

# CARACTERIZAÇÃO DO VENTO URBANO COM RECURSO A UM MODELO CFD OPEN-SOURCE – APLICAÇÃO A UMA CIDADE PORTUGUESA

*Recurso eólico no ambiente urbano*

*Paula Costa<sup>1</sup>, Teresa Simões<sup>2</sup>, Ana Estanqueiro<sup>3</sup>*

(1) LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia I.P., paula.alexandracosta@lneg.pt

(2) LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia I.P., teresa.simoaes@lneg.pt

(3) LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia I.P., ana.estanqueiro@lneg.pt

## RESUMO

*Neste trabalho, é apresentado um estudo de avaliação preliminar do recurso eólico numa área urbana através do uso de um modelo digital de terreno urbano (DTM urbano) desenvolvido em trabalhos anteriores pelos autores, particularmente para aplicação em modelos comerciais CFD. Neste trabalho pretendeu-se utilizar um modelo comercial de referência do sector de energia eólica para o cálculo do recurso do vento, o modelo WaspEngineering bem como o modelo freeware CDF-OpenFoam, e avaliar o impacto das estimativas obtidas por ambos os modelos através do modelo digital de superfície. Um mastro anemométrico equipado com anemómetro e cata-vento foi instalado no telhado de um edifício dentro da área urbana seleccionada para fins de validação das estimativas de vento. 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 adequada para estudar o comportamento do vento urbano em altíssima resolução espacial em áreas urbanas, uma vez que estão de acordo com as observações. Também a metodologia relacionada ao desenvolvimento do DTM urbano mostra-se adequada para uso em modelos de CFD comerciais ou freeware.*

*Palavras chave: modelação CFD, recurso eólico, ambiente urbano, modelo digital de terreno urbano*

## 1.0 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem vindo a ser apresentados diversos trabalhos de investigação na área das cidades inteligentes em particular no que diz respeito à integração de pequenos sistemas de energia eólica em áreas urbanas como uma contribuição para o mix energético nas cidades. A integração destes sistemas tem sido estudada por diversos autores que concluem que há condições promissoras para o uso de pequenas turbinas eólicas em coberturas de edifícios e área envolvente para produção de eletricidade. No entanto a caracterização do recurso eólico urbano continua a ser um desafio devido aos obstáculos naturais existentes nestes ambientes e que constituem barreiras ao escoamento do vento - edifícios, árvores e outras estruturas. Fenómenos como a separação do escoamento e forte turbulência no topo e em redor de edifícios estão constantemente presentes. A forma mais fiável de caracterizar o potencial eólico e caracterização do recurso eólico consiste na realização de campanhas experimentais de medição do vento. Estas campanhas, continuam a ser extremamente onerosas quando comparadas com o custo de aquisição de uma pequena turbina eólica, pelo que, em alternativa, na maioria dos casos, recorre-se a modelos CFD - “Computer Fluid Dynamics”, para o estudo do comportamento do vento em redor dos edifícios e outros obstáculos presentes.

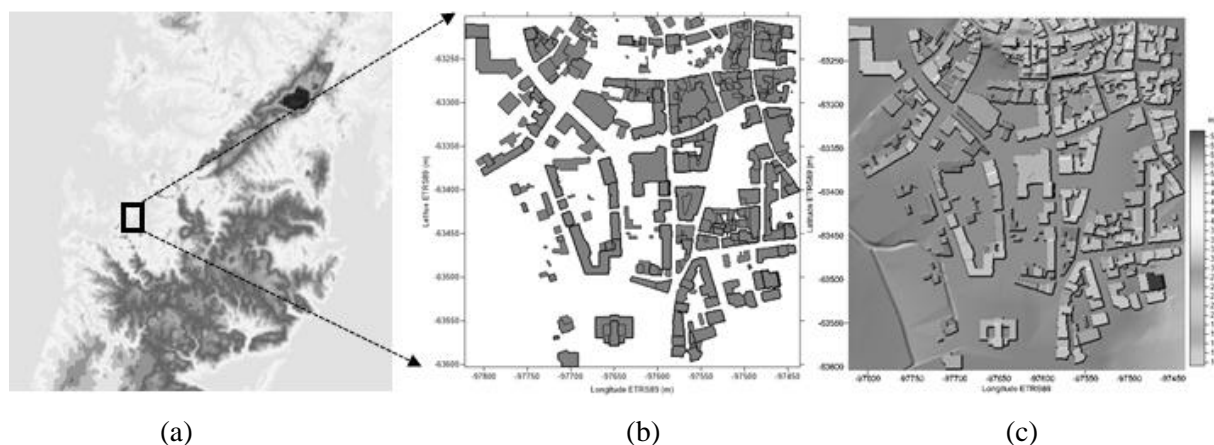
Algumas metodologias já foram desenvolvidas para superar a inexistência de medições de qualidade do vento (Esteves, 2015; Simões and Estanqueiro, 2016), muito embora os resultados demonstrados por (Simões

and Estanqueiro, 2016) já elucidam resultados muito encorajadores quando comparados com dados experimentais.

Assim, neste estudo, recorreu-se a um modelo CFD de código aberto, o modelo OpenFoam (Weller et al., 1998) para avaliar o potencial eólico numa cidade portuguesa – Torres Vedras, bem como a utilização do modelo comercial WaspEngineering (Astrup, 1999) de natureza não CFD, mas que se constitui como atualmente o modelo padrão para o cálculo das estimativas de vento e potencial eólico em terrenos complexos. Os resultados obtidos permitirão compreender se a metodologia utilizada por (Simões and Estanqueiro, 2016) pode ser aplicada sobretudo a modelos de código aberto, especialmente a descrição de terrenos e edifícios, que constitui a parte chave do trabalho aqui presente.

