

## CARACTERIZAÇÃO DO RECURSO EÓLICO EM AMBIENTE URBANO – APLICAÇÃO A UMA ZONA URBANA PORTUGUESA

Costa P., Simões T., Estanqueiro A.

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia I.P., Lisboa, Portugal,  
[paula.alexandracosta@lneg.pt](mailto:paula.alexandracosta@lneg.pt), [teresa.simoess@lneg.pt](mailto:teresa.simoess@lneg.pt), [ana.estanqueiro@lneg.pt](mailto:ana.estanqueiro@lneg.pt)

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.3076>

### RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia de avaliação preliminar do recurso eólico numa área urbana através do uso de um modelo digital de terreno urbano (DTM urbano) desenvolvido pelos autores tendo a sua metodologia de criação já apresentado resultados promissores, sobretudo quando aplicada em modelos comerciais CFD. Neste trabalho recorreu-se a um modelo comercial de referência do sector de energia eólica para o cálculo do recurso do vento, o modelo WaspEngineering, e ao modelo *freeware* CDF-OpenFoam, de forma a avaliar o impacto das estimativas obtidas por ambos os modelos com a utilização do modelo digital de terreno urbano. Um perfilador vertical de vento – Lidar - capaz de inferir o vento horizontal a diversas alturas acima do nível do mar foi instalado no telhado de um edifício selecionado para fins de validação do perfil vertical do vento dentro da área urbana. O modelo digital de terreno urbano permite a introdução da descrição do tecido urbano acoplado à orografia da região como se fosse um terreno complexo. Os resultados obtidos mostram que a metodologia do terreno digital urbano é favorável para estudar o comportamento do perfil vertical do vento em ambiente urbano em altíssima resolução espacial, uma vez que estão de acordo com as observações inferidas por Lidar, e por outro lado, adequada ao uso em modelos CFD de várias tipologias – comerciais e *freeware*.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelação CFD, recurso eólico, ambiente urbano, modelo digital de terreno urbano, lidar

### ABSTRACT

This paper presents a methodology for the preliminary assessment of the wind resource in an urban area using an urban digital terrain (urban DTM) developed by the authors, having this methodology already shown promising results, especially when applied to commercial CFD models. In this work, a commercial reference model of the wind energy sector to calculate the wind resource, the WaspEngineering model, and the freeware CDF-OpenFoam model, were used in order to assess the impact of the estimates obtained by both models with the use of the urban DTM. A vertical wind profiler - Lidar - capable of inferring the horizontal wind at different heights above the sea level was installed on the roof of a selected building to validate the vertical wind profile within the urban area. The DTM enables the introduction of the description of the urban fabric coupled with the region's orography as if it was a complex terrain. The results obtained show that the urban DTM methodology is adequate to study the behavior of the vertical wind profile in an urban environment in very high spatial resolution, since they are in accordance with the inferred observations by Lidar. It is also possible to conclude that the Urban DTM methodology, issuitable for use in CFD models of various types - commercial and freeware.

**KEYWORDS:** CFD modelling, wind resource, urban environment, urban digital terrain, lidar

## INTRODUÇÃO

Neste trabalho, recorreu-se a um modelo CFD de código aberto, o modelo OpenFoam (Weller et al., 1998) para se avaliar, de forma preliminar o comportamento do perfil vertical do vento e o potencial eólico em torno de um edifício localizado numa área urbana pertencente ao Município de Cascais - São Pedro do Estoril, bem como a utilização do modelo comercial WaspEngineering (Astrup, 1999) (não CFD), amplamente utilizado no setor eólico, com especial incidência em regiões de orografia complexa. Este trabalho decorre de um estudo efetuado por (Esteves, 2015; Simões and Estanqueiro, 2016), onde se desenvolveu uma metodologia de avaliação do potencial eólico urbano com base na geração de uma superfície de cotas envolvendo a malha urbana. Neste sentido, os resultados obtidos permitirão compreender se esta metodologia é adequada para a descrever de forma fiel o escoamento atmosférico em zonas urbanas de orografia complexa, com base em modelos *freeware*, através da validação do perfil vertical de vento em redor de um edifício. É de referir que a metodologia de criação do modelo de terreno digital urbano, permite criar de forma célere a agregação do tecido urbano com um modelo digital de terreno de forma a ser tratado como um terreno complexo e por isso adequado para uso nos modelos numéricos. Esta metodologia de agregação quando comparada com as habituais práticas de agregação de edifícios a terrenos, torna os modelos numéricos mais estáveis do ponto de vista computacional e tornam o processo de simulação mais célere uma vez que permitem uma convergência mais rápida na obtenção da solução otimizada do escoamento atmosférico.

## O VENTO NO AMBIENTE URBANO

A descrição e simulação do vento em ambiente urbano tem sido estudada há várias décadas existindo à data vários trabalhos publicados sobre este assunto. No entanto, muito poucos incidem especificamente em aplicações eólicas. O estudo realizado por (Li, Wang e Yuan, 2010a) incide sobre pequenos grupos de edifícios em áreas urbanas para a instalação de sistemas de energia em pequena escala. A falta de dados experimentais do vento continua a ser referida na literatura, em particular no estudo mais recente supracitado sendo o uso de modelos CFD a fonte preferencial para fornecer dados de vento para este fim. No entanto, alguns projetos de investigação mencionam casos de observação de campanhas experimentais em que a tecnologias SONAR e a anemometria convencional de copos são utilizados para avaliar o potencial eólico em áreas urbanas. O projeto WINEUR (Syngellakis, Clement & Cace, 2005) é mencionado em diversos estudos científicos dedicados a estas temáticas. Os sistemas de medição LIDAR (Gryning & Batchvarova, 2009) e métodos estatísticos, como as distribuições Weibull baseadas em grandes bancos de dados de vento, também são utilizadas pela comunidade científica para esse fim (Acosta & Djokic, 2010).

