Caracterização do Vento Urbano com Recurso a modelos CFD e não-CFD. Aplicação a uma Cidade Portuguesa

P. Costa, T. Simões, A. Estanqueiro

LNEG

Organiza:

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE ECONOMÍA, INDUSTRIA Y COMPETITIVIDAD · Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Universidad Pontificia Bolivariana

Jornadas REGEDIS 2019
19-20 Noviembre 2019
Medellín (Colombia)

Motivação e Objetivos

Motivação:

- **A caracterização do vento urbano em áreas alargadas é possível de ser realizada através de software apropriado CFD de modelação numérica:**
  - ***WindSim*; *Meteodyn* (*UrbaWind*) – *software* comercial – dispendioso e muitas vezes limitativo quando utilizado com licenças académicas;**
    - **Vantagens – *User Friendly* na maioria dos casos;**
  - ***OpenFoam* – solver CFD *freeware*;**
    - **Desvantagens – muito pouco *User Friendly* na maioria dos casos;**
- **Há modelos utilizados pela Indústria Eólica de natureza Não-CFD para a caracterização do vento em terrenos complexos com obstáculos circundantes;**
  - ***WaspEngineering* – *software* comercial – pouco dispendioso e com capacidades bastante limitativas do estudo de vento no edificado urbano;**
    - **Vantagens – *User Friendly* na maioria dos casos;**

Motivação e Objetivos

- ***Motivação:***

  - Desenvolvimento de uma metodologia de acoplamento de:
    Modelo Digital de Terreno & Edificado urbano – "MDT-U"

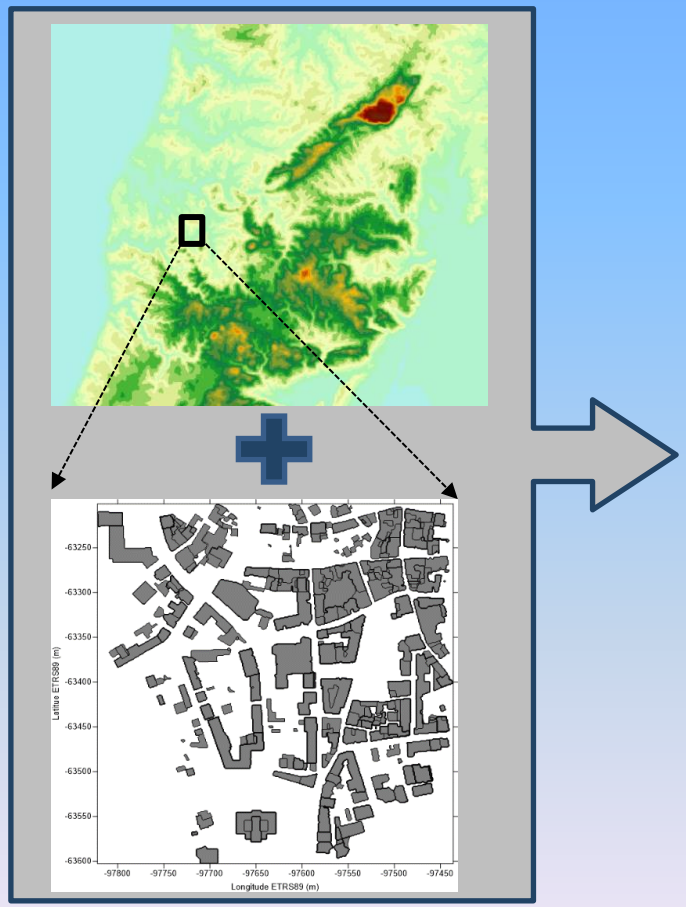
    - Será que esta metodologia é adequada para software CFD – freeware?

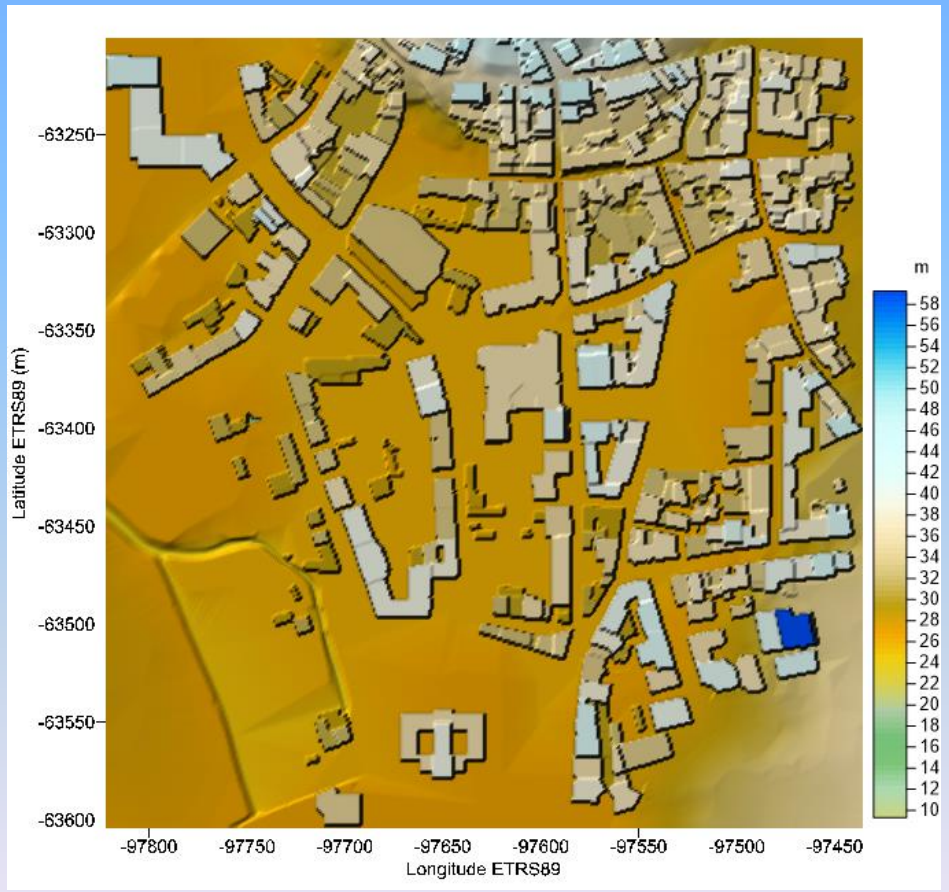
- ***Objetivos:***

  - Caracterizar o vento na zona histórica da Cidade De Torres Vedras;
  - Utilização da metodologia de acoplamento (MDT-U) no modelo CFD – OpenFoam e no modelo Não-CFD – WaspEngineering para comparação de resultados;

Metodologia MDT-U

Modelo Digital de Terreno Urbano (MDT-U) – Base para a avaliação do recurso do vento e do potencial eólico

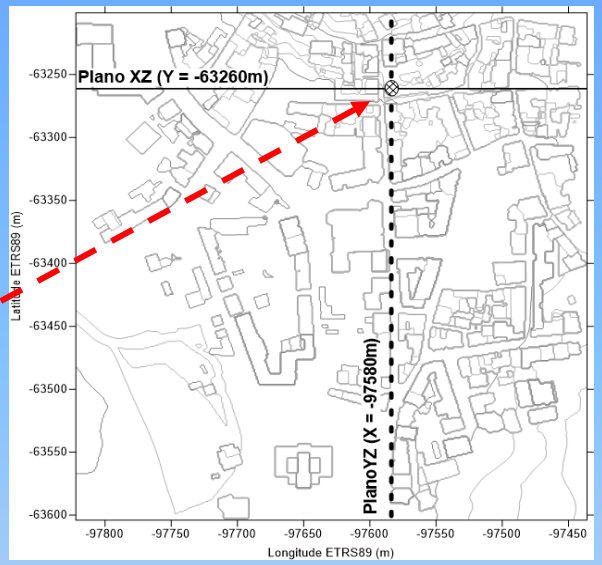




Organiza:

Campanha Experimental – Torres Vedras

- No edifício da Câmara Municipal de Torres Vedras (zona histórica);
- Dados de vento (10 em 10min.) de 2009 a 2011;
- Altura do edifício (até telhado): 8m
- Altura dos sensores de vento na torre (acima do telhado): 3.5m
- Altitude acima do nível médio do mar dos sensores de vento: 33.5m)



- Um Anemómetro de copos e um catavento (h=3.5m)
- Um Piranómetro (h = 1mm)

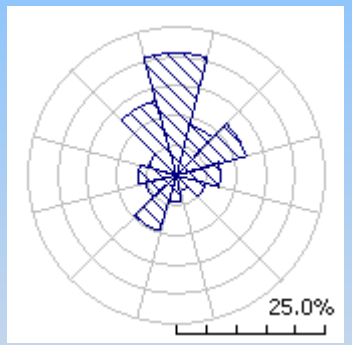
Organiza:

Jornadas REGEDIS 2019
19-20 Noviembre 2019
Medellín (Colombia)

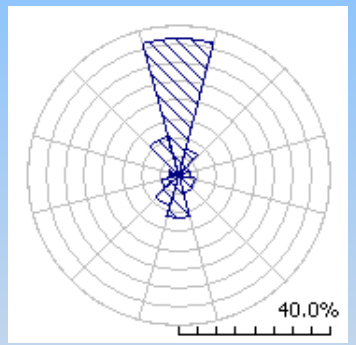
Campanha Experimental – Torres Vedras

Estação	Coordenadas (ETRS89 m)	Estatísticas do Vento
IN255	• Longitude (m): -97580 • Latitude (m): -63260	• Velocidade média = 1.77 m/s; • Velocidade média (Sector Norte) = 1.81 m/s • Fluxo de Potência Incidente = 10 W/m²; • Parâmetro A da Distribuição de Weibull = 1.9 m/s • Parâmetro k da Distribuição de Weibull = 1.4 (adim.)

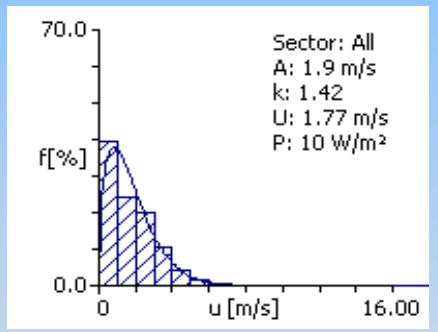
Rosa de Ventos



Rosa de Potências



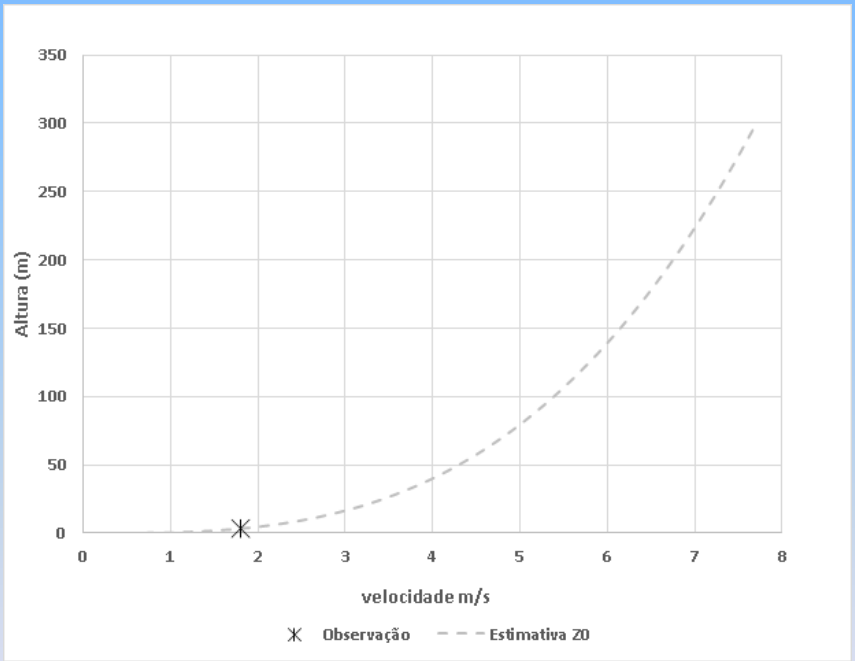
Distribuição de Weibull



- **Setor Norte** – o dominante na rosa de Ventos e sobretudo na Rosa de Potências – setor mais energético, logo, **o único setor a merecer ser simulado pelos modelos numéricos**
- **O local de estudo é pouco apropriado para o aproveitamento eólico não obstante poder haver edifícios nas zonas circundantes que contenham um potencial eólico e vento mais adequado**

Campanha Experimental – Torres Vedras

- **Estatísticas de vento e do recurso Eólico:**
  - **Apesar de a campanha experimental ter sido feita para um único nível de medição, é possível estimar o vento a outra altura de medição (aprox.) com base na Lei Logarítmica do vento (Lei da camada limite):**



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

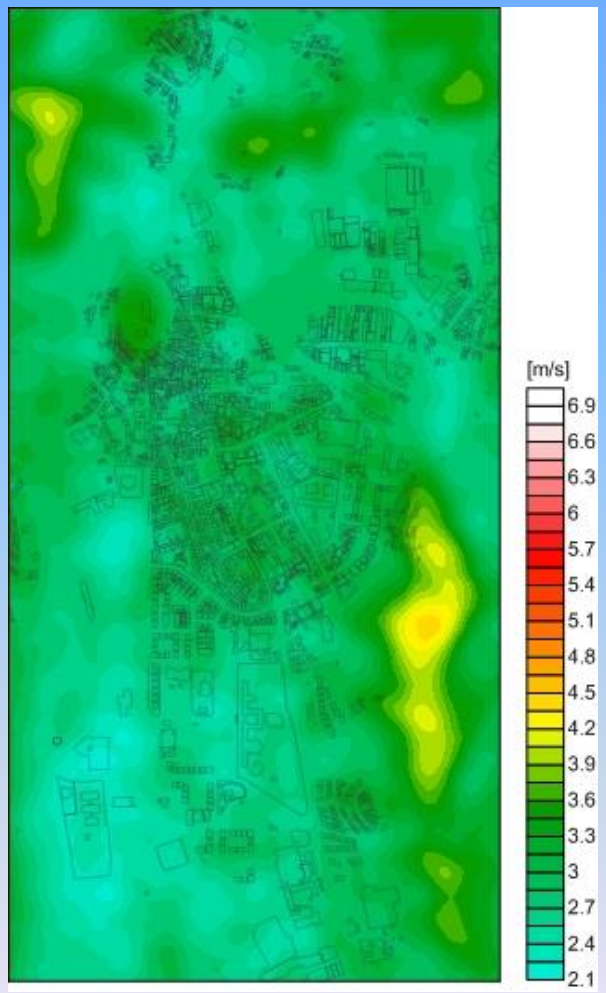
Onde:
- $z1$ = 3.5m;
- d=0m (*displacement height*);
- Z_0 =0.75m (rugosidade: ocupação densa);
- v_1 = 1.81 m/s (setor Norte);

Para h=80m;
- $z2$ = 80m;
- **v_2 = 5.01 m/s (Setor Norte);**

- **O perfil de vento assim obtido (sem perturbação dos edifícios) é Imposto como condição inicial aos modelos numéricos.**

Organiza:

Modelo CDF - WindSim – software comercial



Exemplo de um resultado obtido com o modelo comercial *WindSim:*

- **Grandeza representada*:***
  Intensidade média do vento a 10m de altura (acima do nível médio dos telhados)
- ***Plano XY (Z Constante h=10m)***
- ***Resolução espacial 5X5m;***
- **Local:**
  Zona Histórica da Cidade de Torres Vedras -
- **Valor simulado:**
  no local medição (h=10m) = 2.7 m/s
- **Valor observado (h=3m) = 1.77 m/s**

Modelo CDF - OpenFoam

Modelo: OpenFoam Versão 16.12+ (lançada em 23/12/2016)