Um modelo de terreno digital urbano sobre uma parte da cidade Torres Vedras envolvendo a região de validação foi considerada para o desenvolvimento do estudo apresentado neste artigo e incluído numa área de simulação dos modelos numéricos (OpenFoam e WaspEngineering) usando uma metodologia que permite a introdução da descrição do tecido urbano como se fosse um terreno complexo. A metodologia agrega a orografia sob a forma de modelo digital de terreno com o edificado urbano na sua forma comum de polígonos com altura associada. A metodologia para a geração do modelo digital de terreno encontra-se descrita em (Esteves, 2015; Simões and Estanqueiro, 2016) e baseia-se na utilização de técnicas de informação geográfica para adicionar o edificado à orografia de uma área urbana de forma a criar o modelo digital de terreno urbano.

Na figura 1a, ilustra-se, de forma simplificada, o modelo digital de terreno circundante da área de estudo bem como os polígonos do edificado (figura 1b) e o mapa final do modelo digital de terreno urbano (figura 1c) da área de estudo.



**Figura 1.-** (a) Modelo Digital de terreno, (b) polígonos do edificado da área de estudo com cota, (c) mapa final do modelo digital de terreno urbano

O mapa final do modelo digital de terreno urbano é o mapa que será introduzido nos modelos numéricos OpenFoam e WaspEngineering os quais fornecerão estimativas espaciais do vento dominante na região de estudo e os resultados de ambos os modelos validados com recurso a dados experimentais provenientes de um mastro anemométrico instalado no topo de um edifício da cidade.

## 2.0 O VENTO NO AMBIENTE URBANO

A descrição e simulação do vento em ambiente urbano encontra-se presente em vários estudos científicos adiante citados embora muito poucos estejam relacionados com aplicações de energia eólica e avaliação do recurso energético do vento. O estudo mais recente (Li, Wang e Yuan, 2010a). Dedicar-se ao estudo de pequenos grupos de edifícios em áreas urbanas para a instalação de sistemas de energia em pequena escala. A falta de medições de dados de vento continua a ser referida na literatura, em particular no estudo mais recente supracitado sendo o uso de modelos CFD a fonte primordial para fornecer dados de vento simulados. No entanto, alguns

projetos de investigação mencionam casos de observação de campanhas experimentais em que a tecnologia SONAR (ultrassom) e a anemometria convencional de copos são utilizados para avaliar o vento nas 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 pela maioria dos autores, embora a dimensão das áreas a serem caracterizadas seja principalmente da ordem do décimo de metro, sendo a maior mencionada nos estudos à presente data de não mais de 2000 metros de extensão, o que limita a possibilidade de avaliar o vento em áreas maiores, como por exemplo, 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.

O fluxo de vento nas áreas urbanas é caracterizado pela presença de fortes efeitos tridimensionais e de separação do vento que ocorrem sobretudo na parte superior e nas bordas dos edifícios. O estudo supracitado, na sua maioria, concentra-se sobretudo na avaliação do comportamento do vento ao redor e acima da área urbana, mas impondo condições. Por exemplo, em vez de se estudar a malha urbana na sua plenitude, é habitual considerar a área de cidade como rugosidade equivalente tabulada para valores típicos de rugosidade de ambientes urbanos. Algumas considerações empíricas são ainda utilizadas, embora com suporte experimental, considerar uma redução da velocidade do vento (geralmente > 20%) na zona da cidade ou aumento do cisalhamento do vento (impondo um perfil vertical de vento) ou aplicar um desvio típico às linhas de corrente.

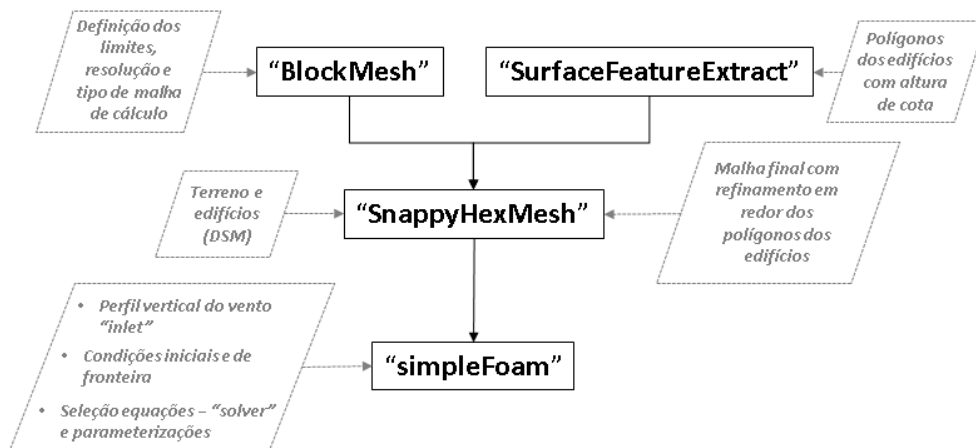
Da mesma forma, é possível constatar experimentalmente, se considerarmos o fluxo de vento sobre um edifício simples cúbico, vários efeitos podem ser relatados. O fluxo de vento sobre o edifício gera diferenças de pressão em torno do edifício e essas diferenças de pressão modulam o comportamento do vento 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*).

### 3.0 METODOLOGIA

Neste trabalho, e a fim de averiguar o vento numa zona da cidade de Torres Vedras ilustrada na figura 1, recorreu-se ao modelo numérico *freeware* CFD - OpenFoam e ao modelo comercial Não-CFD - WaspEngineering para se estudar o comportamento do vento na área urbana de Torres Vedras tendo como base o modelo digital de terreno urbano onde se incluiu o edificado existente. Através dos resultados numéricos obtidos de ambos os modelos foi possível extrair perfis verticais do vento e comparar pontualmente com os valores de observação obtidos através da campanha experimental de vento desenvolvida na cidade de Torres Vedras. Seguidamente apresentar-se-á a metodologia de cálculo e respetivas informações de *input* para cada um dos modelos.

