



## SOL: Um Modelo Urbano de Radiação Solar e suas Aplicações

Paula REDWEIK <sup>1</sup>, Cristina CATITA <sup>1</sup>, Miguel BRITO <sup>1</sup>, M. Beatriz CARMO <sup>2</sup>, A. Paula CLÁUDIO <sup>2</sup>, A. Paula AFONSO <sup>3</sup> e António FERREIRA <sup>3</sup>

<sup>1</sup> IDL, Dep. Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

<sup>2</sup> BioISI, Dep. Informática, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

<sup>3</sup> LaSIGE, Dep. Informática, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa  
(pmredweik; cmcatita; mcbrito; apclaudio; mbcarmo; apafonso; amferreira) @fc.ul.pt

**Palavras-chave:** potencial fotovoltaico, radiação solar, realidade aumentada

### Resumo:

Os ambientes urbanos, nos quais se localiza uma fração significativa da procura de energia, caracterizam-se geometricamente por grandes variações e gradientes de cota causados pela existência de edifícios de diversas alturas, limitados por paredes verticais e separados por ruas de largura variável. Para efeitos de estudos do potencial da energia solar em meio urbano, os elementos urbanos poderão ser classificados numa das três classes: terreno, edificado ou árvores. Para o estudo do potencial energético solar, todas essas classes são simultaneamente recetoras de irradiação solar e produtoras de sombra sobre objetos vizinhos influenciando o respetivo potencial energético. As três classes de objetos são relativamente bem descritas em dados de LiDAR (Light Detection and Ranging) aéreo, o que torna esta fonte de dados como a mais viável para estudos deste teor à escala de um bairro ou de uma cidade.

Apresenta-se neste trabalho o modelo de radiação solar SOL desenvolvido para meio urbano, o qual calcula para cada hora de cada dia do ano a radiação solar global incidente num ponto, incluindo a radiação direta e a difusa, independentemente da localização do ponto ser no solo, na fachada ou no telhado de um edifício numa área urbana, a partir de dados de ALS (Airborne Laser Scanning). Os resultados apresentam uma resolução espacial média de 1 ponto por metro quadrado e uma resolução temporal à escolha, desde uma hora a um ano, sendo possíveis, para determinados estudos, intervalos temporais menores que uma hora. Serão apresentadas ainda algumas aplicações desse algoritmo, nomeadamente no estudo do potencial solar de áreas urbanas e numa aplicação móvel de realidade aumentada para apoio a técnicos de instalações fotovoltaicas.



## 1. Introdução

O êxito da implantação de sistemas fotovoltaicos (PV - Photovoltaic) em ambientes urbanos, onde uma fração significativa da procura de energia está localizada, requer a avaliação do potencial PV local, o qual depende diretamente da exposição local à luz solar, que varia drasticamente na paisagem urbana. A irradiação solar num determinado ponto ao longo de um período de tempo varia de acordo com fatores locais e globais de características espaciais e temporais, como a posição absoluta do ponto e a sua posição relativamente à vizinhança, a posição momentânea do sol e ao longo do período de tempo em questão, e ainda os fatores meteorológicos de difícil modelação. Um modelo de potencial de energia solar ideal, vulgarmente denominado de modelo de radiação solar, deverá levar todos esses fatores em consideração.

A utilização de informação 2.5D georreferenciada para estudos do potencial solar a escalas menores tem sido comum nos últimos anos, em que soluções proprietárias ou em open-source surgiram associadas a plataformas SIG, como por exemplo o Solar Analyst (Fu e Rich, 1999) do software ArcGIS (ESRI) e o r.sun (Hofierka e Sári, 2002) do software aberto GRASS. Estes modelos funcionam sobre uma camada de informação geográfica em formato *raster*, permitindo a consideração de atributos espaciais variáveis no modelo de radiação, tal como a inclinação, a orientação local da superfície do terreno e a latitude no caso de regiões mais vastas. Associando-lhes ferramentas de determinação de sombras, a aplicação destes modelos a zonas urbanas é viável, onde a sombra que os edifícios produzem sobre o solo e sobre edifícios vizinhos, é deveras relevante.

