal, e D em Genebra, Suíça. A escala de cores evidencia as zonas onde o potencial é maior (vermelho) e menor (azul). A escala vertical difere nos 4 mapas, sendo que em A os edifícios mais altos rondam os 60 m, em B 50 m, em C 40 m e em D 30 m.

Na área D, o valor médio da irradiação solar nas fachadas é aproximadamente 60% do valor nos telhados, enquanto que nas restantes áreas as fachadas recebem cerca de 50% do valor de radiação recebida nos telhados, o que evidencia o aumento da contribuição do potencial das fachadas em comparação com o dos telhados com o aumento da latitude. Por outro lado, se ao potencial dos telhados for adicionado o potencial das fachadas, dado que estas têm muito mais área disponível, o potencial total de uma dada área urbana poderá duplicar ou mesmo triplicar.

De maneira a perceber-se melhor como está distribuído o potencial solar nos pontos de interesse (telhados e fachadas dos edifícios), elaboraram-se os histogramas da Fig. 3 através da selecção dos pontos pertencentes apenas aos edifícios. Para tal, recorreu-se ao *software* ArcGIS (ESRI®) para seleccionar, na base de dados geográficas, apenas os

pontos pretendidos de acordo com a relação espacial entre a localização destes pontos no MDS e uma camada vetorial das linhas que delimitam a “pegada” dos edifícios (ou seja, o “*footprint*”). É importante mencionar que, a partir daqui, nas áreas A e B apenas se consideram os edifícios residenciais, uma vez que não se possuía informação relativamente ao *footprint* da totalidade dos edifícios.