A representação física do tecido urbano é de extrema importância, independentemente da metodologia aplicada ao recurso eólico urbano. O uso de metodologias CAD e sistemas de sensores remotos LIDAR para representação dos edifícios no formato LAS são alguns dos métodos apresentados à escala da cidade (Benthan & Britter, 2003). O projeto de banco de dados NUDAPT - National Urban Database com Access Portal Tool (NUDAPT, 2012), constitui uma exceção uma vez que contém informações em 2D e 3D de um conjunto de cidades americanas e permite a qualquer utilizador descarregar o edificado urbano e usar essa informação nos seus projetos de estudo. Além disto, o uso de SIG - Sistemas de Informação Geográfica - é frequentemente usado para modelar o tecido urbano em áreas maiores e especialmente quando essas áreas são colocadas em terrenos complexos. (Kanda M., 2009) utilizaram este tipo de metodologia para modelar áreas alargadas com sucesso. Relativamente ao fluxo de vento sobre um edifício simples de forma cúbica, é possível constatar experimentalmente vários efeitos tridimensionais no escoamento atmosférico. O fluxo de vento sobre o edifício gera diferenças de pressão em torno do edifício e essas diferenças de pressão modulam o comportamento do vento e induzem desvio das linhas de corrente originando circulações locais e turbulência. Verifica-se, experimentalmente que, quando o vento se aproxima do edifício (montante) a zona de extensão vertical e horizontal do vórtice de circulação (a jusante) é 1,5 vezes a altura do edifício medida a partir da parede; mas se o edifício tiver dimensões horizontais e verticais não similares então a interferência do fluxo de vento aumenta e o comprimento do vórtice circundante é cerca de 12 vezes a altura do edifício se se considerar um edifício isolado ou diversos conjuntos de vórtices em forma de ferradura (vórtices de Von Karman) que envolvem a base do edifício e continuam a sua perpetuação a jusante. Além disso e além da zona dos vórtices associados, os efeitos de separação induzidos pelos edifícios de contornos não regulares causam déficit de velocidade do vento e excesso de turbulência na região limítrofe de cada edifício prolongando a dimensão de cada vórtice até 5 a 20 alturas dos prédios para jusante (Plate, 1982)

## CASO DE ESTUDO

Neste trabalho e a fim de estudar o comportamento do vento em ambiente urbano selecionou-se uma região do Município de Cascais, São Pedro do Estoril, onde se situa o edifício do Centro Interpretação Ambiental da Pedra do Sal (Figura 1a). Este edifício tem aproximadamente 3 metros de altura e está situado a cerca de 25 m acima do nível médio do mar. No topo deste edifício, entre de 2012 e 2013 esteve em operação um sistema Lidar (Figura 1b), capaz de monitorizar as componentes tridimensionais do vento a diversos níveis de altitude (até aos 200m, no caso presente).

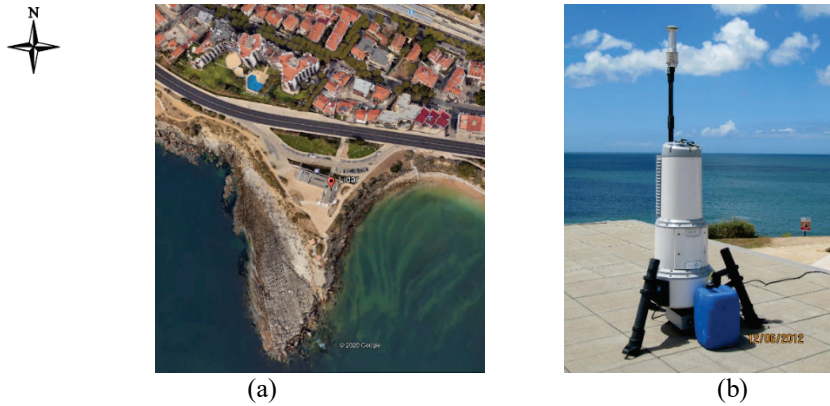


Figura 1. (a) Localização do Lidar no topo do edifício do Centro de Interpretação Ambiental – São Pedro do Estoril, (b) visualização do sistema de medição do vento Lidar no topo do edifício.

O sistema Lidar operou continuamente desde 12 de Junho de 2012 até 12 de Fevereiro de 2013 perfazendo um total de oito meses de dados medidos a 2m, 18m, 23m, 28m, 33m, 38m e 58m. Na figura 2 apresentam-se as principais estatísticas de vento obtidas dos dados recolhidos do Lidar referentes à maior altura definida no lidar, 58m acima do nível da cobertura do edifício, bem como os perfis verticais do vento médio (Global – todos os sectores, N – Sector Norte [345° a 360° e de 0° a 15°] e NW-Noroeste [315° a 345°] com indicação do valor de rugosidade equivalente calculado com base no diferencial de altura mais elevada versus mais baixa da medição do Lidar.