Para determinar o potencial solar de telhados de edifícios, o processamento pouco se diferencia do que é realizado para o terreno, podendo os edifícios ser grosseiramente tratados como montanhas de paredes íngremes das quais apenas nos interessam os topos e as sombras que cada uma provoca nos topos das montanhas vizinhas. No entanto, o potencial solar de uma cidade não se limita aos telhados. Mesmo não considerando o solo como aproveitável para a produção de energia, há as superfícies das fachadas dos edifícios que podem ser utilizadas para a recolha proveitosa de luz solar. Em cidades modernas, as fachadas apresentam áreas muito superiores às dos telhados, são normalmente desprovidas de elementos de infra-estrutura (chaminés, motores de elevadores, ventiladores) e geralmente apresentam melhores condições de manutenção para painéis fotovoltaicos, pois superfícies verticais não acumulam tanta poeira e raramente são cobertas pela neve no inverno, fator importante em países de maiores latitudes.

A importância das fachadas no potencial fotovoltaico é ainda maior pelo facto de a Diretiva Europeia 2010/31 / UE estabelecer que, a partir de 2020, todos os novos edifícios terão de ser edifícios de energia 'líquida' quase zero (*near net zero energy*) exigindo que a produção local de energia cubra a procura local, o que implicará a necessidade de utilizar áreas para PV muito superiores às disponíveis em telhados normais de blocos de apartamentos urbanos (Scognamiglio e Røstvik, 2012). As soluções mencionadas atrás geralmente não conseguem ter em consideração as fachadas dos edifícios, uma vez que as fachadas correspondem a descontinuidades (verticais) nos modelos digitais de elevação 2.5D em que eles se baseiam. Num DSM (Digital Surface Model - Modelo Digital de Superfície), as fachadas verticais são representadas como superfícies mais ou menos inclinadas ou simplesmente desaparecem não permitindo qualquer cálculo fiável sobre elas.

Reconhecendo este problema, a partir de 2011 começaram a ser desenvolvidas soluções para modelos de radiação solar em ambiente urbano que considerassem as fachadas. Carneiro (2011) e Hofierka e Zlocha (2012) referem soluções que exigem uma modelação 3D prévia da paisagem urbana. O algoritmo SOL (Redweik *et al.* 2013), desenvolvido na FCUL, foi o primeiro modelo de radiação solar para meio urbano que recorre apenas a dados LiDAR (Light Detection and Ranging) dispensando a modelação 3D prévia e que determina a radiação solar incidente num denso conjunto de pontos da paisagem urbana, independentemente de estes se encontrarem no solo, num telhado ou numa fachada.

Na secção 2. serão apresentadas as particularidades do algoritmo SOL enquanto a secção 3. abordará algumas aplicações dos dados por ele gerados.

## 2. O algoritmo SOL

### 2.1 Dados de entrada

Os dados de entrada para o algoritmo são constituídos por três tipos, e referem-se, respetivamente, à localização, à forma do relevo e à radiação solar na área de estudo.

A localização é dada pelas coordenadas geodésicas (latitude e longitude) do ponto médio da área de estudo. Esta é, por razões de economia de recursos computacionais, limitada a uma área de 500m x 500m em cada ciclo completo do algoritmo, pelo que se



assume que a variação da longitude e latitude ao longo da área de estudo não terá influência apreciável nos resultados. O fuso horário da área em relação a Greenwich terá igualmente que ser introduzido no algoritmo.

A forma do relevo é introduzida como uma grelha de células de dimensões 1m x 1m com a mesma cota em toda a célula. A grelha do relevo pode provir de várias fontes, mas para o efeito para o qual o algoritmo foi desenvolvido, ela provirá de dados LiDAR de ALS reamostrados a 1 ponto por m<sup>2</sup>. Desta forma, a grelha representará um DSM de uma área urbana (500m x 500m), que contém o solo, os telhados dos edifícios e as árvores, com uma resolução de 1m x 1m.