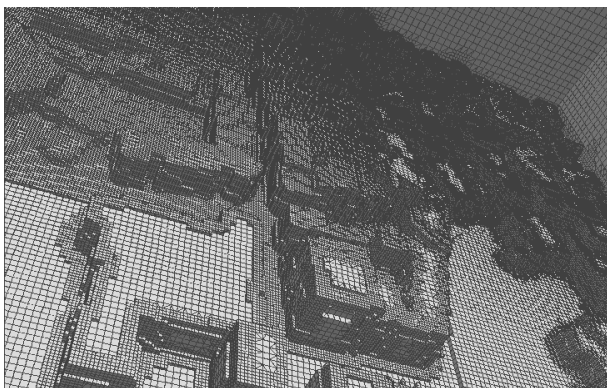
### 3.1 OPENFOAM

O modelo OpenFoam é um modelo CFD de base *freeware* e é composto por uma série de módulos numéricos que dominam o processamento da informação de entrada, a simulação numérica CFD e o pós-processamento de resultados. O modelo OpenFoam é capaz de resolver diversas gamas de problemas numéricos na sua forma transiente ou estacionária sobretudo os que estão relacionados com a dinâmica dos fluidos resolvendo as equações de *Navier-Stokes* acopladas a diversos modelos físicos como por exemplo, modelos de turbulência acoplados a modelos de solvers capazes de descrever a dinâmica dos processos envolvidos no problema numérico a estudar. No caso de estudo de vento, foram utilizados quatro módulos, nomeadamente os módulos *BlockMesh*, *SurfaceFeatureExtract*, *SnappyHexMesh* e *simpleFoam*. Na figura 2 ilustra-se de forma esquemática os respetivos módulos e sua ordem de execução bem como os tipos de informações necessárias de pré-processamento de base à execução de cada módulo.

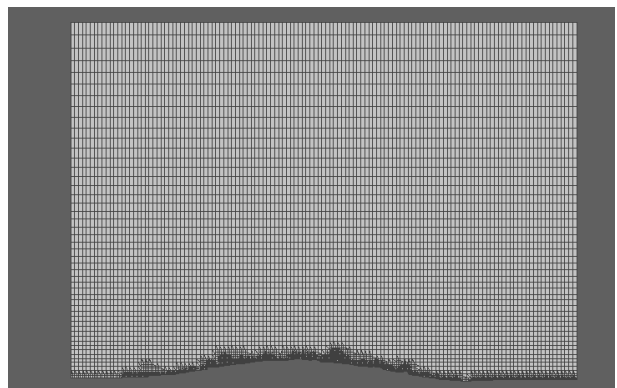


**Figura 2.-** Metodologia de execução usada na execução do modelo CFD OpenFoam

No módulo *BlockMesh* define-se a malha tridimensional geral nomeadamente, a sua extensão horizontal e vertical e respetiva resolução de cálculo bem como decidir o tipo de malha - estruturada ou não estruturada. É ainda possível definir ajustes na resolução horizontal e vertical da malha de forma a que a malha fique mais concentrada por exemplo, perto da superfície terrestre e menor resolução longe da superfície terrestre. O módulo *SurfaceFeatureExtract* é um módulo de utilização adicional, não obrigatório, mas que foi utilizado para o caso de estudo. Este módulo lê os polígonos dos edifícios já com cota atribuída em diferentes formatos, no caso do estudo, os polígonos dos edifícios estavam transformados no formato STL e adapta a malha geral à forma dos polígonos dos edifícios. O módulo *SnappyHexMesh* é o módulo responsável pela leitura do modelo digital de terreno urbano em formato STL (ou OBJ) e definição do refinamento da malha em torno dos edifícios. Nas figuras 3a e 3b ilustra-se um extrato da malha computacional obtido através deste módulo.



(a)



(b)

**Figura 3.-** (a) Malha computacional 3x3m e refinamento a 1x1m em torno dos edifícios, (b) Malha vertical com *vertical stretching* – junto da superfície 0.5x0.5m e no topo 10x10m de resolução vertical.

É de referir que no presente caso de estudo optou-se por gerar no módulo *BlockMesh* uma malha estruturada com espaçamento horizontal de 3x3m (figura 3a) com topo a 300m de altitude sendo que, em torno dos edifícios, o refinamento é de 1x1m feito com o módulo *SnappyHexMesh* e na figura 3b o refinamento vertical da malha, definido com o módulo *BlockMesh* onde junto da superfície terrestre a resolução nativa da malha é de 0.5x0.5m junto do topo a resolução desce para 10x10m. Na tabela 1 apresenta-se o conjunto de informações impostas aos módulos *BlockMesh* e *SnappyHexMesh* para a execução do caso de estudo de Torres Vedras tomadas em conta. Note-se que, como resultado final destes módulos, a malha originada pelos dois módulos representa muito bem a área urbana da cidade e o respetivo terreno.

**Tabela 1.-** Opções impostas e informações relativas dos módulos *BlockMesh* e *SnappyHexMesh* consideradas no caso de estudo

Módulo	Opções Impostas /Informações
<i>BlockMesh</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Domínio 3D 3x3m (<i>simplegrading</i>);</li> <li>• Topo do domínio: 300m;</li> <li>• Resolução vertical: (<i>stretching</i>) 0.5x0.5m junto do solo e 10x10m 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);</li> <li>• Refinamento sobre os edifícios: 1x1m;</li> <li>• Opções tomadas para o Refinamento: <i>castellated mesh; snapping; refinement over searchable boxes - buildings</i></li> <li>• Nr. Total de pontos da malha: 2 739 271</li> <li>• Nr. Total de faces: 7 379 525</li> <li>• Nr. Total de células: 2 232 205</li> </ul>

O módulo *simpleFoam* é o módulo de execução do modelo OpenFoam em modo estacionário onde se definem as condições iniciais e de fronteira do caso de estudo bem como os tipos de solvers e respetivas parameterizações associadas a adicionar às equações de *Navier-Stokes*. A simulação em modo estacionário torna-se mais vantajosa para o caso de estudo do vento e do recurso eólico uma vez que se pretende averiguar a distribuição espacial média do recurso eólico o que dispensa a sua evolução no decurso do tempo. O módulo *simpleFoam* é ainda capaz de calcular grandezas de cálculo de pós-processamento como é o caso da magnitude do vento uma vez que, por definição, o modelo apenas processa as componentes horizontais e verticais do vento de forma independente. Na tabela 2 apresenta-se o conjunto de informações impostas ao modelo (*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 Torres Vedras e pela rugosidade total da região.