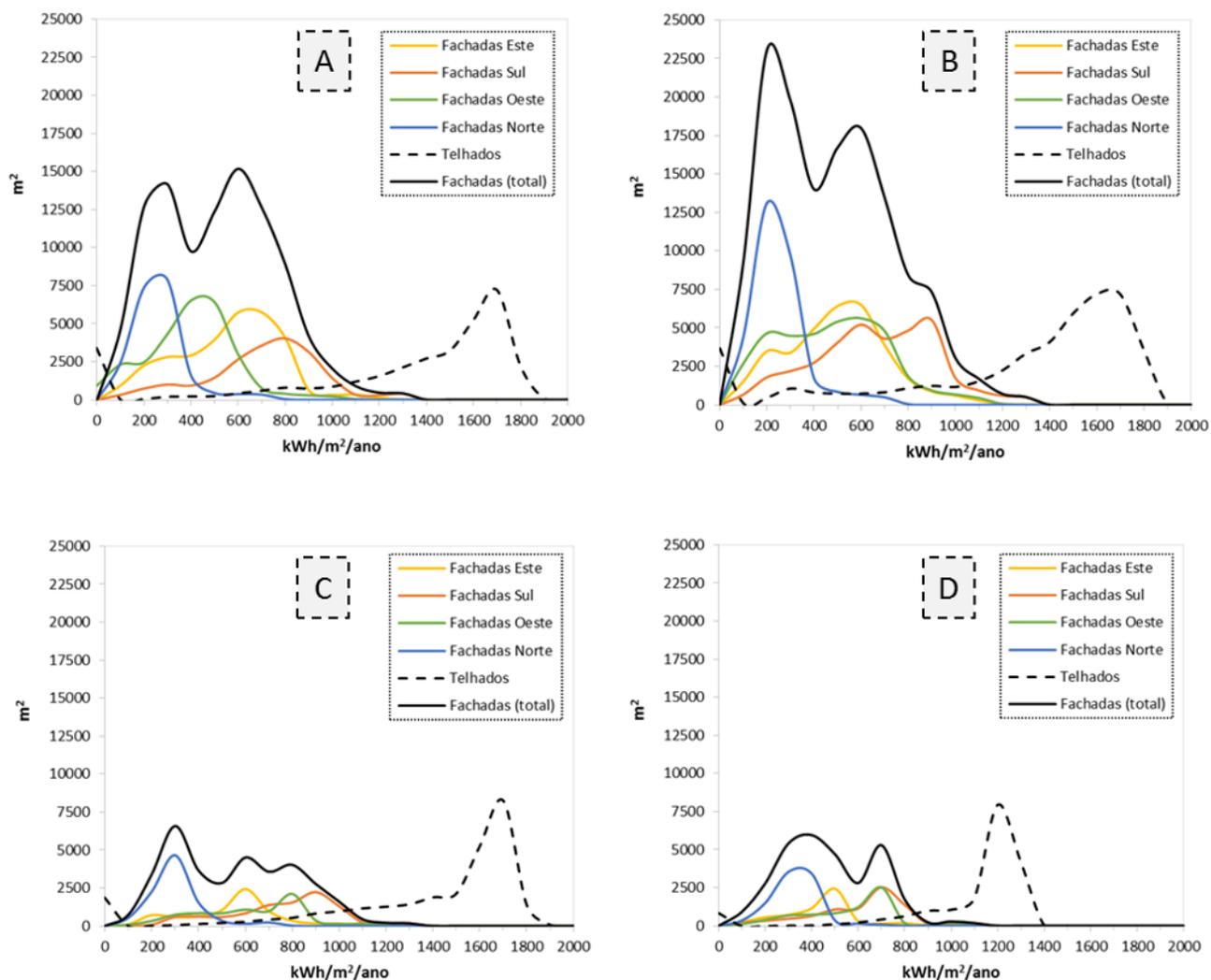


Figura 3- Histogramas da irradiação anual por metro quadrado nos telhados e nas fachadas nas 4 áreas em estudo: A, B e C em Lisboa, Portugal, e D em Genebra, Suíça. As linhas a tracejado indicam o potencial nos telhados, as linhas coloridas representam o potencial nas fachadas de acordo com as orientações Este, Sul, Oeste e Norte, isto é, pontos com orientação dentro dos intervalos  $[45^\circ, 135^\circ]$ ,  $[135^\circ, 225^\circ]$ ,  $[225^\circ, 315^\circ]$  e  $[315^\circ, 45^\circ]$  respectivamente relativamente ao Norte.

É notório que os níveis mais comuns de irradiação solar nos telhados em Lisboa são significativamente mais altos do que em Genebra ( $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$  versus  $1200 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$ ), como seria esperado tendo em conta a menor latitude em Lisboa e nebulosidade menos frequente. Quanto às fachadas, é curioso que em Lisboa se verifica uma predominância nos 300 e nos 650  $\text{kWh/m}^2/\text{ano}$  nas 3 áreas, sendo que em C há ainda a notar a zona dos 800  $\text{kWh/m}^2/\text{ano}$ , devida ao maior espaçamento entre edifícios, que leva a menor sombreamento das fachadas.

Nas 4 áreas registam-se potenciais muito baixos para os pontos nas fachadas Norte, sendo os 300  $\text{kWh/m}^2/\text{ano}$  o mais comum, o que parece indicar que a radiação difusa não terá níveis muito distintos entre Lisboa e Genebra. No entanto, nas áreas A, B e C verifica-se que alguns pontos nas fachadas Norte chegam a receber perto de 650  $\text{kWh/m}^2/\text{ano}$ . Isto deve-se ao facto de que em Lisboa o nascimento e o ocaso do Sol se dão em azimutes mais próximos do NE e do NW respetivamente (hemisfério norte) do que em Genebra.

O arranjo espacial dos edifícios está também relacionado com o potencial das suas fachadas (Martins et al., 2014). Na área A existem edifícios muito altos que no entanto têm a maior área de fachada nas direcções Este e Oeste, ao contrário dos edifícios mais pequenos à sua volta que têm maioritariamente uma fachada a Sul e que, como são em maior quantidade face aos edifícios altos, acabam por ter uma contribuição equiparável (Fig.3, A - linha laranja versus linhas amarela e verde). O mesmo tipo de conclusão pode ser retirado quanto à área D, mas neste caso são os pontos em fachadas a Sudeste e Noroeste que predominam. Por outro lado, na área B regista-se uma certa homogeneidade no

potencial das fachadas, dado que os edifícios estão espaçados e arrançados de forma homogênea, apesar destes terem formatos irregulares. Aqui, os altos níveis de sombreamento de fachadas a Sul são evidentes.