Os dados relativos à radiação solar na área de estudo poderão ser calculados a partir da latitude por um modelo genérico de radiação que fornece os valores de radiação solar direta e difusa para determinada hora de determinado dia do ano, como por exemplo o modelo de Kumar et al.(1997), ou entrarem em forma tabelada. SOL foi testado com o modelo genérico de Kumar, com o modelo SOLTERM (Aguiar,1998) aprovado para aplicações fotovoltaicas em Portugal e com o modelo METEONORM (Meteonorm, 2015) usado em todo o mundo. Destes modelos recolheram-se os dados referentes à radiação solar difusa e global incidente num plano horizontal a cada hora de cada dia de um ano para a zona do local em questão. Como os dados destes últimos dois modelos provêm de observações climáticas (de períodos superiores a trinta anos) assume-se que a influência das nuvens sobre a radiação esteja refletida em média nos dados disponibilizados. Tal não acontece se for utilizado um modelo genérico que considera apenas as condições de céu limpo para qualquer lugar do globo sem entrar em linha de conta com particularidades climáticas de cada região.

## 2.2 Processamento

A radiação solar incidente num ponto genérico é constituída por uma parte de radiação direta e outra parte de radiação difusa ou não direta. A soma das duas parcelas constitui a radiação global incidente. Alguns modelos distinguem na radiação difusa uma fração que provem da atmosfera e outra que foi refletida pelo solo ou por objetos vizinhos do ponto em direção a ele. O algoritmo SOL, por se destinar a estudos à escala urbana e não local (p. ex. só um ou dois edifícios), considera, na radiação difusa, apenas a componente proveniente da atmosfera.

Embora sejam importados para o algoritmo, ou calculados neste por modelo genérico, os valores de radiação global para determinada hora legal de determinado dia do ano referem-se à radiação incidente num plano horizontal à latitude do lugar à hora solar correspondente à hora apresentada na tabela de radiação. A longitude e o fuso horário são utilizados para a conversão dos tempos de modo a que os dados de radiação correspondam às coordenadas solares locais calculadas para horas legais e solares correspondentes.

A radiação incidente num ponto que se encontre num plano inclinado ou mesmo vertical (caso das fachadas) terá que ser calculada a partir da que incide na horizontal, entrando em conta não só com a inclinação do plano relativamente à horizontal como também com o azimute da normal ao plano, mais conhecido como 'aspect' (Redweik et al. 2013).

As fachadas verticais, que não existem, de facto, nos dados de ALS, são geradas artificialmente utilizando o conceito de hiperpontos. Após a deteção de fachadas no DSM, a cada pixel pertencente a uma fachada é associado um hiperponto, ou seja, um ponto que agrega outros pontos, os elementos do hiperponto, todos partilhando as mesmas coordenadas X e Y e variando sistematicamente em cota, dispostos espacialmente ao longo de uma coluna vertical. O número de elementos de cada hiperponto depende da altura da fachada naquela posição XY relativamente ao plano horizontal mais próximo, que pode ser o chão, um terraço ou um telhado de um prédio vizinho mais baixo. A resolução em Z dos hiperpontos é igual à resolução dos dados em XY. Assim, um hiperponto numa fachada com 12m de altura relativamente ao solo terá 12 elementos, um por cada metro de altura.

Enquanto o modelo genérico de cálculo de radiação inclui a determinação das coordenadas absolutas e locais do Sol para cada época de modo a calcular a radiação, a utilização de tabelas, apesar de já conterem os valores de radiação, não dispensa o cálculo das coordenadas locais do Sol. O azimute e a altura solares são calculados pelo algoritmo SOL a partir de fórmulas astronómicas simplificadas para cada hora de cada dia a fim de determinar a direção espacial dos raios solares e calcular a sombra que eles produzem quando intercetados por um objeto. SOL utiliza um algoritmo de sombras próprio que vai gerando a sombra ao longo de perfis do DSM e registando a altura da sombra em todas as fachadas total ou parcialmente à sombra.