### 3.2 WASPENGINEERING

O modelo WaspEngineering é um modelo Não-CFD comercial tipo “caixa negra” e é o modelo padrão utilizado no sector da indústria eólica para avaliação do vento e do recurso eólico em terrenos complexos e planeamento de parques eólicos. Este modelo não é composto por módulos e apenas é 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 foram os mesmos considerados no modelo OpenFoam (Tabela 2 – *Inlet*). Na figura 4 ilustra-se de forma esquemática 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></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• OpenFoam (Versão V16.12+ lançada a 23/12/2016);</li> <li>• Solução: modo estacionário;</li> <li>• Convergência (precisão): 1e-4;</li> <li>• Passo de tempo: 1s;</li> <li>• Nr. Máximo de passos de tempo: 5000s</li> <li>• Tempo de convergência da solução verificado: 2480s;</li> </ul> <p><b>Parameterizações:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo de turbulência: k-ε;</li> <li>• Gravidade (aceleração): -9.81m/s;</li> <li>• Rugosidade dos Edifícios: tipo <i>non slip wall function depending of k and ε</i></li> </ul> <p><b>Solvers:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressão: GAMS;</li> <li>• Velocidade, k, ε, e(energia): <i>smoothSolver with symGaussSaidel</i>;</li> </ul> <p><b>Condições Iniciais e de Fronteira:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>k \sim 1.5 \times (I \times U)^2</math>; <ul style="list-style-type: none"> <li>○ I=intensidade de turbulência 0.15;</li> <li>○ U=5m/s;</li> </ul> </li> <li>• <math>\epsilon \sim (c\mu^{0.75} \times k^{1.5})/L</math>; <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>c\mu</math>=const.=0.09;</li> <li>○ L=0.09;</li> </ul> </li> </ul> <p><b>Inlet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Boundary Layer with Inlet Velocity Profile</i>; <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>U_{ref}</math>=4.5m/s;</li> <li>○ <math>Z_{ref}</math>=80m;</li> <li>○ <math>Z_0</math>=uniform=0.75 (<i>dense occupation</i>);</li> <li>○ <math>Z_{ground}</math>=0;</li> <li>○ <i>Flow Direction</i>: Norte</li> </ul> </li> </ul> <p><b>Outlet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressão e Velocidade: <i>free condition</i></li> </ul> <p><b>Internal Field:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade=3m/s;</li> <li>• Direção do escoamento; Norte</li> </ul> <p><b>Pos-Processamento:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Magnitude do vento.</li> <li>• Perfil de vento simulado para cada ponto da malha</li> </ul>

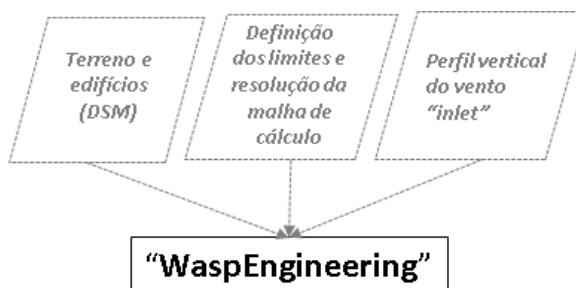
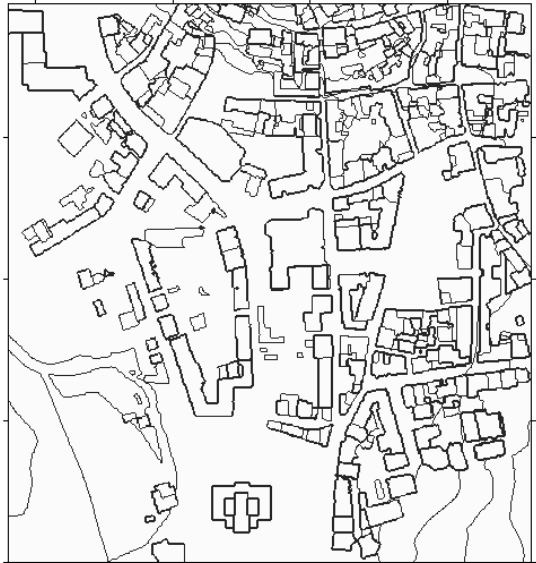


Figura 4.- Metodologia e condições iniciais de entrada para o modelo WaspEngineering

O modelo WaspEngineering tem uma interface *user-friendly* onde o utilizador dispõe de poucas opções para a execução das estimativas de cálculo. Apenas é permitido ao utilizador introduzir o ficheiro do modelo digital de terreno urbano (Figura 1c) convertido para formato DXF ou formato MAP (formato preferencial) e

definir a resolução da malha horizontal e vertical e definir o perfil vertical do vento. Através desta informação o modelo faz as estimativas de vento e do recurso eólico apenas em planos horizontais do tipo XY a diversas cotas e permite exportar os resultados em formato matricial ou em formato XYZ. O modelo WaspEngineering é um modelo que só resolve casos estacionários através de um solver denominado LINCOM (Astrup, 1999) desenvolvido especificamente para este modelo. De uma forma resumida este solver não é um solver iterativo nem um solver 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 apresenta-se as informações de entrada ao 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 convertido para formato DXF e que serviu de condição de entrada para o modelo WaspEngineering.