Através da Eq. (1), determinou-se o potencial fotovoltaico anual nos telhados e fachadas dos edifícios a partir dos valores de irradiação global estimados pelo modelo SOL. Uma vez que os MDS das 4 zonas têm áreas diferentes e representam edifícios diferentes, expressa-se o potencial dos telhados e das fachadas em separado na Tab. 1.

Tabela 1 – Contribuição dos telhados e das fachadas para o potencial total nas 4 áreas estudadas. Os valores sombreados correspondem ao caso em que se consideram apenas os pontos com irradiação > 900 kWh/m<sup>2</sup>/ano.

	Área MDS [m <sup>2</sup> ]	Área edifícios [%]	Altura média edifícios [m]	Altura máxima edifícios [m]	Total PV [%]		Total PV [kWh/ano/m <sup>2</sup> building footprint]	
					Telhados	Fachadas	Telhados	Fachadas
Área A (Lisboa)	500x500	13	18	67	47	53	149	166
					91	9	141	14
Área B (Lisboa)	500x500	19	20	51	49	51	145	150
					90	10	135	16
Área C (Lisboa)	400x380	18	14	44	68	32	157	75
					94	6	150	10
Área D (Genebra)	300x300	20	18	34	60	40	125	84
					97	3	113	3

Apesar das diferentes áreas dos MDS utilizados (1ª coluna), a percentagem de área que alberga edifícios é semelhante nas 4 zonas (2ª coluna), sendo que se consideram apenas os edifícios residenciais nas áreas A e B. De entre destas 4 áreas, aquela que em média possui edifícios mais baixos é a C. Contudo, é na área D que se verifica uma maior homogeneidade de alturas, visto que a altura média se aproxima mais da altura máxima registada. Neste aspecto, a área A apresenta-se mais diversa como foi notado anteriormente.

No conjunto do potencial de telhados e fachadas nas áreas A e B atinge-se um equilíbrio, onde pouco mais de 50% é devido às fachadas (5ª coluna). Quando se analisa tendo em conta apenas a área ocupada por edifícios (6ª coluna), é notório que apesar dos níveis mais baixos de irradiação na vertical a área disponível é largamente superior, o que mais uma vez contrabalança, ou até excede, o que pode ser produzido nos telhados.

Estas observações, porém, não se mantêm quando se observam os resultados para as áreas C e D, em grande parte pelo que já foi mencionado sobre a orientação das fachadas dos edifícios e o seu espaçamento. Além disto, a percentagem de área construída nestas 2 áreas é significativamente menor que em A e B (note-se que os 13% e 19% correspondem apenas aos edifícios residenciais nestas áreas, pelo que a área construída total será superior).

Se se considerar que uma instalação fotovoltaica será rentável se os níveis de radiação forem superiores a 900 kWh/m<sup>2</sup>/ano (linhas sombreadas nas Tab. 1), então a percentagem de contribuição de telhados em comparação com fachadas passa a ser muito semelhante nas 4 áreas, favorecendo os telhados dado que apenas entre 3 a 10% da produção por metro quadrado de área construída se daria nas fachadas.