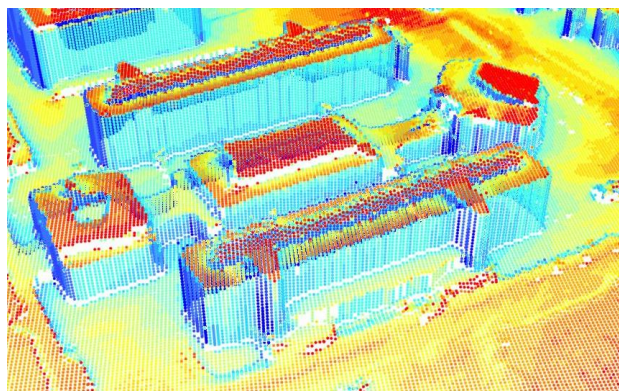


Figura 1 – Fachadas verticais modeladas por hiperpontos

A sombra vai afetar a componente direta da radiação. Um ponto que se encontre à sombra numa determinada hora recebe radiação direta nula. O mesmo não é válido para a parcela da radiação difusa. Esta existe desde o nascer ao pôr-do-sol (mais corretamente desde o início do crepúsculo matinal até ao fim do crepúsculo vespertino), é captada também por pontos que se encontrem à sombra e tem influência no potencial fotovoltaico. No entanto, nem toda a luz difusa que atinge um plano horizontal é captada por qualquer ponto. SOL segue o conceito de que a luz difusa é irradiada de todo o hemisfério celeste e que a luz que é captada por um determinado ponto depende da quantidade de céu visível desse ponto. Esta quantidade, expressa em percentagem do céu total, designa-se por Sky View Factor (SVF) do ponto, e é uma variável que apenas depende da geometria 3D da área e não do tempo ou das coordenadas solares. SOL estima o SVF para o solo, telhados e fachadas, aplicando o algoritmo de sombras a cerca de 1000 fontes luminosas espalhadas sistematicamente no hemisfério e definidas por pares de ângulos de azimute e altura. O SVF é estimado como o quociente entre o número de vezes que cada ponto da área urbana 3D é iluminado e o número total de fontes luminosas. A parcela de luz difusa incidente é calculada pelo produto do SVF pela radiação incidente num plano horizontal à hora e dia pretendidos (valor tabelado ou calculado). Enquanto o cálculo da sombra tem de ser realizado para cada hora de cada dia do ano de modo a obter a radiação direta na área urbana, o SVF para a radiação difusa, embora representando um alto custo computacional, necessita apenas de ser calculado uma vez por área de estudo, visto não depender do tempo solar (Redweik *et al.* 2013). O algoritmo SOL, na sua versão atual, não considera a componente circum-solar da radiação difusa, essa sim, dependente do tempo e das coordenadas solares.

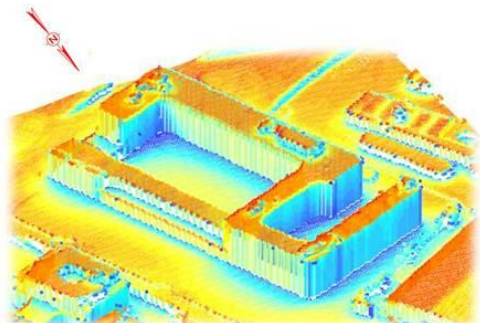
### 2.1 Dados de saída

O *output* do SOL são, para cada área urbana de 500m x 500m, o mapa do SVF no solo e telhados, o mapa de sombras e o mapa de radiação incidente no solo e telhados para cada uma das horas (entre nascer e pôr-do-sol) de cada dia do ano. Os resultados referentes às fachadas são apresentados em tabelas horárias que contêm informação referente às coordenadas 3D de cada elemento de hiperponto, a respetiva radiação direta, difusa e global, o SVF, o ângulo de incidência dos raios solares e o aspect da fachada naquele ponto. Com este conjunto de dados é possível descrever o potencial solar da área urbana 3D a cada hora de cada dia do ano e integrá-los para o intervalo temporal de interesse. Os estudos mais frequentes exigem somas mensais, por estação do ano e anuais, as quais podem ser também opcionalmente fornecidas pelo algoritmo.