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

Módulo	Opções Impostas /Informações	Mapa DXF – Modelo digital terreno urbano
WaspEngineering	<p><b>Características:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>WaspEngineering V2.0 (lançado em 2005);</li> </ul> <p><b>Condições Iniciais:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Leitura do modelo digital de terreno urbano;</li> <li>Malha regular adaptada ao modelo digital de terreno urbano;</li> <li>Topo do domínio: 300m;</li> <li>Resolução horizontal e vertical: 1x1m;</li> <li>Rugosidade <math>Z_0 = 1\text{m}</math> (<i>dense occupation</i>);</li> </ul> <p><b>Tipo de Lei de Parede:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Non slip wall function</i> (<i>constant.value=0.03</i>);</li> </ul> <p><b>Inlet:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Perfil Vertical do Vento <ul style="list-style-type: none"> <li><math>U_{ref}=4.5\text{m/s}</math>;</li> <li><math>Z_{ref}=80\text{m}</math>;</li> <li><math>Z_0=\text{uniform}=0.75</math> (<i>dense occupation</i>);</li> <li><math>Z_{ground}=0</math>;</li> <li><i>Flow Direction: Norte</i></li> </ul> </li> </ul> <p><b>Pos-Processamento:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Magnitude do vento em planos XY para determinado Z</li> <li>Perfil de vento simulado para cada ponto da malha.</li> </ul>	<p>Ilustração do mapa digital de terreno urbano convertido para DXF e que serviu de condição de entrada para o modelo WaspEngineering:</p> 

#### 4.0 CAMPANHA EXPERIMENTAL DE DADOS DE VENTO EM TORRES VEDRAS

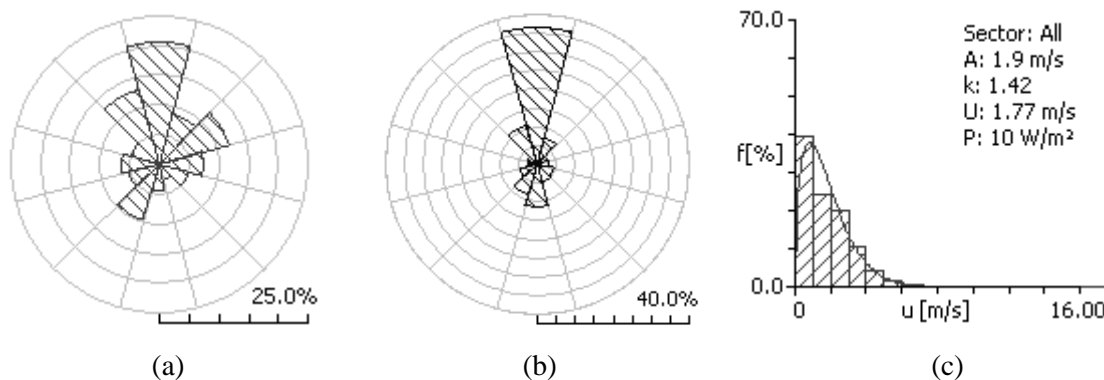
Para posterior validação e aferição dos resultados obtidos por ambos os modelos, foi instalada no final de 2009 uma torre anemométrica no topo de um edifício da Câmara Municipal de Torres Vedras (Figura 5) situado na Zona Histórica da Cidade. A Câmara Municipal de Torres Vedras disponibilizou o modelo digital de terreno da zona circundante bem como os polígonos do edificado da área com respetiva altitude. O Edifício da Câmara Municipal tem 8m de altura e está situado cerca de 22 m acima do nível médio do mar (cota do terreno). A torre anemométrica (código IN225) foi equipada com um sensor de vento e catavento a 3.5 m acima do nível do

telhado do edifício (33.5 metros acima do nível médio do mar contendo ainda um piranómetro instalado a 1m acima do nível do telhado para medição da radiação solar



**Figura 5.** (a) Localização da estação anemométrica no Centro histórico da cidade de Torres Vedras, (b) visualização do sistema de medição do vento

O sistema de medição de vento operou continuamente até ao final de 2011 tendo sido obtido dois anos de dados de vento completos e válidos registados a cada 10min de intervalo. Na figura 6 e tabela 4 apresentam-se as principais estatísticas de vento obtidas dos dados recolhidos entre 2009 e 2011.



**Figura 6.** (a) Rosa de Ventos, (b) Rosa de Potências, (c) Distribuição de Weibull

**Tabela 4.-** Estatísticas de vento observadas no local de estudo

Estação	Coordenadas (ETRS89 m)	Estatísticas do Vento
IN255	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitude (m): -97580</li> <li>• Latitude (m): -63260</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade média = 1.8m/s;</li> <li>• Fluxo de Potência Incidente = 10 W/m<sup>2</sup>;</li> <li>• Parâmetro A da Distribuição de Weibull = 1.9 m/s</li> <li>• Parâmetro k da Distribuição de Weibull = 1.4 (adim.)</li> </ul>

De uma forma geral e de acordo com os resultados obtidos das estatísticas de vento, o local de estudo afigura-se pouco apropriado para o aproveitamento eólico em torno do edifício, não obstante poder haver edifícios nas zonas circundantes que contenham um potencial eólico e vento mais adequado. É ainda de salientar que o regime de ventos obtido pela rosa de ventos ilustra o sector Norte como dominante, mas é a rosa de

Potências que permite conformar qual ou quais os sectores energéticos mais importantes para os casos de estudo de simulação numérica para o aproveitamento eólico sendo que no caso obtido o sector Norte é o que se torna mais relevante e por isso o único a merecer ser simulado pelos modelos numéricos.