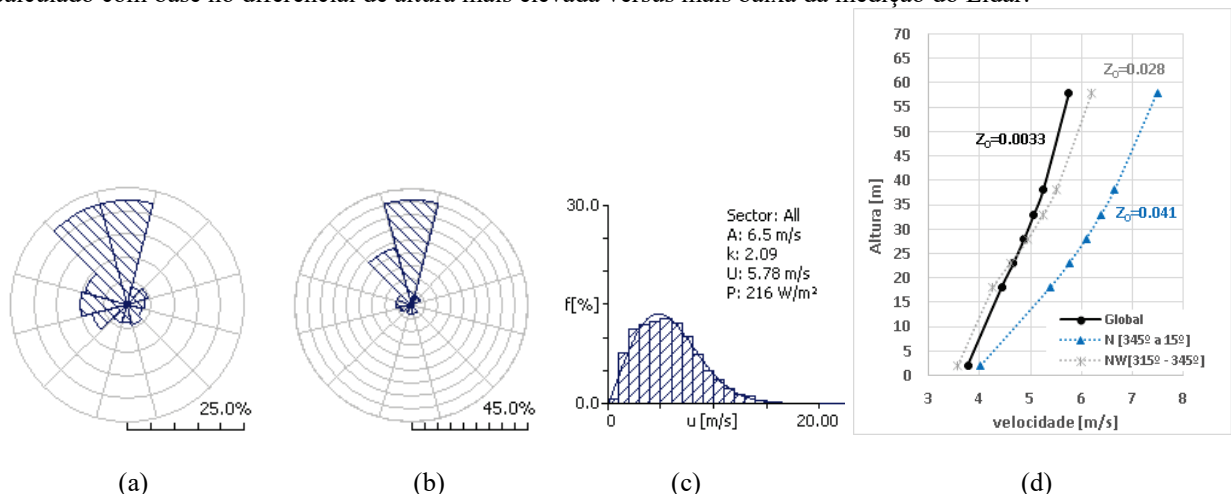


Figura 2. (a) Rosa de Ventos (h=58m), (b) Rosa de Potências (h=58m), (c) Distribuição de Weibull (h=58m), (d) Perfis Verticais do Vento-Lidar (Global-todos os quadrantes; N-quadrante Norte e NW-quadrante Noroeste)].

O perfil vertical foi traçado pelos quadrantes dominantes e averiguou-se a rugosidade local equivalente, para definição de condição inicial (*Inlet*) nos modelos numéricos. A rugosidade local equivalente pode ser calculada através da Lei Logarítmica do vento expressa pela equação (1) conhecidos os valores da velocidade média a dois níveis diferentes ( $v_2$ ;  $z_2$ ) e ( $v_1$ ;  $z_1$ ) sendo o valor de  $d$  o “displacement height” correspondente à altura “zero” ou a altura de referência a partir da qual se efetuam as medições na vertical. Neste estudo, o valor de  $d$  é nulo e  $z_0$  corresponde ao valor da rugosidade local equivalente.

$$v_2 = v_1 \frac{\ln\left(\frac{z_2 - d}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1 - d}{z_0}\right)} \quad (1)$$

Assim, e tomado como exemplo os resultados globais por quadrante, sabendo que  $v_1 = 3.8\text{m/s}$ ;  $z_1 = 2.0\text{m}$  e  $v_2 = 5.8\text{m/s}$ ;  $z_2 = 58.0\text{m}$  obtém-se aproximadamente um valor típico de rugosidade local ( $z_0$ ) igual a 0.033 (ver figura 1d) que corresponde a uma região dominada por fraca presença de obstáculos/edifícios ou zonas ribeirinhas com baixos edifícios e amplamente afastados. Relativamente aos setores dominantes, observa-se valores de rugosidade equivalente iguais a 0.028 e 0.04 para os setores Noroeste e Norte, evidenciando de forma marcante a presença obstáculos/edifícios na região. Observando os resultados obtidos das estatísticas de vento verifica-se que o local de estudo se afigura adequado para o aproveitamento eólico em ambiente urbano, particularmente para o edifício do Centro de Interpretação Ambiental, verificando-se igualmente a predominância do vento oriundo dos quadrantes Noroeste e Norte. Nesse sentido, e no que diz respeito à configuração das simulações numéricas, adotou-se por efetuar os estudos do escoamento atmosférico apenas para um setor central, centrado no azimute dos 330° por forma a englobar as observações de vento exclusivas dos setores Norte e Noroeste.

Metodologia

Para a realização deste trabalho, recorreu-se a um modelo de terreno digital urbano envolvendo uma área suficientemente abrangente em torno do edifício do Centro de Interpretação Ambiental da Pedra do Sal em São Pedro do Estoril – Município de Cascais o qual foi introduzido nos modelos numéricos (OpenFoam e WaspEngineering).. A metodologia agrega a orografia sob a forma de modelo digital de terreno com o edificado urbano tendo como base a descrição vetorial com atributos de cota (Esteves, 2015; Simões and Estanqueiro, 2016). Na figura 3a, ilustra-se o modelo digital de terreno em área alargada, na figura 3b, polígonos do edificado existente e figura 3c, o modelo de terreno digital urbano resultante final antes da sua introdução nos modelos numéricos para avaliação do potencial cólico urbano.