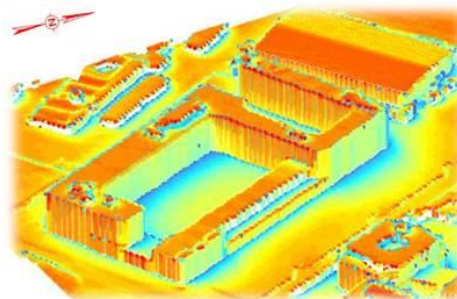
## 3. Aplicações

### 3.1 Potencial fotovoltaico de áreas urbanas

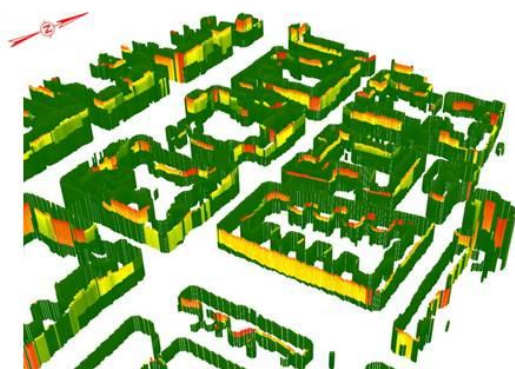
O algoritmo SOL tem sido aplicado a título experimental a várias áreas urbanas de diferentes latitudes com o intuito de comparar modelos standard de radiação, modelos de cálculo de SVF, modelos de sombra e ainda realizar a validação de valores estimados versus valores de radiação global medidos em fachadas. Alguns desses testes encontram-se a decorrer, não podendo os resultados ser ainda divulgados.



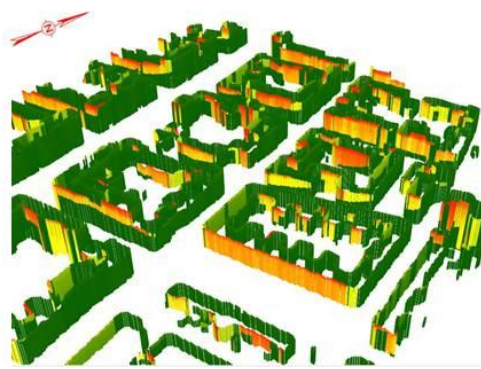
**Figura 2** – Radiação global anual num edifício do Campus da FCUL mostrando o efeito do SVF na variação da radiação nas fachadas



**Figura 3** – Radiação global anual num edifício do Campus da FCUL mostrando a coerência entre valores calculados para o solo e para as fachadas



**Figura 4** – Radiação global nas fachadas às 9h de 1 de janeiro numa área residencial de Lisboa



**Figura 5** – Radiação global nas fachadas às 13h de 1 de janeiro na mesma área da Fig.3

A mais valia dos dados produzidos pelo SOL é, de facto, a integração da informação relativa às fachadas e a diferenciação que se consegue obter ao longo de cada fachada proveniente do modelo de sombras e do algoritmo de cálculo do SVF, tão relevante em zonas edificadas pela sua variabilidade tanto na horizontal como na vertical. É notável a reprodução que o modelo consegue da evolução da quantidade de luz difusa captada em diversas cotas, crescendo em geral dos pisos térreos para os mais elevados, de acordo com a crescente quantidade de área de céu visível a partir de um ponto situado nos respetivos pisos.

## 2 Aplicação de realidade aumentada

O facto de o algoritmo SOL produzir dados de radiação sobre fachadas permitiu o desenvolvimento de uma aplicação de realidade aumentada para *tablets* com sistema operativo Android, cuja finalidade será eventualmente o apoio de técnicos de instalações fotovoltaicas que procurem, no terreno, as áreas de fachada mais vantajosas para a produção de energia fotovoltaica. A aplicação SOLAR é desenvolvida em linguagem Java para Android e baseia-se numa biblioteca RUBI Glare de funções que permitem integrar a visualização contínua da imagem da câmara incorporada no *tablet*, a leitura dos dados dos sensores de atitude e posição e a representação sobre a imagem em tempo real dos hiperpontos 3D, com os respetivos valores de radiação, os quais são projetados, pelas respetivas coordenadas, sobre os edifícios que se encontrem no campo de visão (Pedrosa *et al* 2013, Carmo *et al* 2014).