## 5.0 RESULTADOS SIMULADOS

Relativamente aos dados observados foi possível constatar que o sector Norte é o setor de vento mais dominante e também o mais relevante face aos restantes para fins de aproveitamento eólico na região histórica de Torres Vedras. Desta forma, e como condição inicial de cálculo foi imposto aos modelos numéricos apenas simular o campo da velocidade oriundo da direção Norte, não obstante, ser possível simular mais outro sector ou mesmo simular todos os sectores para produzir, futuramente, um Atlas de Vento e do Potencial Eólico da região em estudo.

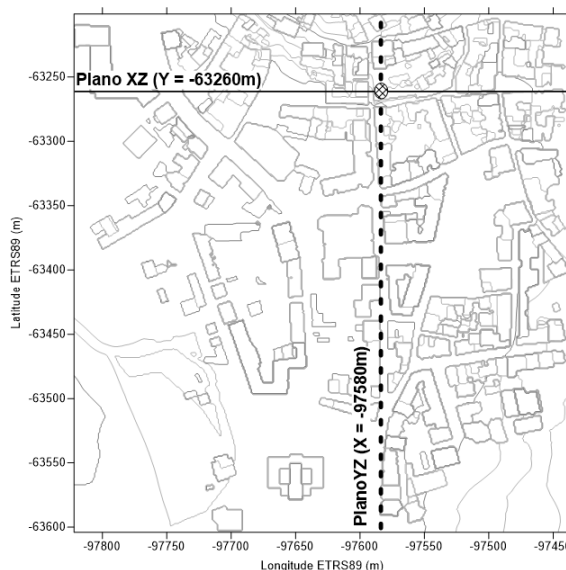
Por forma a averiguar o perfil vertical do vento, e tendo em conta que o tipo de rugosidade local é de cidade com edifícios de altura média, o que implica um valor típico de rugosidade local ( $z_0$ ) aproximadamente igual a 0.75 e utilizando a lei logarítmica do perfil vertical do vento (eq. 1) sabendo que  $v_1 = 1.81\text{m/s}$ ;  $z_1 = 3.5\text{m}$  e admitindo que o valor de  $d$  (*displacement height*) é nulo, é possível estimar o valor da velocidade ( $v_2$ ) para 80m ( $z_2$ ) obtém-se aproximadamente  $v_2 = 5.0\text{ m/s}$ , pelo que se torna assim possível de obter um perfil vertical típico imposto como condição inicial (*Inlet*) aos modelos numéricos.

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

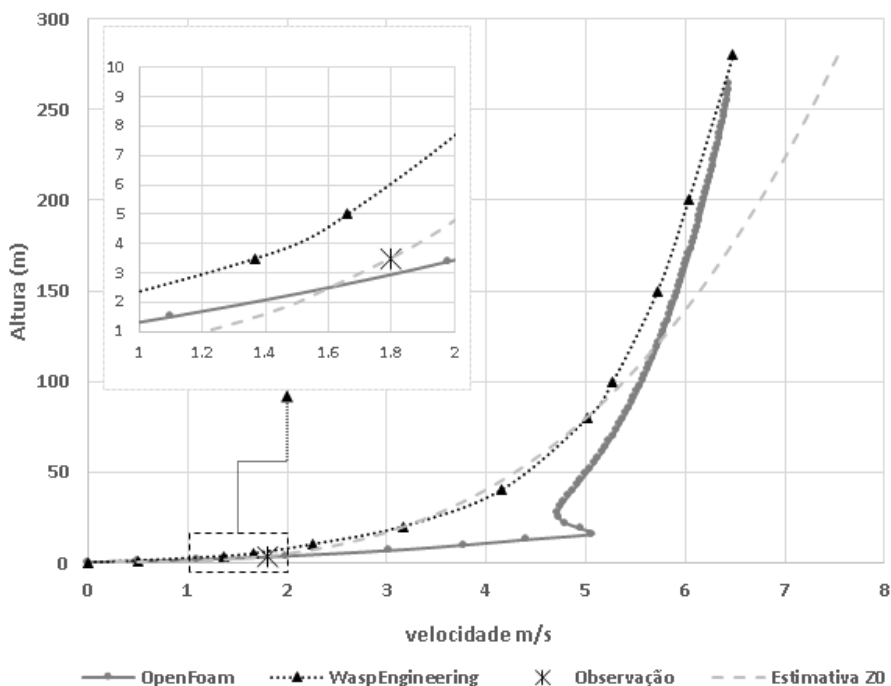
As condições de integração de ambos os modelos numéricos estão explícitas no capítulo da metodologia nomeadamente nos subcapítulos 3.1 e 3.2 para o Openfoam e WaspEngineering respetivamente.

## 5.1 COMPARAÇÃO PERFIS VERTICAIS DA VELOCIDADE DE VENTO

Na figura 7 identifica-se sob a maquete dos edifícios o edifício da Câmara Municipal de Torres Vedras para o qual foi processado dos resultados simulados dos modelos numéricos os perfis verticais do vento (figura 8) para o setor Norte



**Figura 7.** Localização do edifício da Câmara Municipal de Torres Vedras (círculo delineado) e planos XZ e YZ respetivos para os quais se processaram os campos da intensidade média do vento do OpenFoam