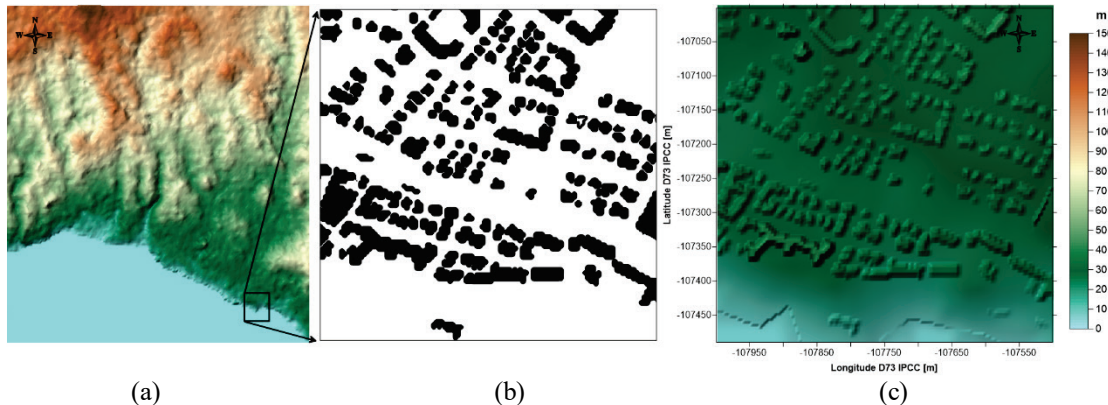


Figura 3- (a) Modelo Digital de terreno, (b) polígonos do edificado da área de estudo com cota, (c) mapa final do modelo digital de terreno urbano.

Através dos resultados numéricos obtidos com aplicação de ambos os modelos, foi possível extrair perfis verticais do vento e comparar pontualmente com os valores de observação obtidos pelo Lidar durante a campanha experimental de medição do vento.

OpenFoam

O modelo OpenFoam é um modelo CFD *freeware* composto por uma série de módulos numéricos que dominam o processamento da informação de entrada, a simulação numérica de base CFD e o pós-processamento de resultados. Na figura 4 ilustra-se de forma simplificada os respetivos módulos e sua ordem de execução bem como os tipos de informações necessárias ao pré-processamento que serve de base à execução de cada módulo.

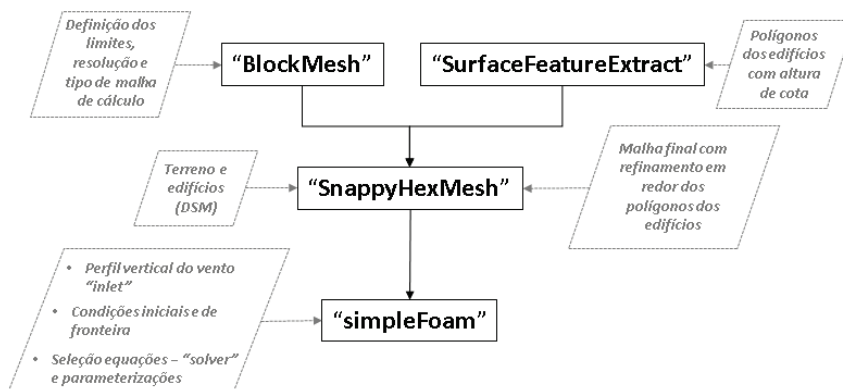


Figura 4- Metodologia de execução usada na execução do modelo CFD OpenFoam.

É de referir que no presente caso de estudo optou-se por gerar no módulo *BlockMesh* uma malha estruturada com espaçamento horizontal de 2x2m (figura 5a) com topo a 500m de altitude sendo que, em torno dos edifícios, o refinamento é de 0.25x0.25m sendo obtido com o módulo *SnappyHexMesh*. Na figura 5b apresenta-se o refinamento vertical da malha, definido no módulo *BlockMesh* onde junto da superfície a resolução nativa da malha é de 0.25x0.25m e no topo desce para 20x20m. Na tabela 1 apresenta-se o conjunto de informações impostas aos módulos *BlockMesh* e *SnappyHexMesh* para a execução do caso de estudo na área de São Pedro do Estoril.

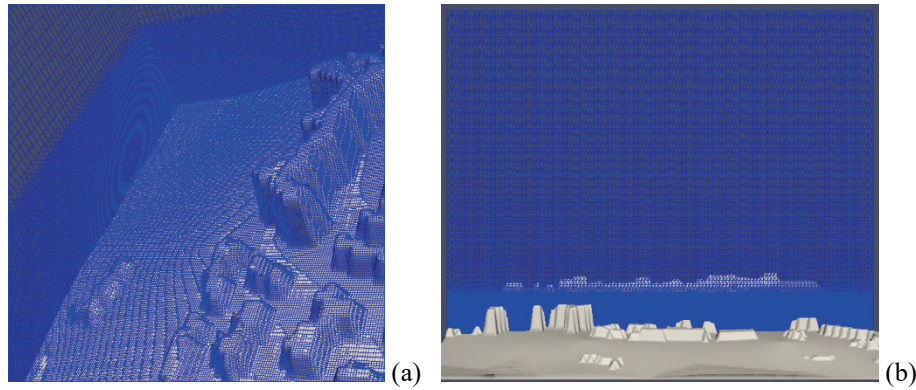


Figura 5- (a) Malha computacional 2x2m e refinamento a 0.25x0.25m em torno dos edifícios, (b) Malha vertical com vertical stretching – junto da superfície 0.25x0.25m e no topo 20x20m de resolução vertical.