Informação e Estatísticas da Malha:

a) Malha Mãe (3D *bounding box*) 3x3m regular;
b) refinamento sobre os edifícios: resolução 1x1m;
c) Altura Imposta para o topo da malha h=300m;
c) Desfasamento vertical da Malha (*vertical stretching*):
(dz ~ 0.5m – à superfície e dz ~ 10m – topo da malha);
d) Nr. Total de pontos da malha: 2 739 271
e) Nr. Total de faces da malha: 7 379 525
f) Nr. Total de células da malha: 2 323 205

Gerador da Malha no OpenFoam:

g) *BlockMesh* (gera a malha mãe);
h) *SnappyHexMesh* (agrega MDT-U em formato ".stl" ou ".obj"
h1) ativado: *Castellated Mesh Type*
h2) ativado: *snapping*
h3) ativado: *refinement* (*over searchable boxes* - edifícios)

Modelo CDF - OpenFoam

Terreno e Edifícios

Originalmente processado em formato .STL mas convertido para formato .OBJ

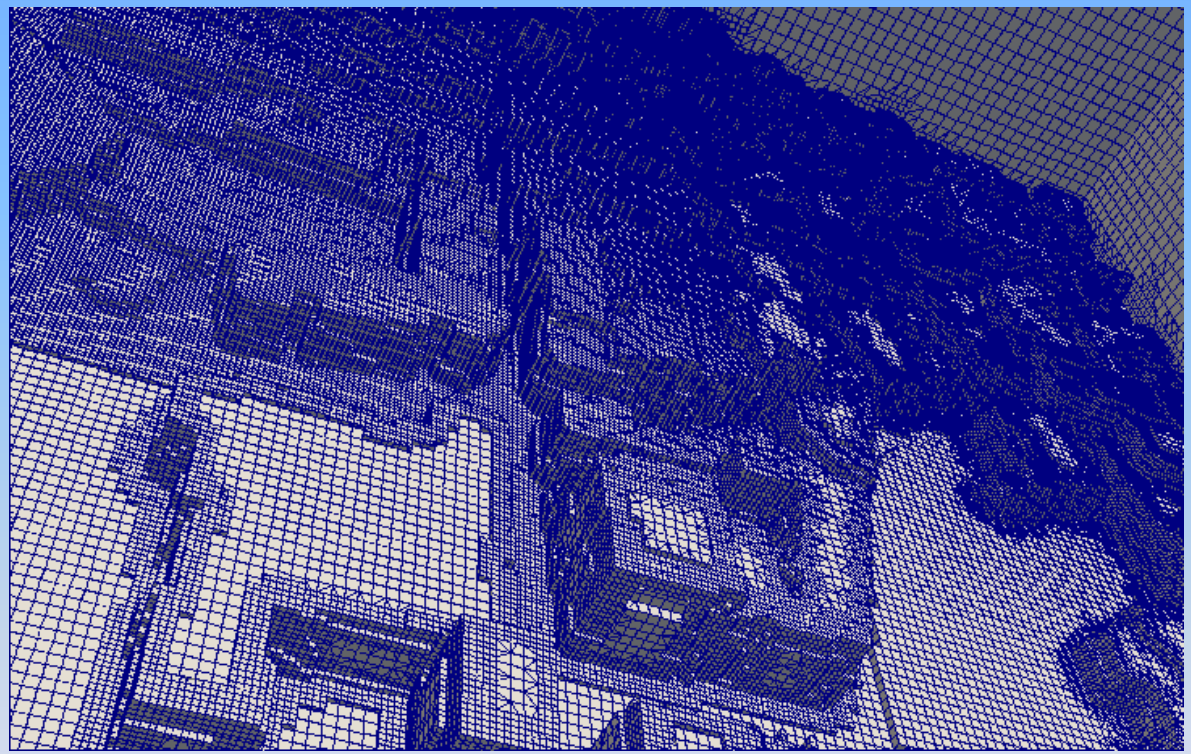
Resolução Espacial: 1x1m

A metodologia MDT-U permite criar uma zona de cidade bastante bem caracterizada em termos da morfologia do terreno com a preservação fiel da forma e altura dos edifícios.

Malha CDF - OpenFoam

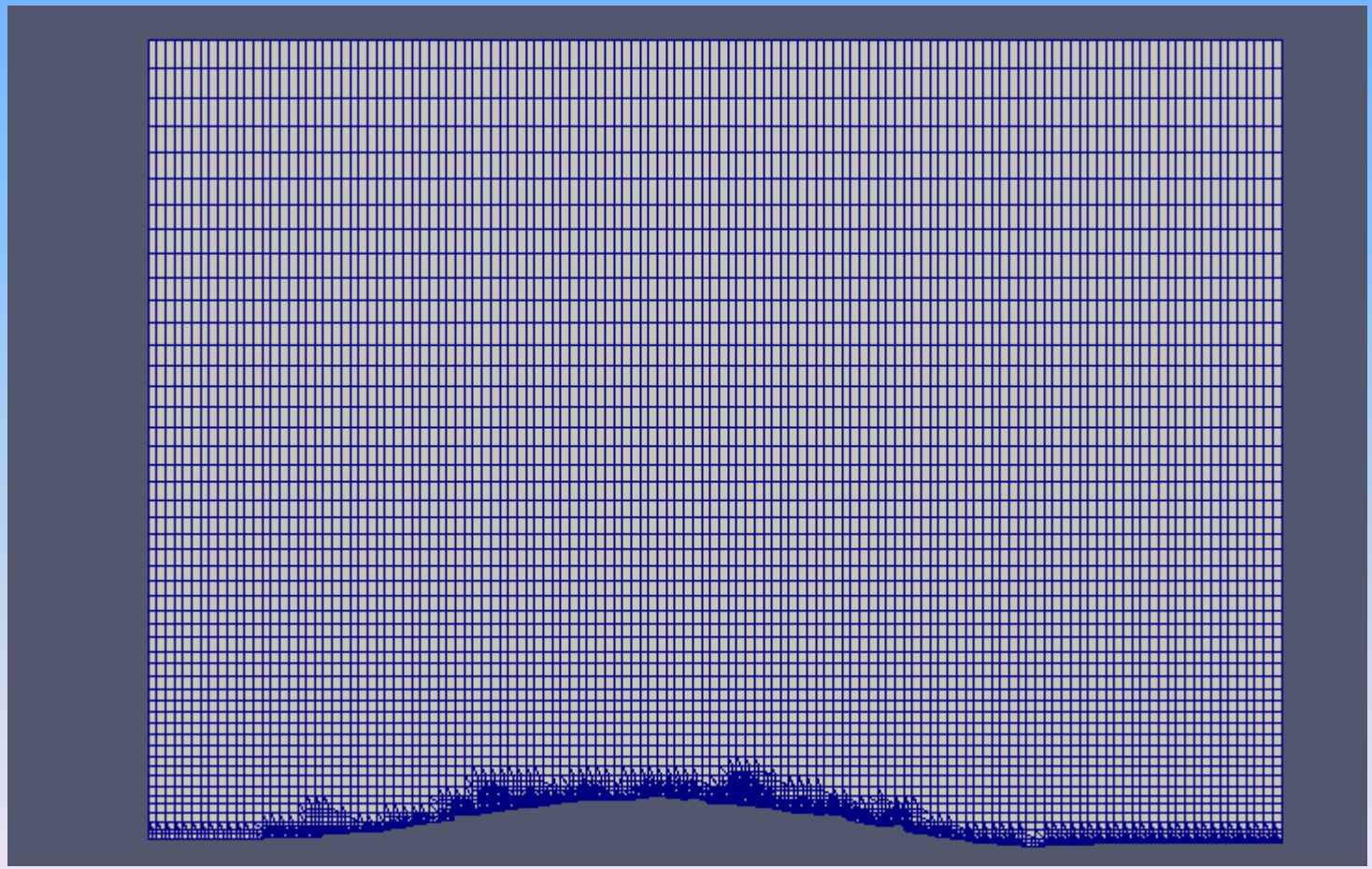
Malha gerada pelo OpenFoam - CFD:

- **Áreas sem edificado: resolução espacial de 3x3m;**
- **Sobre e em redor dos edifícios: resolução espacial de 1x1m.**



Malha CDF - OpenFoam

Malha Vertical: variação vertical na resolução da malha (*vertical stretching*): dZ ~ 0.5m (superfície) e dZ = 10m no topo (h=300m)



Modelo CDF - OpenFoam

Modelo OpenFoam Versão 16.12+ (lançada a 23/12/2016)

Configuração do modelo e seleção das parameterizações e dos solvers:

a) simulação em caso estacionário: *simpleFoam*;
b) convergência da solução: 1e-4 (precisão de cálculo);
e) tempo total imposto para simulação: 5000s
f) tempo de convergência total da simulação: 2480s
f) passo de tempo: 1s

g) Parameterização da turbulência: modelo k- ε;
h) Parameterização da aceleração da gravidade g = -9.81m/s;

Solvers:

a) Para a pressão: *GAMG*;
b) Para Velocidade, energia, k, ε : *smoothSolver with symGaussSaidel*;

Modelo CDF - OpenFoam

Modelo OpenFoam Versão 16.12+ (lançada a 23/12/2016)

Condições Iniciais e de Fronteira:

a) k~1.5x(I*U)^2 : I=intensidade de turbulência (0.15) e U=5m/s;
b) ε~(cμ^0.75 x k^1.5) / L : cμ=const=0.09 ; L~1m)
c) edifícios com rugosidade tipo *no slip wall function* dependendo de k;ε

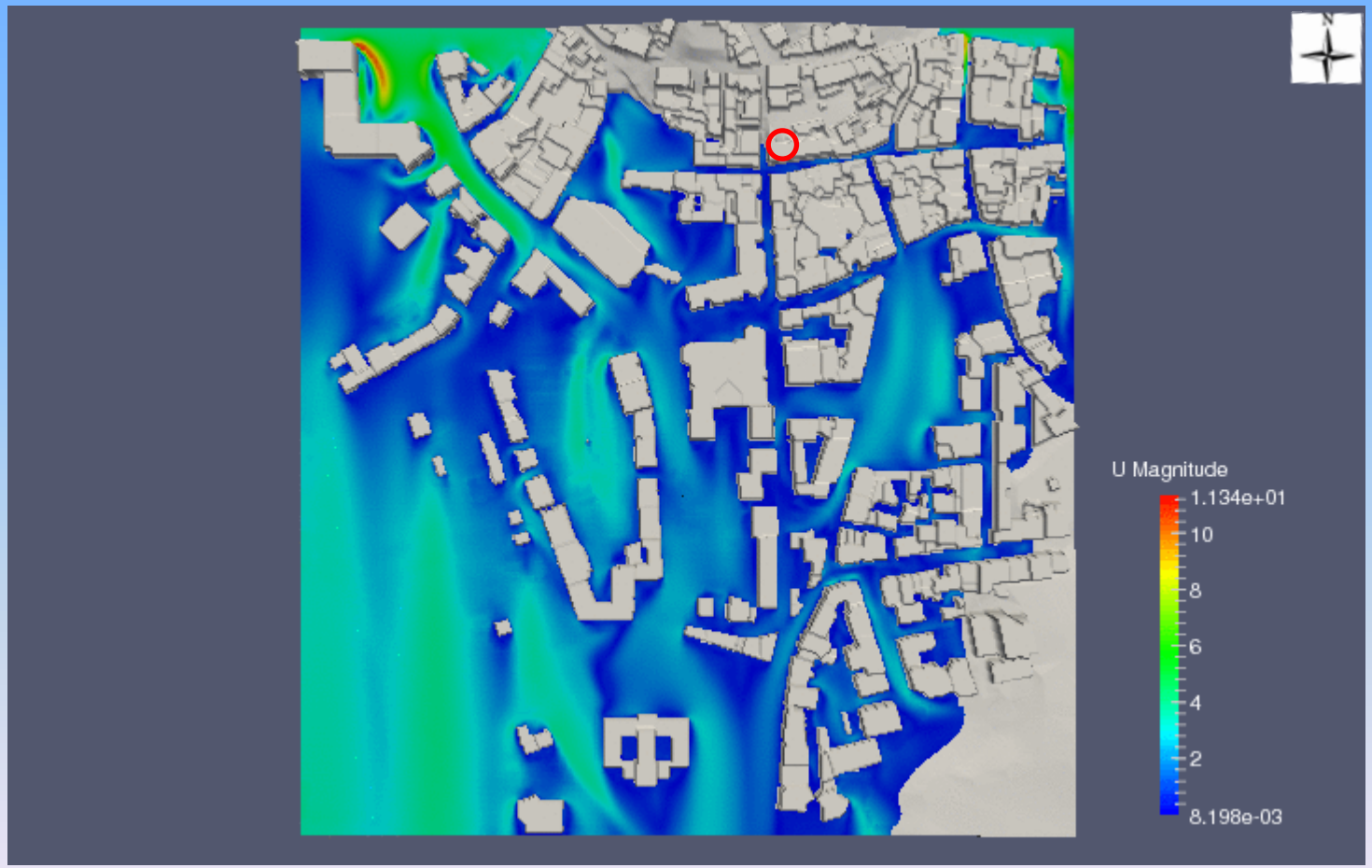
d) *Inlet*: Perfil Vertical de Vento;
d1) Uref = 5m/s;
d2) Zref = 80m;
d3) z0 = uniforme = 0.75 (ocupação densa);
d4) zground = 0;
d5) Direção do escoamento: de Norte;

e) *Outlet*: condição *pressure and velocity free*;

f) Internal field: velocidade de 3m/s (de Norte) para aceleração da convergência do cálculo.

Modelo CDF - OpenFoam

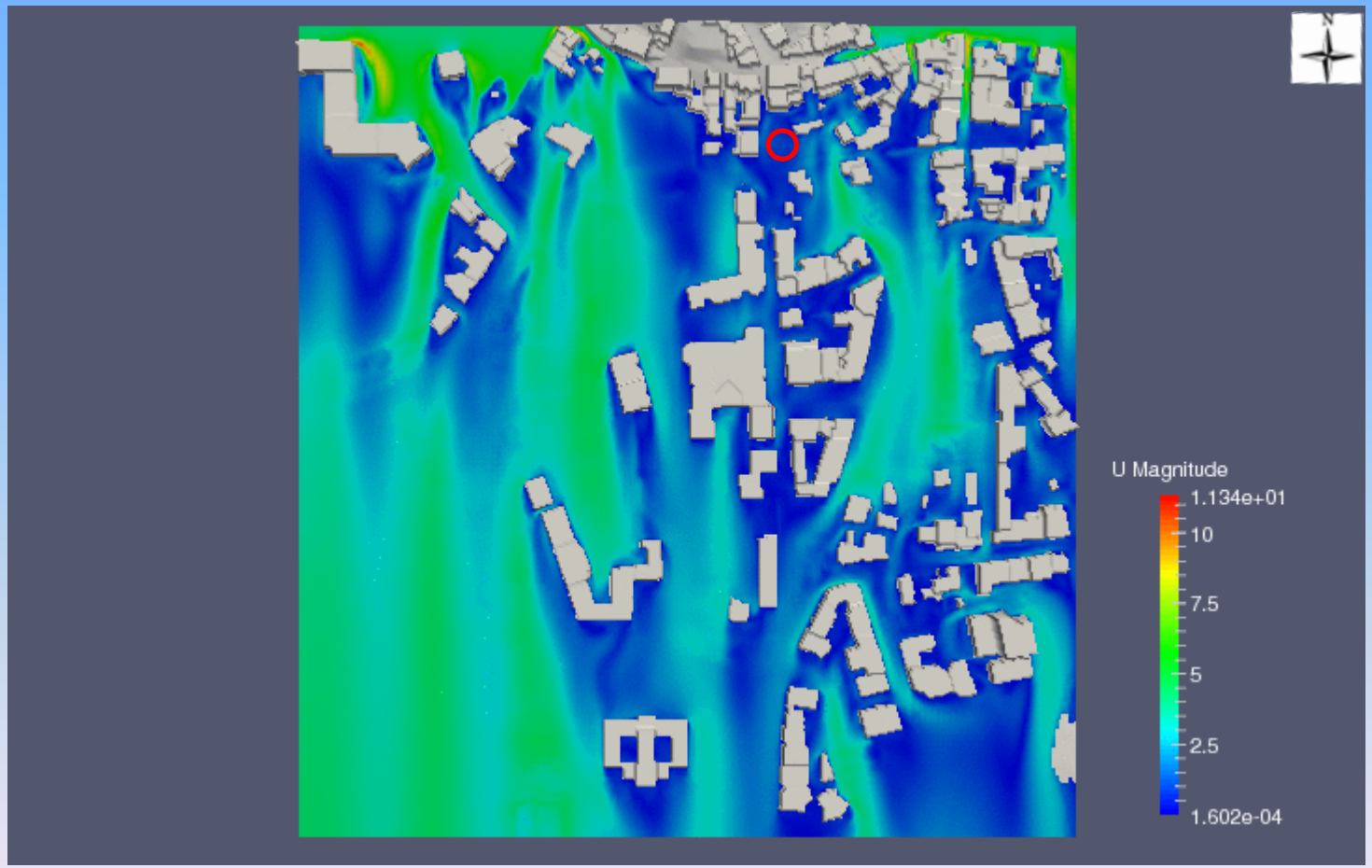
Resultados: Velocidade média do vento : solução convergiu em 2480s
Plano horizontal Z: h=30m (a.n.m.m)