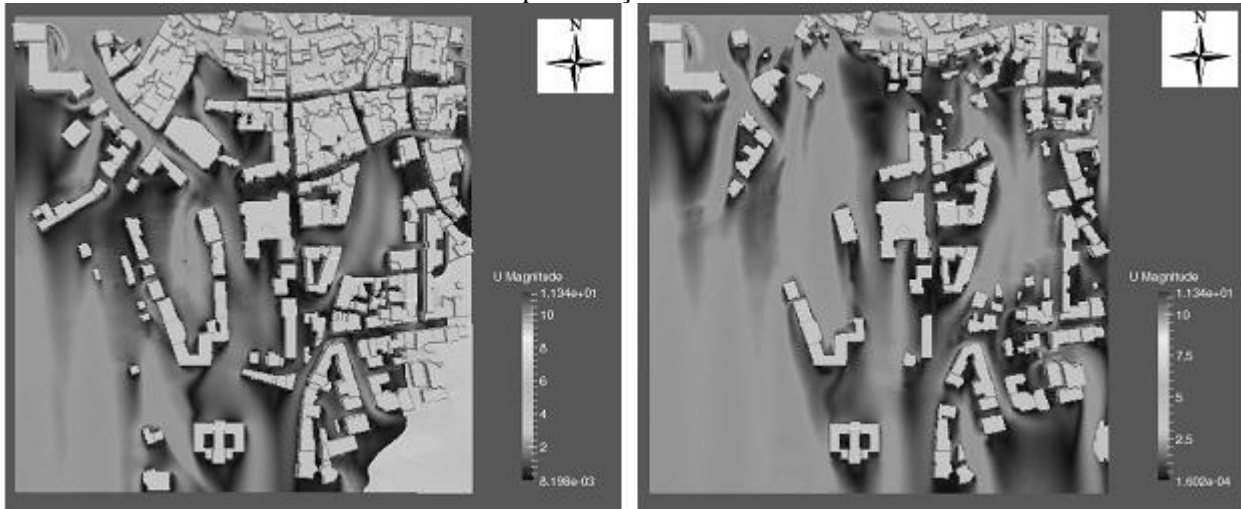
**Figura 8.** Perfis verticais do vento simulados e estimado pela lei logarítmica do vento  $z_0$  (condição inicial *Inlet* para os modelos numéricos) e valor da velocidade média observado. Sector Norte.

Da figura 8 é possível observar que ambos os modelos OpenFoam e WaspEngineering conseguem reproduzir um perfil vertical de vento da região em estudo sobretudo para as alturas superiores a 100m muito embora o perfil obtido pelo modelo OpenFoam (abaixo dessa altura) é muito mais realista e correto para cidade uma vez que este modelo caracteriza muito melhor a turbulência e o efeito dos edifícios no escoamento atmosférico face ao modelo WaspEngineering. É ainda de referir que o perfil estimado pela lei logarítmica do vento representa apenas uma aproximação do perfil de velocidades não perturbado pela presença dos edifícios e que, de certa forma, nos níveis abaixo dos 100m se aproxima muito do perfil estimado pelo WaspEngineering confirmando que este modelo produz perfis verticais pouco realistas para a região em estudo e dessa forma, este modelo não reproduz fielmente as perturbações dos edifícios no campo do vento. Do ponto de vista de comparação do valor da velocidade de vento da observação com os valores dos perfis de vento dos modelos contacta-se que o perfil simulado pelo OpenFoam é mais aproximado da observação do que o WaspEngineering uma vez que a velocidade de vento observada a 3.5m foi de 1.81m/s enquanto as velocidades médias de vento estimadas pelos modelos, para a mesma altura, foram de 1.98m/s e 1.37m/s para os modelos OpenFoam e WaspEngineering respetivamente.

## 5.2 COMPARAÇÃO PLANOS HORIZONTAIS DA VELOCIDADE DE VENTO

Nas figuras 9 e 10 ilustram-se os resultados simulados obtidos respetivamente para o modelo OpenFoam e WaspEngineering os planos horizontais da velocidade à altura da cota do anemómetro acima do nível do médio do mar a 30m e 35m englobando a cota do anemómetro. 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 intensidade média do vento para cidade muito embora forneça uma estimativa alargada/média para a área de estudo. Nas figuras 11 e 12 ilustram-se ainda os resultados da intensidade média do vento em toda a camada limite atmosférica (até aos 300m – topo da malha) projetados em dois planos verticais tipo XZ e YZ cuja localização dos mesmos se encontram delineados na figura 7. Estes planos foram apenas obtidos com o modelo OpenFoam uma vez que com o modelo WaspEngineering não é possível de se planos verticais. 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

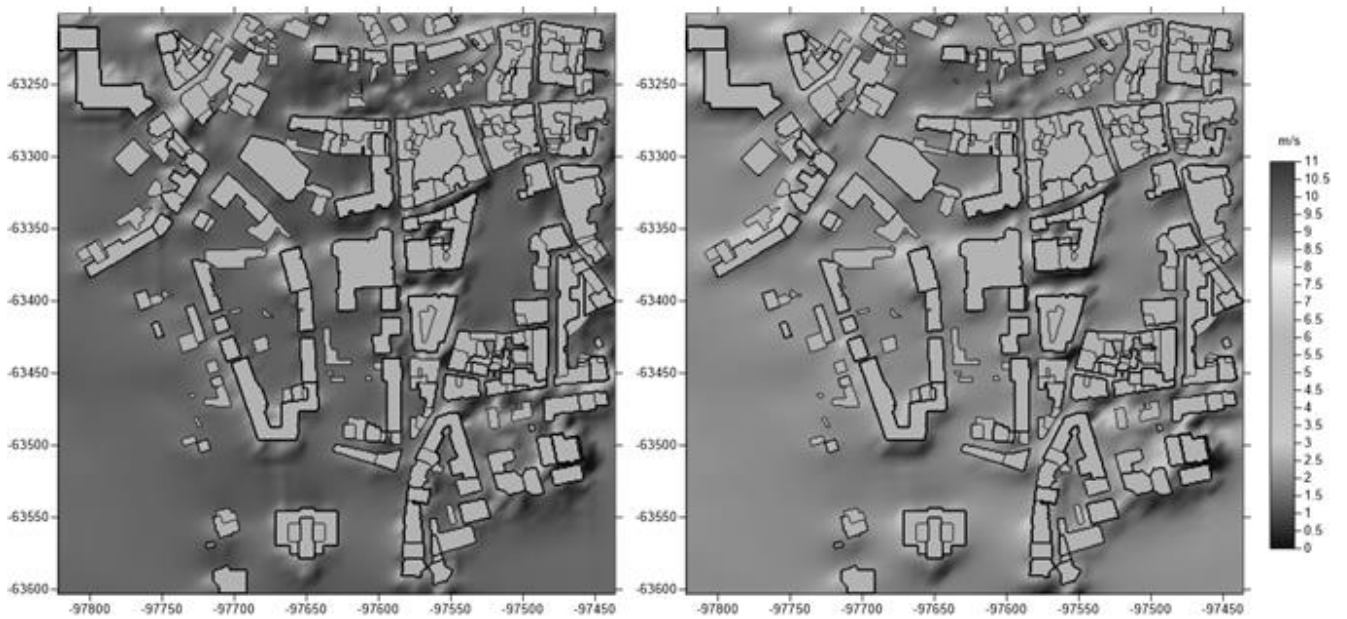
fielmente o efeito tridimensional das perturbações dos edifícios no escoamento atmosférico.