Tabela 1- Opções impostas e informações relativas dos módulos *BlockMesh* e *SnappyHexMesh*

Módulo	Opções Impostas /Informações
<i>BlockMesh</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Domínio 3D 2x2m (<i>simplegrading</i>); Topo do domínio: 400m;</li> <li>Resolução vertical: (<i>stretching</i>) 0.25x0.25m junto do solo e 20x20m junto do topo do domínio;</li> </ul>
<i>SnappyHexMesh</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leitura do modelo digital de terreno urbano (formato STL ou OBJ); Refinamento sobre os edifícios: 0.25x0.25m; Opções tomadas para o Refinamento: <i>castellated mesh</i>; <i>snapping</i>; <i>refinement over searchable boxes - buildings</i> Nr. Total de pontos da malha: 10 194 006; Nr. Total de faces: 35 317 520; Nr. Total de células: 10 681 287</li> </ul>

Na tabela 2 apresenta-se o conjunto de informações impostas ao modelo OpenFoam (*setup*), as condições iniciais e de fronteira, as parameterizações e os respetivos *solvers* considerados para simulação em modo estacionário. O perfil da camada limite imposto ao *Inlet* do modelo foi estimado de acordo com os valores de vento observados na região de São Pedro do Estoril entre os níveis 2m (altura mais baixa) até 58m (altura mais elevada).

WaspEngineering

O modelo WaspEngineering é um modelo Não-CFD comercial. Este modelo é apenas alimentado por condições iniciais, tais como, o modelo digital de terreno urbano, o valor característico da rugosidade equivalente da área de simulação e os parâmetros do perfil vertical do vento, que, no caso, presente coincidem com os usados no OpenFoam (Tabela 2 – *Inlet*). Na figura 6 ilustra-se a metodologia de simulação com a apresentação das condições iniciais de entrada para o modelo WaspEngineering.

Tabela 2- Opções impostas e informações relativas do módulo *simpleFoam*.

Módulo	Opções Impostas /Informações
<i>simpleFoam</i>	<p><b>Características:</b> OpenFoam (Versão V16.12+ lançada a 23/12/2016); Solução: modo estacionário; Convergência (precisão): 1e-4; Passo de tempo: 1s; Nr. Máximo de passos de tempo: 5000s; Tempo de convergência da solução verificado: 3160s;</p> <p><b>Parameterizações:</b> Modelo de turbulência: k-ε; Gravidade (aceleração): -9.81m/s; Rugosidade dos Edifícios: tipo <i>non slip wall function depending of k and ε</i></p> <p><b>Solvers:</b> Pressão: GAMS; Velocidade, k, ε, e(energia): <i>smoothSolver with symGaussSaidel</i>;</p> <p><b>Condições Iniciais e de Fronteira:</b> <math>k \sim 1.5 \times (I \times U)^2</math>; I=intensidade de turbulência 0.15; U=6m/s; <math>\epsilon \sim (c\mu^{0.75} \times k^{1.5})/L</math>; <math>c\mu=const.=0.09</math>; L=0.09;</p> <p><b>Inlet:</b> <i>Boundary Layer with Inlet Velocity Profile</i>; <math>U_{ref}=6.2m/s</math>; <math>Z_{ref}=80m</math>; <math>Z_0=uniform=0.028</math> (<i>low occupation</i>); <math>Z_{ground}=0</math>; <i>Flow Direction: Noroeste (330°)</i></p> <p><b>Outlet:</b> Pressão e Velocidade: <i>free condition</i></p> <p><b>Internal Field:</b> Velocidade=6m/s; Direção do escoamento; Noroeste (330°)</p> <p><b>Pos-Processamento:</b> Magnitude do vento; Perfil de vento simulado para cada ponto da malha</p>

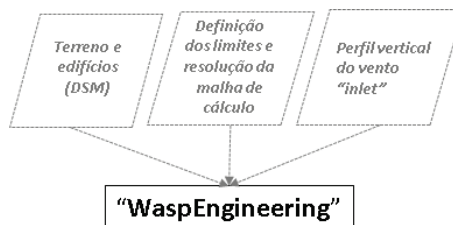
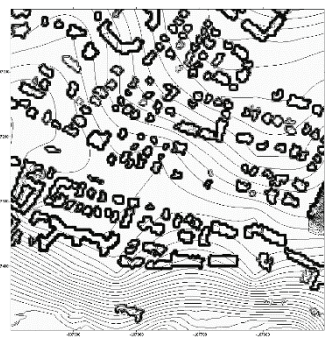


Figura 6- Metodologia e condições iniciais de entrada para o modelo WaspEngineering

O modelo WaspEngineering é um modelo que só resolve casos estacionários através de um solver denominado LINCOM (Astrup, 1999). Este solver não é iterativo nem convergente e por isso não depende de passo de tempo. Contém uma parametrização simplificada para a turbulência atmosférica e outras para resolver os efeitos adiabáticos sobre as montanhas e zonas de recirculação em terrenos complexos e modelos de esteira adaptados ao tipo de turbina eólica ou à rugosidade do solo. Contém ainda um esquema simplificado para lidar com a estratificação térmica da atmosfera. Na tabela 3 apresentam-se as informações de entrada no modelo (*setup*) e as condições iniciais impostas para resolução do caso de estudo em modo estacionário bem como a ilustração do mapa digital de terreno urbano em formato vetorial.

Tabela 3- Opções impostas e informações relativas do modelo WaspEngineering para o caso de estudo

Módulo	Opções Impostas /Informações	Mapa DFX – Modelo digital terreno urbano
WaspEngineering	<p><b>Características:</b> WaspEngineering V2.0 (lançado em 2005);</p> <p><b>Condições Iniciais:</b> Leitura do modelo digital de terreno urbano; Malha regular adaptada ao modelo digital de terreno urbano; Topo do domínio: 400m; Resolução horizontal e vertical: 1x1m; Rugosidade <math>Z_0 = 0.028m</math> (low occupation);</p> <p><b>Tipo de Lei de Parede:</b> <i>Non slip wall function</i> (constant.value=0.03);</p> <p><b>Inlet:</b> Perfil Vertical do Vento; <math>U_{ref}=6.2m/s</math>; <math>Z_{ref}=80m</math>; <math>Z_0=uniform=0.028</math> (low occupation); <math>Z_{ground}=0</math>; <i>Flow Direction:</i> Noroeste (330°)</p> <p><b>Pos-Processamento:</b> Magnitude do vento em planos XY para determinado Z; Perfil de vento simulado para cada ponto da malha.</p>	