#### 4. CONCLUSÕES

Recorrendo a uma metodologia para calcular o potencial solar fotovoltaico em áreas urbanas a partir de dados LiDAR, estudaram-se 4 áreas distintas, localizando-se 3 delas em Lisboa, Portugal, e outra em Genebra, Suíça. Os formatos dos edifícios e o arranjo urbano é diferente em cada uma delas, pelo que se estimaram potenciais solares muito atrativos a nível das fachadas dos edifícios, para além dos habituais telhados. Tanto na área A como na B, observou-se que o potencial total nas fachadas excede um pouco o total dos telhados, mesmo tendo na primeira uma grande diversidade de edificado e na segunda uma maior homogeneidade. Já nas áreas C e D, apesar de o potencial nos telhados ser claramente superior, a contribuição total através das fachadas seria suficiente quase para duplicar o potencial solar nessas áreas. Por outro lado, dado que em Lisboa o nível de irradiação é superior ao de Genebra, tanto em telhados como em fachadas, quando se consideram apenas pontos onde a irradiação é superior a 900 kWh/m<sup>2</sup>/ano, isto é, locais onde o investimento seria viável, é em Lisboa que as fachadas desempenham um papel mais importante. Posto isto, o tipo de arranjo urbano é de extrema relevância para o potencial solar, visto que os edifícios devem ser otimizados quanto ao seu espaçamento e as fachadas com maior área devem também estar orientadas de forma a aumentar a exposição solar.

## Agradecimentos

Parte deste trabalho foi financiada pelo Programa do MIT Portugal “Sustainable Energy Systems” e bolsa da Fundação para a Ciência e Tecnologia SFRH/BD/52363/2013, pelos Projectos ED2050-M-05-USS (Urban Sun Skin), MITP-TB/CS/0026/2013 (SUSCITY), PTDC/EMS-ENE/4525/2014 (PVCITY) e UID/GEO/50019/2013 - Instituto Dom Luiz, e pelo Prémio de Estímulo à Investigação 2014 da Fundação Calouste Gulbenkian.

## REFERÊNCIAS

- NREL, Solar Technologies Market Report, 2010
- Brito, M.C., Catita, C., Redweik, P., 2013. Photovoltaics and Zero Energy Buildings: the Role of Building Facades, Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris.
- Jardim, C.S., Rütther, R., Salamoni, I.T., Viana, T.S., Rebecchi, S.H., Knob, P.J., 2008. The strategic siting and the roofing area requirements of building-integrated photovoltaic solar energy generators in urban areas in Brazil, Energy and Buildings, vol 40, issue 3, 2008, pp. 365-370.
- Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., Brito, M.C., 2015. Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 41, January 2015, pp. 915-931.
- Redweik, P., Catita, C., Brito, M.C., 2013. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape, Solar Energy, vol 97, November 2013, pp. 332-341.
- Catita, C., Redweik, P., Pereira, J., Brito, M.C., 2014. Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades, Computers & Geosciences, vol 66, May 2014, pp. 1–12.
- Marion, B., 2002. A method for modeling the current–voltage curve of a PV module for outdoor conditions, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol 10, issue 3, pp. 205–214.
- Martins, T.A.L., Adolphe, L., Bastos, L.E.G., 2014. From solar constraints to urban design opportunities: Optimization of built form typologies in a Brazilian tropical city, Energy and Buildings, vol 76, June 2014, pp. 43-56.

## SOLAR POTENTIAL IN CITYSCAPES

**Abstract.** *The solar resource is indubitably an energy source to consider when thinking about electricity production in the future. Especially when it concerns the power supply to large cities, where the largest amount of energy is consumed. Due to the topographical and morphological characteristics of urban environments, buildings are subject to dynamic shading phenomena, thus it is essential to understand how the incident solar radiation varies and in where the higher solar potential spots will be located in a city. In this study we employed the solar potential model SOL to estimate the photovoltaic potential in three distinct areas located in Lisbon, Portugal, and fourth one in Geneva, Switzerland. In two of the addressed areas it turns out that the total potential in facades exceeds 50% of the total potential, while in the other two areas the total contribution via the façades would be sufficient to almost double the total solar potential. Considering only the points where the radiation exceeds 900 kWh/m<sup>2</sup>/year, it is in Lisbon that facades play an important role, featuring a potential that overcomes 150 kWh/year per unit of built area.*

**Key words:** *Solar photovoltaic energy, urban environment, building facades*