Figura 6 -Aplicação SolAR :Visualização de radiação nas fachadas em realidade aumentada

É possível associar aos hiperpontos diferentes classes de informação, por exemplo, radiação anual ou radiação nos meses de Inverno, sendo ainda possível sobrepôr dois tipos de informação e visualizar sequências temporais de dados de radiação, como por exemplo, os dados de radiação mensal para as fachadas que aparecem no campo de visão da câmara do *tablet*. Os hiperpontos e seus dados associados encontram-se numa base de dados. Esta aplicação permite simular interativamente a colocação de um módulo fotovoltaico: o utilizador seleciona as dimensões do módulo, pode arrastá-lo ao longo de uma fachada e em cada posição obter o valor da energia que se prevê que produza (Silva 2015).

#### 4. Perspetivas futuras

O algoritmo SOL e a aplicação SolAR aqui apresentados, são desenvolvidos na FCUL e estão em constante aperfeiçoamento. O algoritmo SOL encontra-se numa fase de superação das limitações inerentes ao carácter *raster* dos dados de entrada e de aceleração dos processos computacionais recorrendo a cálculos em paralelo. Para a aplicação SolAR estão a ser desenvolvidas novas funcionalidades que incluem o melhoramento da precisão do posicionamento do *tablet* em campo.

#### Agradecimentos

Agradece-se aos alunos da FCUL que têm colaborado no desenvolvimento da aplicação SolAR: José Pedrosa, Silvana Silva e Carolina Meireles. Agradece-se igualmente o apoio material da unidade de I&D BioISI, UID/MULTI/04046/2013 financiada através da FCT/MCTES/ PIDDAC, Portugal. O trabalho é parcialmente financiado pelo projeto PTDC/EMSENE/4525/2014 da FCT.

#### Referências Bibliográficas

- Aguiar, R. (1998). Dados Meteorológicos para Energias Renováveis e URE em Portugal (PCLIMA project). Final report ALTENER XVII/4.1030/Z/98-92), INETI – DER, Lisbon.
- Carmo, M. B.; Cláudio, A. P.; Ferreira, A.; Afonso, A. P.; Redweik, P.; Catita, C.; Brito, M. C.; Pedrosa, J. N. (2014). Visualization of Solar Radiation Data in Augmented Reality. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2014, ISMAR 2014, 255-256 <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6948437>
- Carneiro, C. (2011). Extraction of urban environmental quality indicators using LiDAR-based Digital Surface Models. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, PhD thesis.
- Fu, P.; Rich, P.M. (1999). Design and implementation of the solar analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. In: Proc. IX Annual ESRI User Conference.
- Hofierka, J.; Zlocha, M. (2012). A new 3-D Solar Radiation Model for 3D-City Models. Transactions in GIS, 16(5): 681-690
- Hofierka, J.; Sári, M. (2002). The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In: Proceedings of the Open source GIS – GRASS Users Conference. Trento, Italy, 11–13 Sept
- Kumar, L. et al., 1997. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. International Journal of Geographical Information Science 11:475–497.
- Meteonorm, 2015 : URL : <http://www.solardesign.co.uk/meteonorm.php> (último acesso 24-09-2015)



- Pedrosa, J. N.; Carmo, M. B.; Cláudio, A. P.; Afonso, A. P.; Ferreira, A.; Redweik, P.; Catita, C. (2013). Realidade Aumentada com Dados Científicos em Dispositivos Móveis. *Interação* 2013, 70-76
- Redweik, P.; Catita, C.; Brito, M. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape, *Solar Energy*, 97: 332-341, ISSN 0038-092X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.036>
- Scognamiglio, A.; Røstvik, H.N. (2012). Photovoltaics and zero energy buildings: a new opportunity and challenge for design. *Progress in Photovoltaics: Research and Application*. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2286>.
- Silva, S. (2015). Visualização de Dados sobre Radiação Solar. Tese de mestrado em Engenharia Informática, Dep. de Informática, Faculdade de Ciências da Faculdade de Lisboa