## RESULTADOS

Relativamente aos resultados, optou-se por apresentar os campos horizontais da velocidade do vento nos planos XY para ambos os modelos numéricos e para as alturas de 33m e 38m. Os planos de corte XZ e YZ em torno da coordenada de localização do Lidar são apresentados apenas para o modelo OpenFoam uma vez que o WaspEngineering não produz resultados nestes planos. É ainda apresentado o perfil vertical simulado obtido por ambos os modelos numérico no local do Lidar para efeitos de comparação estatística e averiguação dos desvios médios da velocidade. É de referir que, como condição inicial, foi imposto aos modelos apenas a simulação do campo da velocidade na direção Noroeste 330°, encontrando-se em curso a simulação dos restantes setores para produção do Atlas do Potencial Eólico Urbano da região em estudo.

### Comparação Planos Horizontais da Velocidade do Vento

Nas figuras 7 e 8 ilustram-se os resultados simulados para os planos horizontais XY da velocidade às alturas intermédias de 33m e 38m. Das imagens apresentadas é possível visualizar que o modelo Openfoam consegue reproduzir de forma fiel o escoamento em torno dos edifícios e as perturbações que estes induzem no escoamento atmosférico, enquanto que o modelo WaspEngineering não fornece o detalhe espacial esperado do campo da velocidade média do vento, muito embora forneça uma estimativa típica/média para a área de estudo. Nas figuras 9a e 9b ilustram-se ainda os resultados da velocidade média do vento na camada limite atmosférica (até aos 400m – topo da malha) projetados em dois planos verticais, XZ e YZ, cuja localização se apresenta na figura 10 a).

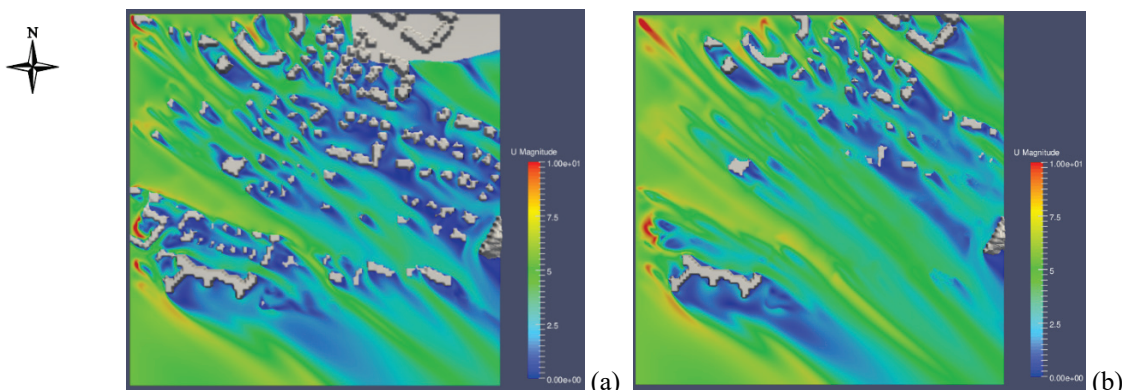


Figura 7. Perfis horizontais do vento OpenFoam (a)  $h=33m$  e (b)  $h=38m$  onde  $h = \text{terreno} + \text{altura dos edifícios}$

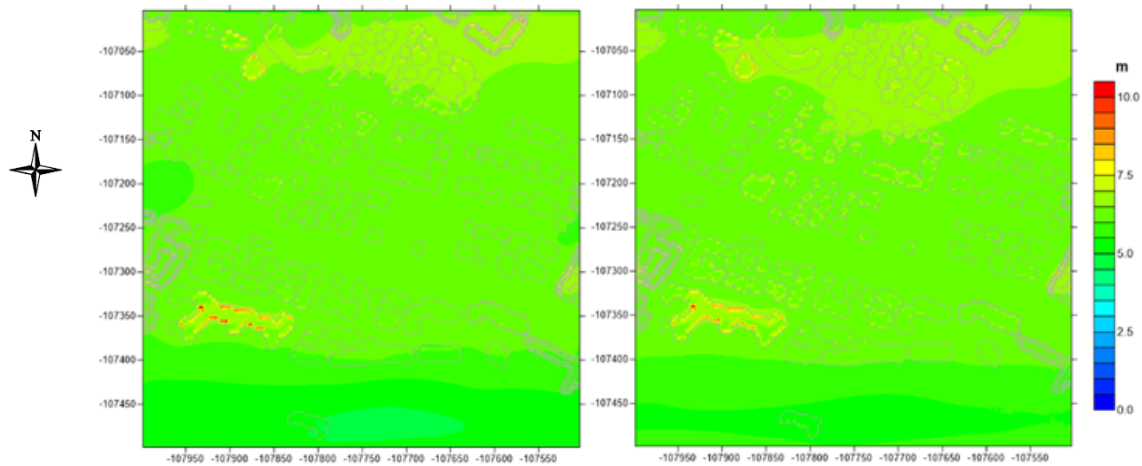


Figura 8. Perfis horizontais do vento WaspEngineering (a)  $h=33\text{m}$  e (b)  $h=38\text{m}$  onde  $h = \text{terreno} + \text{altura dos edifícios}$ .