Organiza:

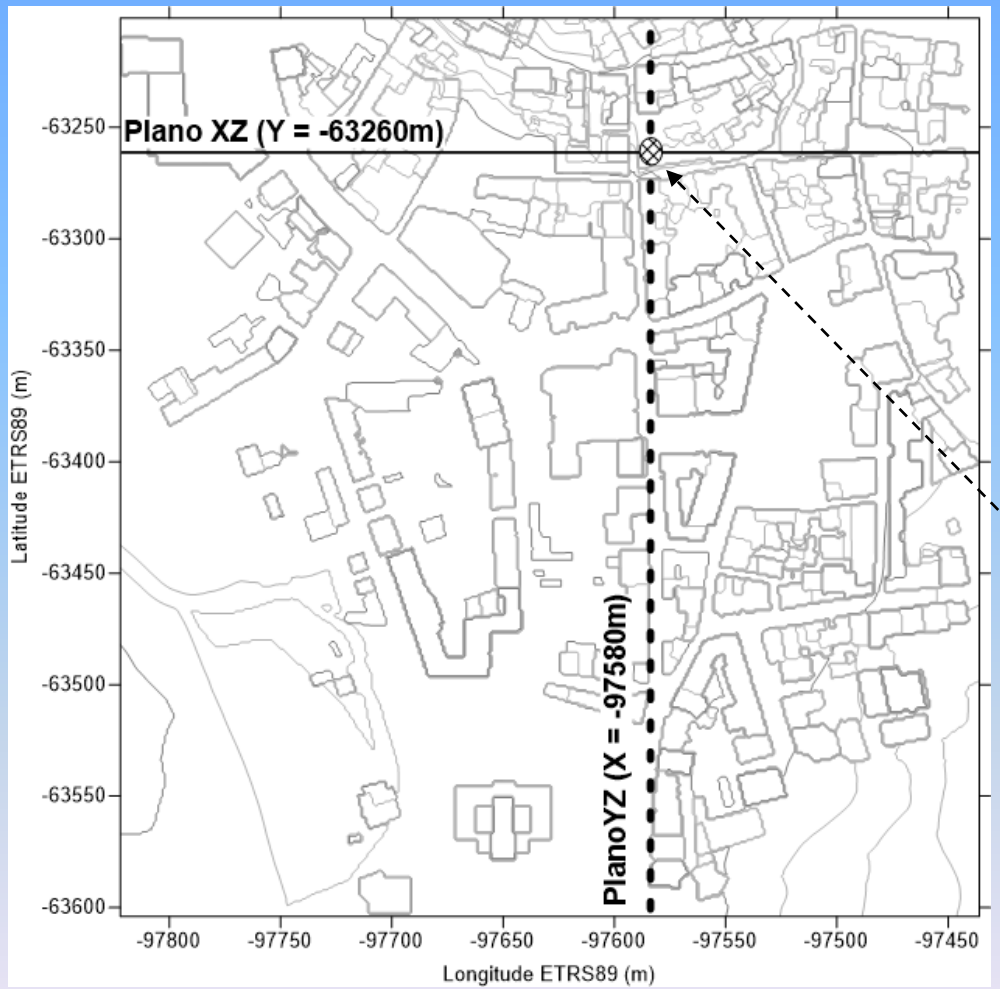
Modelo CDF - OpenFoam

Resultados: Velocidade média do vento : solução convergiu em 2480s
Plano horizontal Z: h=35m (a.n.m.m)



Organiza:

Modelo CDF - OpenFoam



Traçado dos planos:

XZ (Y=const.= -63260m)

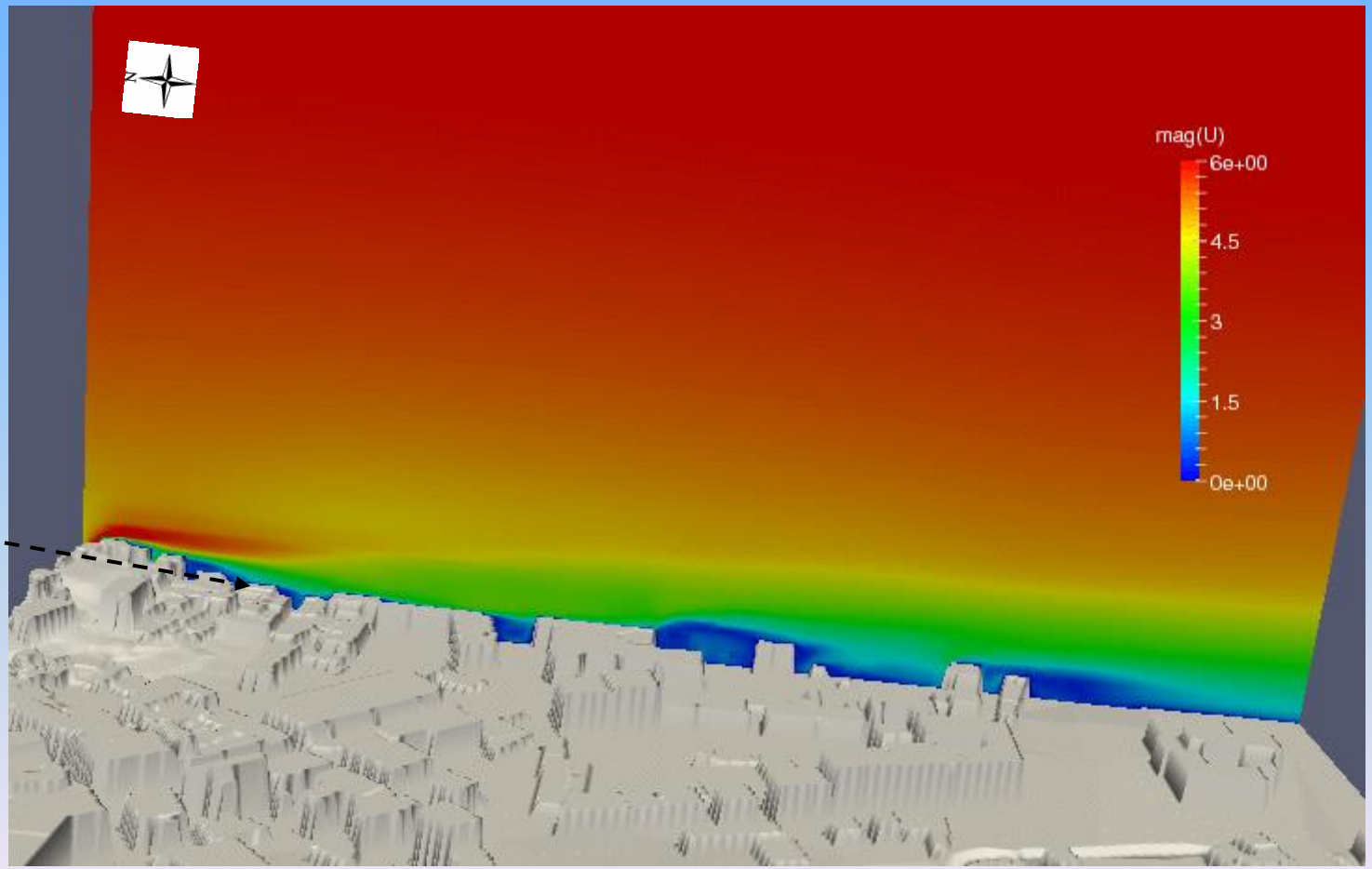
YZ(X=const. = -97580m)