(a)

(b)

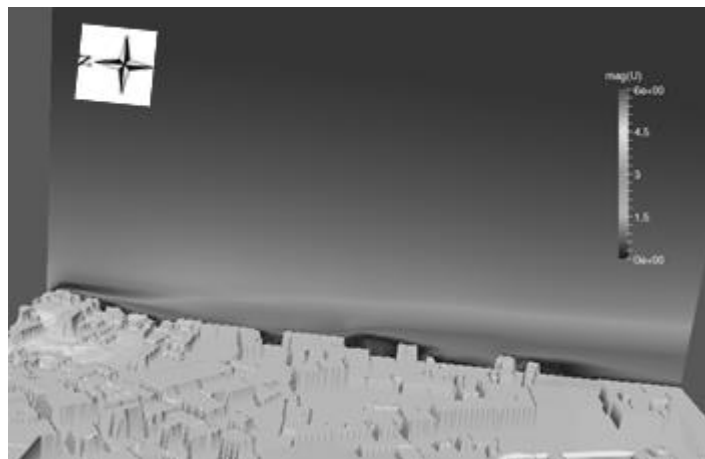
**Figura 8.** Perfis horizontais do vento obtidos pelo OpenFoam (a)  $h=30m$  e (b)  $h=35m$  onde  $h = \text{terreno} + \text{altura dos edifícios}$



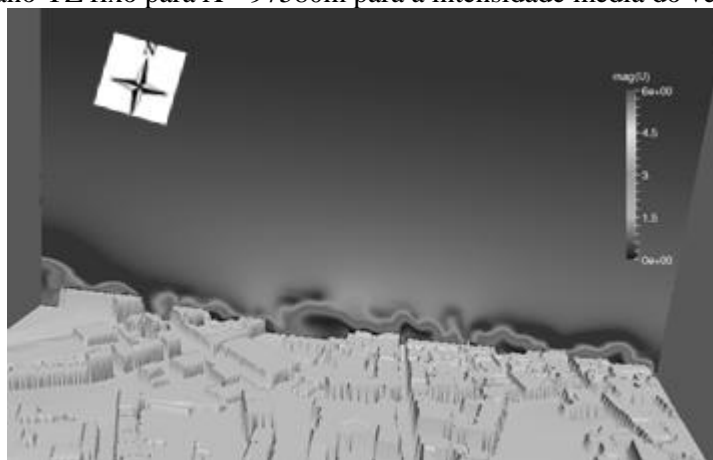
(a)

(b)

**Figura 9.** Perfis horizontais do vento obtidos pelo WaspEngineering (a)  $h=30m$  e (b)  $h=35m$  onde  $h = \text{terreno} + \text{altura dos edifícios}$



**Figura 10.** Plano YZ fixo para  $X=-97580\text{m}$  para a intensidade média do vento, OpenFoam



**Figura 11.** Plano XZ fixo para  $X=-63260\text{m}$  para a intensidade média do vento, OpenFoam

## 6.0 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho constituem-se de carácter preliminar e pretendiam averiguar o escoamento do vento numa parte das zonas edificadas do centro histórico da cidade de Torres Vedras para fins de avaliação do potencial eólico. As observações de vento mostraram que o escoamento na região de estudo é proveniente de Norte e a rosa de potências evidencia este sector como sector primordial para estudos do escoamento atmosférico oriundo de Norte. Foi ainda testada uma metodologia desenvolvida para a representação da malha urbana 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 vertical de vento simulado pelo modelo OpenFoam foi muito mais realista e correto para cidade uma vez que este modelo consegue caracterizar mais fielmente a turbulência e o efeito dos edifícios na perturbação do escoamento atmosférico face ao simulado pelo modelo WaspEngineering. A velocidade obtida do perfil vertical de vento simulado pelo OpenFoam para a altura do sensor de medida do vento é mais aproximada da observação face ao perfil simulado pelo WaspEngineering. Verificou-se que o modelo WaspEngineering simulou um perfil vertical de vento mais aproximado de um perfil de estimativa médio para a área de estudo e que mostra que este modelo não consegue reproduzir de forma fiel as perturbações dos edifícios no campo do vento. Do ponto de vista do recurso eólico verificou-se que o local e estudo possui poucas condições para o aproveitamento eólico sendo que, novas localizações estão sendo estudadas e simuladas de forma a identificar potenciais locais para o aproveitamento energético do vento na cidade.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Câmara Municipal da Cidade de Torres Vedras a instalação do mastro anemométrico no topo do edifício da Câmara Municipal bem como o fornecimento do modelo digital do terreno em elevada resolução espacial e os polígonos do edificado com a altura dos mesmos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 Commission - 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 1998
-