Da observação de ambos os planos simulados pelo OpenFoam é possível observar o comportamento do escoamento atmosférico em torno dos edifícios sendo de destacar que este modelo simula fielmente o efeito tridimensional das perturbações dos edifícios no escoamento atmosférico.

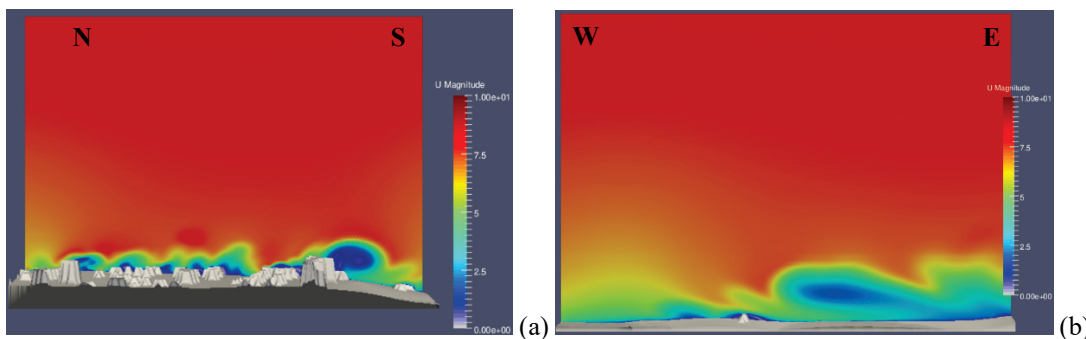


Figura 9. (a) Plano YZ ( $X = -107793\text{ m}$ ) ; (b) Plano XZ ( $Y = -63260\text{m}$ ) intensidade média do vento, OpenFoam.

#### Comparação Perfis Verticais da Velocidade do Vento

Na figura 10a identifica-se sob a maquete dos edifícios a localização do edifício em estudo bem como o traçado dos planos verticais XZ e YZ para os quais foram produzidas as imagens ilustradas nas figuras 9a e 9b. Da figura 10b é possível observar que ambos os modelos numéricos conseguem reproduzir um perfil vertical de vento da região bastante fiel muito embora o perfil obtido pelo OpenFoam é mais aproximado e correto para zonas urbanas uma vez que este modelo caracteriza muito melhor a turbulência e o efeito dos edifícios no escoamento atmosférico. É ainda de referir que o perfil estimado pela lei logarítmica do vento (Estimativa  $z_0$ ) representa um perfil de velocidades vertical pouco perturbado pela presença dos edifícios e que, de certa forma, tinha sido já identificado através dos dados experimentais -figura 1d-, cujos valores de  $z_0$  oscilam entre 0.0033 e 0.041° que permite ainda justificar a qualidade do perfil de vento obtido pelo WaspEngineering uma vez que este modelo produz perfis verticais bastante realistas para regiões com pouca densidade urbana. Na tabela 4 apresentam-se os valores da velocidade médias e respetivos desvios obtidos face aos valores observados pelo Lidar em todas as alturas de monitorização para o quadrante dominante Noroeste - NW [315° a 345°].

Os resultados obtidos e apresentados na tabela 4 permitem constatar que o perfil simulado pelo OpenFoam é o que se aproxima mais das observações com um desvio médio de 0.70% face ao desvio de -9.00% obtido pelo modelo WaspEngineering. É ainda de referir que as estimativas obtidas pelo WaspEngineering são sempre subestimadas sendo mais notória o desvio nos níveis de altura mais baixos. Relativamente ao modelo OpenFoam, destacam-se as estimativas ligeiramente sobrestimadas para os níveis abaixo dos 28m e subestimadas para os níveis superiores, o que indica que este modelo “sente” o efeito concentrador do escoamento atmosférico junto do edifício do Centro de Interpretação Ambiental.

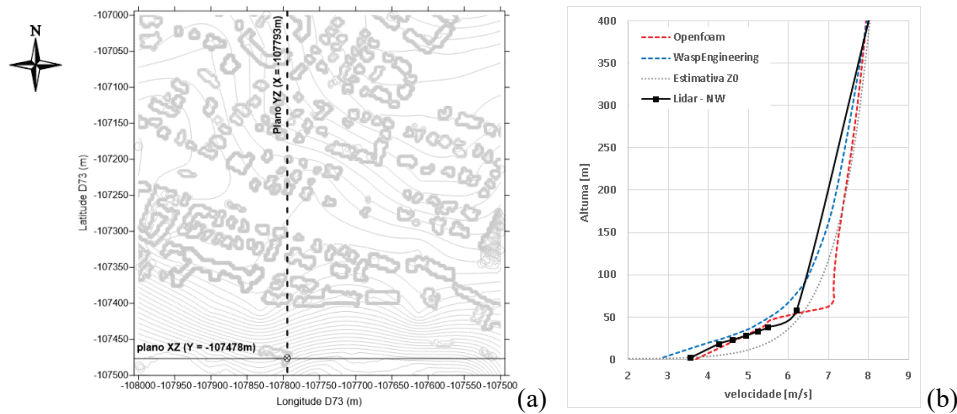


Figura 10, (a)-Localização do edifício do Centro de Interpretação Ambiental (círculo delineado) e planos XZ e YZ processados com o OpenFoam, (b)- Perfis verticais do vento simulados e estimado pela lei logarítmica do vento  $z_0$

Tabela 4- Velocidade média e respetivos desvios médios obtidos pelos modelos numéricos para cada altura inferida pelo Lidar no quadrante Noroeste – NW [315° a 345°].