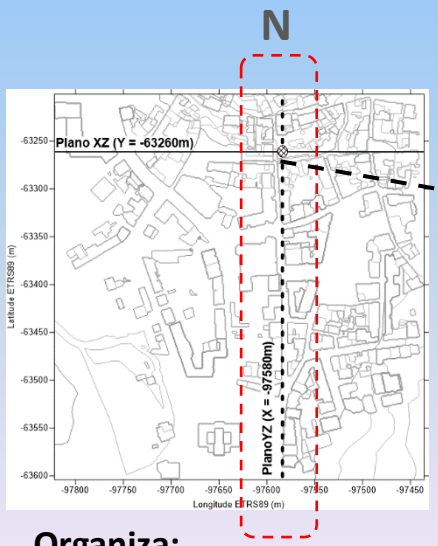
Os planos cruzam o local de observação identificado por ⊗

Organiza:

Modelo CDF - OpenFoam

Intensidade Média do Vento: solução convergiu em 2480s;
Plano Y-Z (X const. = -97580 m : Esquerda =Norte e Direita = Sul

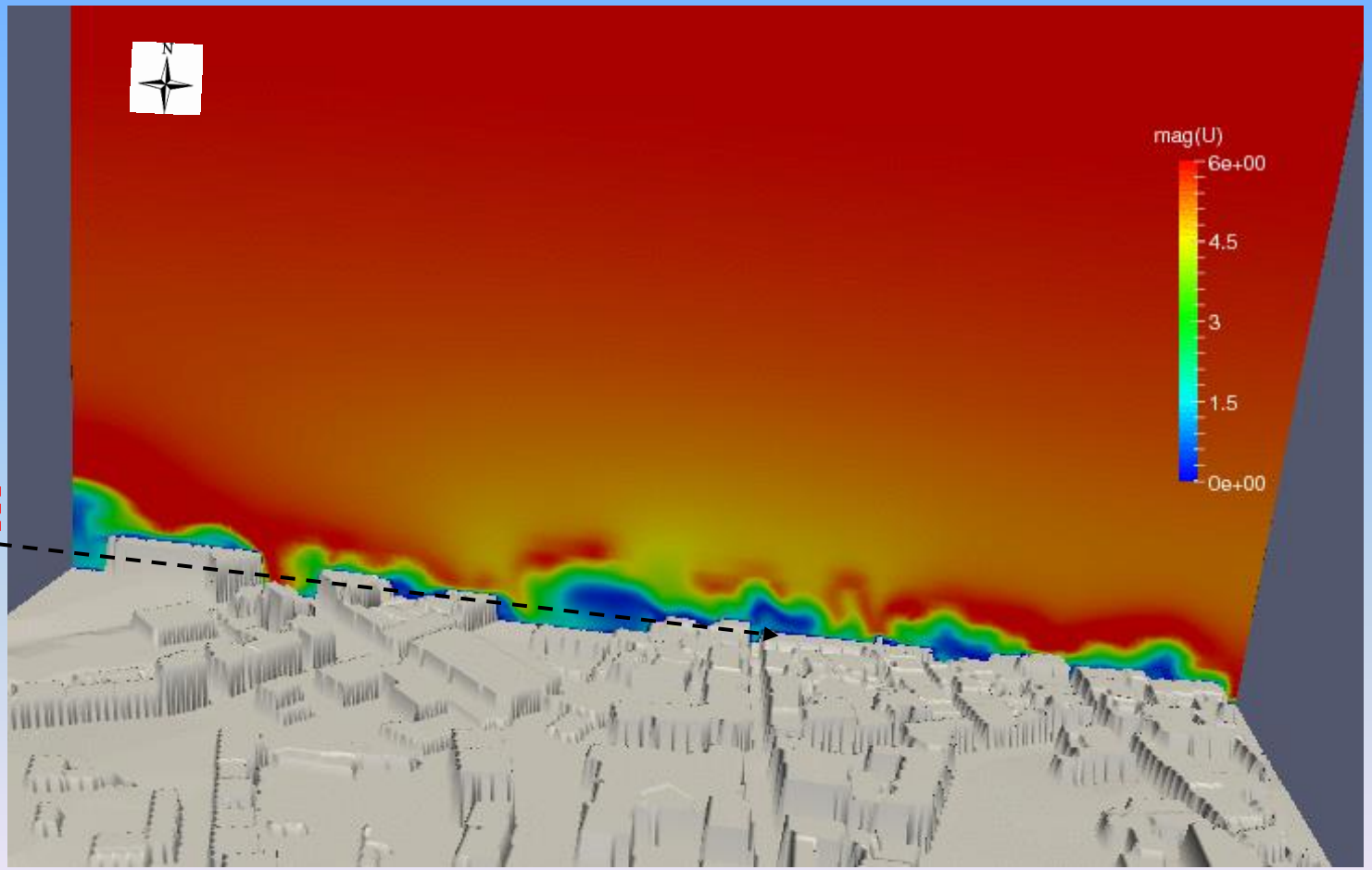




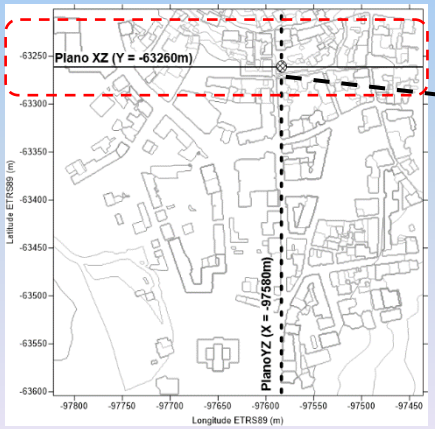
Organiza:

Modelo CDF - OpenFoam

Intensidade Média do Vento: solução convergiu em 2480s;
Plano X-Z (X const. = -63260 m : Esquerda =Oeste e Direita = Este



O E



Organiza:

Modelo Não-CDF - WaspEngineering

Wasp Engineering Versão 2.0 (lançada em 2005)

O modelo padrão utilizado pela sector Eólico para estimar o vento em terrenos complexos incluindo obstáculos para planeamento de Parques Eólicos

a) Modelo Estacionário: linear – solução simulada pelo solver LINCOM;
b) o solver LINCOM não depende de passo de tempo;

c) Parameterizações: esquemas simplificados resolvidos pelo LINCOM:

- **Modelo simples de turbulência;**
- **Compressão adiabática sobre colinas/montanhas;**
- **Zonas de recirculação em terrenos complexos e obstáculos;**
- **Esteira dos vórtices estimada da rugosidade do solo e dimensão dos obstáculos;**
- **modelo simples de estratificação térmica da atmosférica**

Modelo Não-CDF - WaspEngineering

Wasp Engineering Versão 2.0 (lançada em 2005)