Altura [m]	Velocidade Média – NW [m/s]			Desvios Velocidade Média – NW (Modelo – Observação) [%]	
	Lidar	WaspEng.	OpenFoam	WaspEng.	OpenFoam
2	3.57	2.88	3.70	-19.24	3.65
18	4.26	3.91	4.48	-8.26	5.13
23	4.62	4.27	4.70	-7.48	1.82
28	4.95	4.59	4.92	-7.27	-0.67
33	5.24	4.87	5.13	-7.04	-1.99
38	5.50	5.11	5.35	-7.07	-2.71
58	6.20	5.79	6.18	-6.64	-0.35
<b>Valor Médio Desvio</b>				<b>-9.00</b>	<b>0.70</b>

## CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho constituem-se de carácter preliminar e pretendem averiguar o escoamento do vento em torno do edifício Centro de Interpretação Ambiental Pedra do Sal localizado na zona de São Pedro do Estoril, Município de Cascais no qual foi instalado um instrumento Lidar de interferometria de vento capaz de medir as componentes tridimensionais do escoamento atmosférico a diversos níveis de altura para fins de avaliação do potencial eólico. As observações do Lidar mostraram que o escoamento na região envolvente do edifício é maioritariamente proveniente dos sectores Noroeste e Norte e mostram a presença de um perfil de velocidades vertical pouco perturbado pela presença dos edifícios evidenciado pela rugosidade local equivalente derivada das observações (valores de  $z_0$  oscilam entre 0.0033 e 0.041°) Foi testada uma metodologia para a representação da malha urbana em modelos digitais de terreno e verificou-se que a mesma é adequada para estudar o comportamento do vento urbano com elevada resolução espacial e é adequada para utilização em modelos CFD ou não-CFD. Foram testados e configurados dois modelos numéricos, o OpenFoam (CFD) e o WaspEngineering (Não-CFD) e verificou-se que ambos os modelos permitiram representar o perfil e velocidades do vento muito embora o perfil de vento simulado pelo modelo OpenFoam foi mais realista e aproximado aos dados observados, com um desvio médio de 0.90% para todas as alturas de medição do Lidar, o que permitiu mostrar que este modelo consegue caracterizar mais fielmente a turbulência e o efeito dos edifícios na perturbação do escoamento atmosférico face ao perfil de vento simulado pelo modelo WaspEngineering com um desvio médio de -9.00%. Do ponto de vista do recurso eólico verificou-se que o edifício do Centro de Interpretação Ambiental possui características de vento favoráveis para o aproveitamento eólico sendo que, novas localizações em edifícios nas proximidades poderão ser estudadas e simuladas de forma a identificar novos potenciais locais para o aproveitamento energético do vento urbano no Município de Cascais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Câmara Municipal de Cascais o fornecimento do edifício da região em estudo e ao Centro de Interpretação Ambiental, pela cedência do telhado do edifício para a instalação do Lidar para a coleta dos dados de vento.

## REFERÊNCIAS

- Acosta, J.L. e Djokic, S.Z. (2010): “Assessment of Renewable Wind Resources in UK Urban Areas”. In MELECON 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference., 2010. IEEE. pp.1439 - 1444.
- Astrup P., S.E. Larsen (1999): “Wasp Engineering flow model for wind over land and sea.” RisØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1999.
- Bentham, T. e Britter, R. (2003): “Spatially averaged flow within obstacle arrays”. *Atmospheric Environment*, [Pdf]. May, 37(15), Elsevier pp.2037-43. doi:10.1016/S1352-2310(03)00123-7. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231003001237> [Accessed 07 March 2014].
- Esteves T. (2015): “Identificação do potencial renovável para a produção de electricidade na perspectiva da microgeração”. PhD Thesis, in Portuguese, Faculty of Sciences, University of Lisbon, February 2015
- Gryning, S. e Batchvarova, E. (2009): “Measuring meteorology in urban areas - Some progress and many problems”. In Baklanov, A., Grimmond, C.S.B., Alexander, M. e Athanassiadou, M. *Meteorological and Air Quality Models*. 1st ed. London, UK: Springer. Ch. 12. pp.125-32.
- Kanda, M. (2009): “Review of Japanese Urban Models and a Scale Model Experiment”. In Baklanov, A.; Grimmond, C.S.B.; Alexander, M.; Athanassiadou; M.. *Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas*. 1st ed. London, UK: Springer. Ch. 5. pp.39-46.
- Li, D., Wang, S. e Yuan, P. (2010a) “A review of micro-wind turbines in the built environment”. In APPEEC, ed. APPEEC 2010 - Power and energy engineering conference, 28-31 March 2010. Chengdu, 2010a. IEEE. pp.1-4.
- NUDAPT (2012): NUDAPT. [Online] Available at: <http://www.nudapt.org> [Accessed 18 Julho 2012].
- Plate, E. (1982): “Wind tunnel modelling of wind effects in engineering”. In E. Plate, ed. *Engineering Meteorology*. Amsterdam: Elsevier. Ch. 13. pp.573-639.
- Simões T and A. Estanqueiro (2016): “A new Methodology for Urban Wind Resource Assessment”. *J. Renewable Energy*, vol 89, pp. 598-605, 2016
- Syngellakis, K., Clement, P. e Cace, J.(2005): “Wind energy integration in the urban environment – WINEUR” Techno-economic report. Project report. U.K.: European Comission - Intelligent Energy europe. pp.1-40.
- Weller H. G., G. Tabor, H. Jasak, C. Fureby (1998): “A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques”, *COMPUTERS IN PHYSICS*, VOL. 12, NO. 6, NOV/DEC