Condições iniciais (similares ao OpenFoam):

a) MDT-U (resolução espacial de 1x1m);
b) Rugosidade constante para z0;
b1) mapa c/rugosidade = 0.75 m (ocupação densa)

c) Rugosidade nas fronteiras tipo *no slip wall function*
c1) valor *c*onstante de 0.03

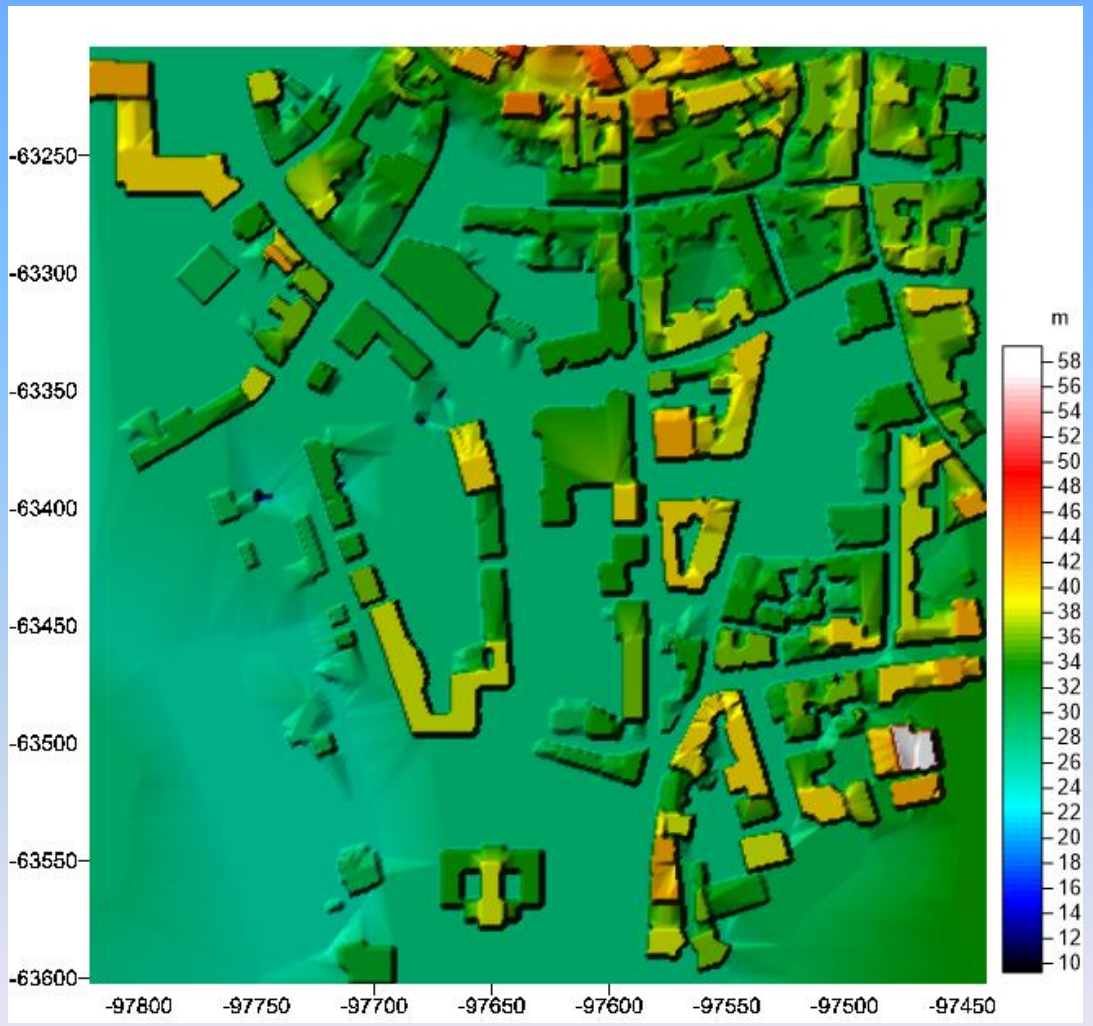
d) *Inlet*: perfil vertical logarítmico da camada limite;
d1) Uref = 5m/s;
d2) Zref = 80m;
d3) z0 = constante = 0.75 (ocupação densa);
d4) zground = 0;
d5) Direção escoamento: Norte (rosas vento e potência);

MDT-U p/Modelo - WaspEngineering

Terreno e Edifícios

Rugosidade:
Constante z_0 = 1.0
(ocupação densa)

Resolução Espacial:
1x1m

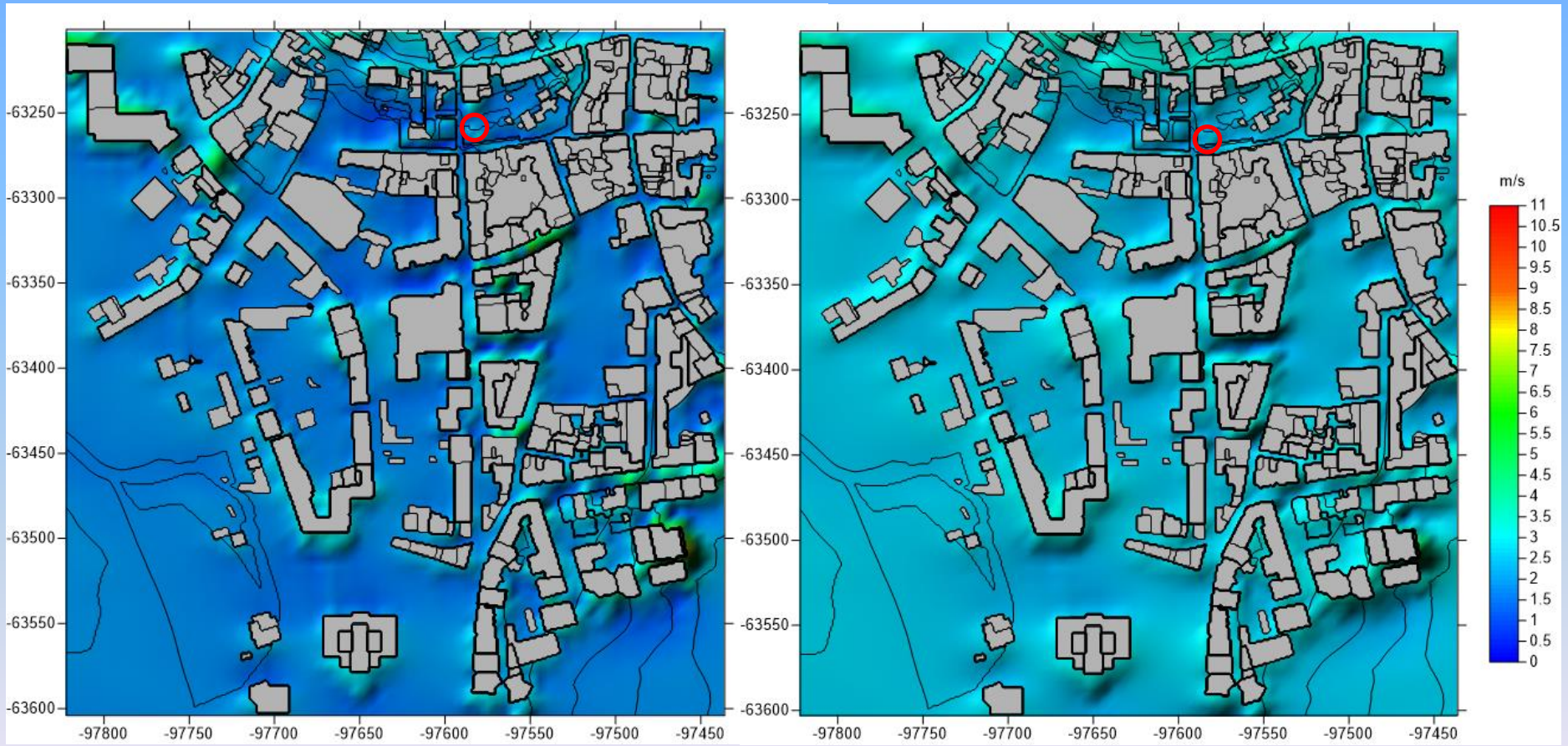


Organiza:

Resultados- WaspEngineering

Resultados: campos horizontais da Intensidade média do vento:

Plano Z: h=30m **h=35m**



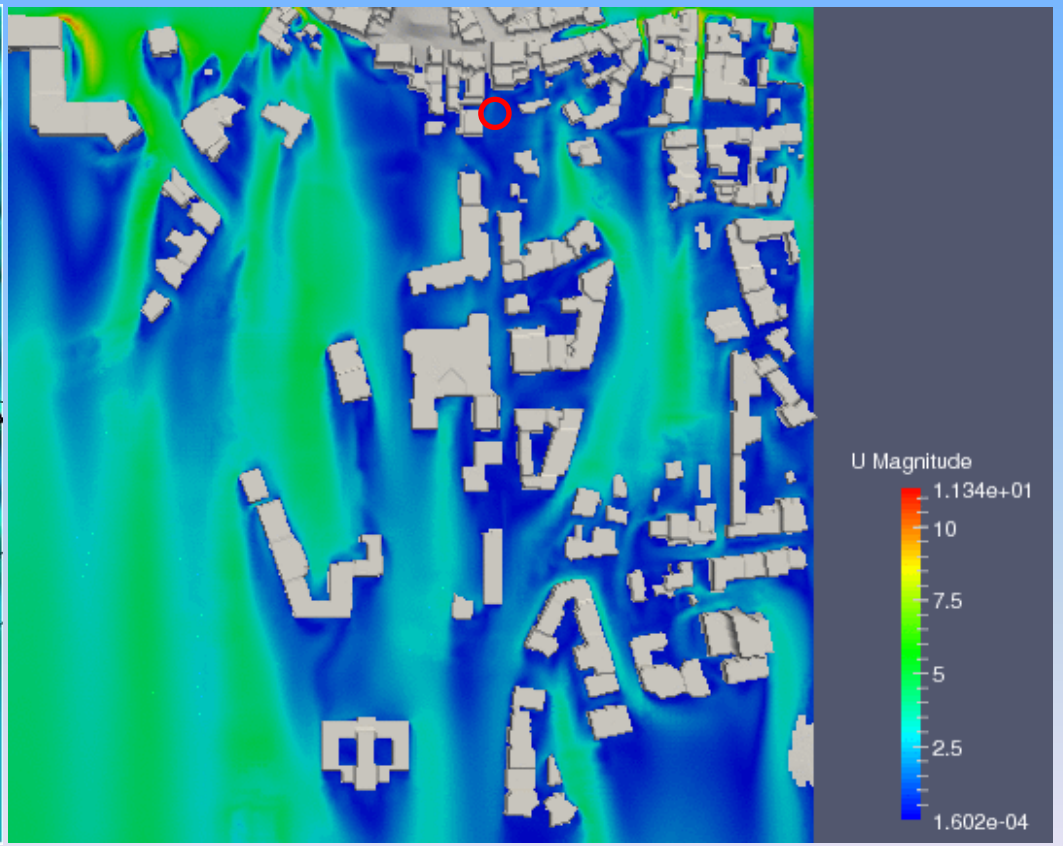
Organiza:

Comparação Resultados

Plano Z: h=35m (a.n.m.m) Intensidade média do vento:

Não - CFD- WaspEngineering

CFD - OpenFoam

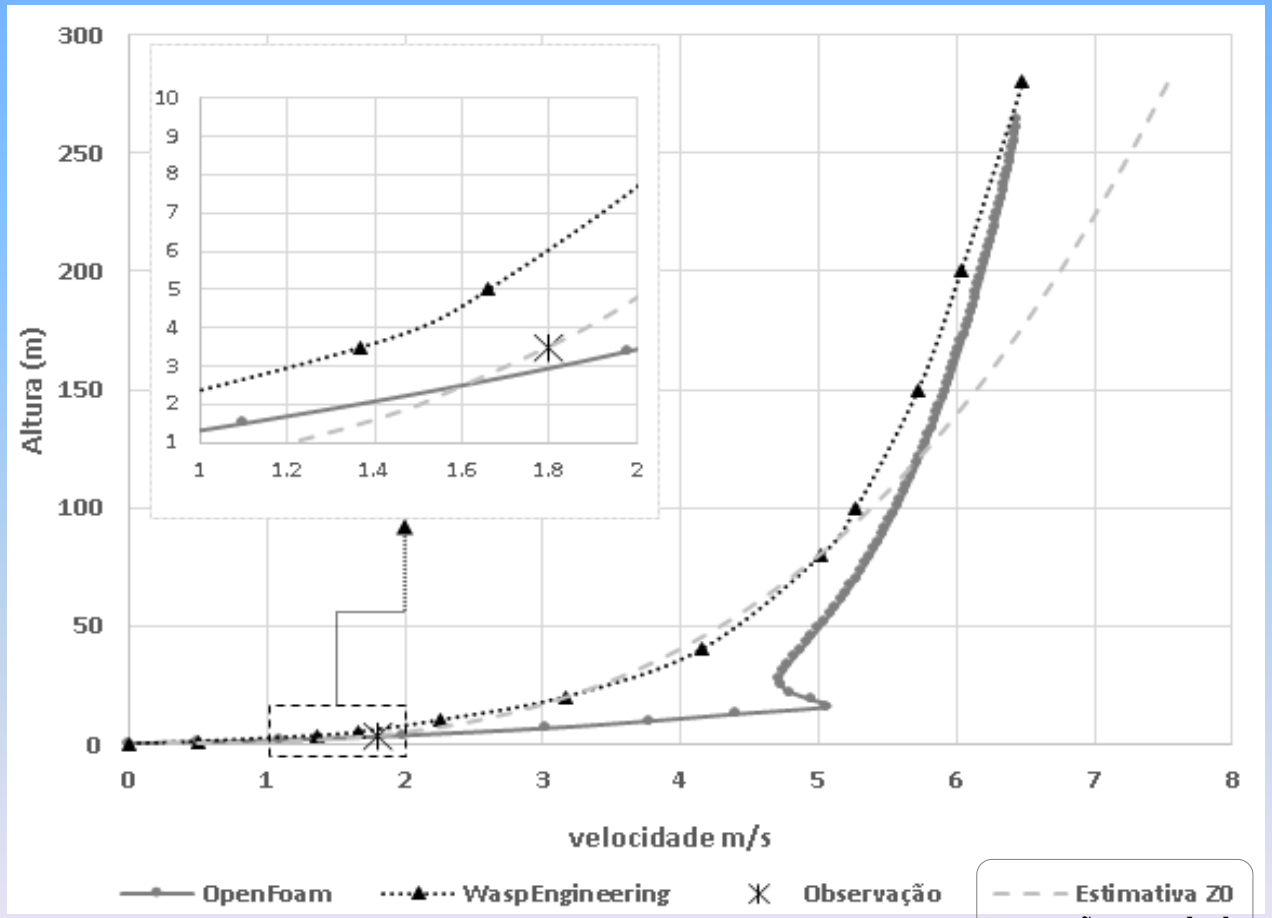


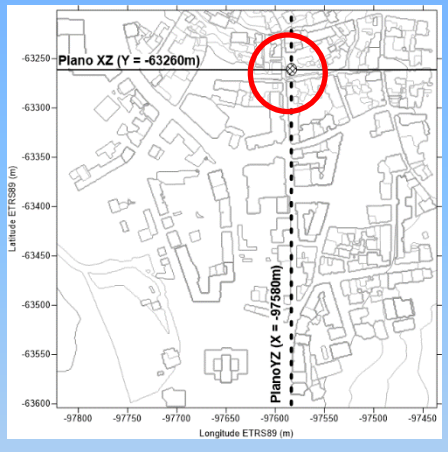
Organiza:

Comparação Resultados

Perfis verticais do vento vs. Observação

- Perfis simulados no ponto (-97580m ; -63260m) - Edifício Câmara Municipal Torres Vedras





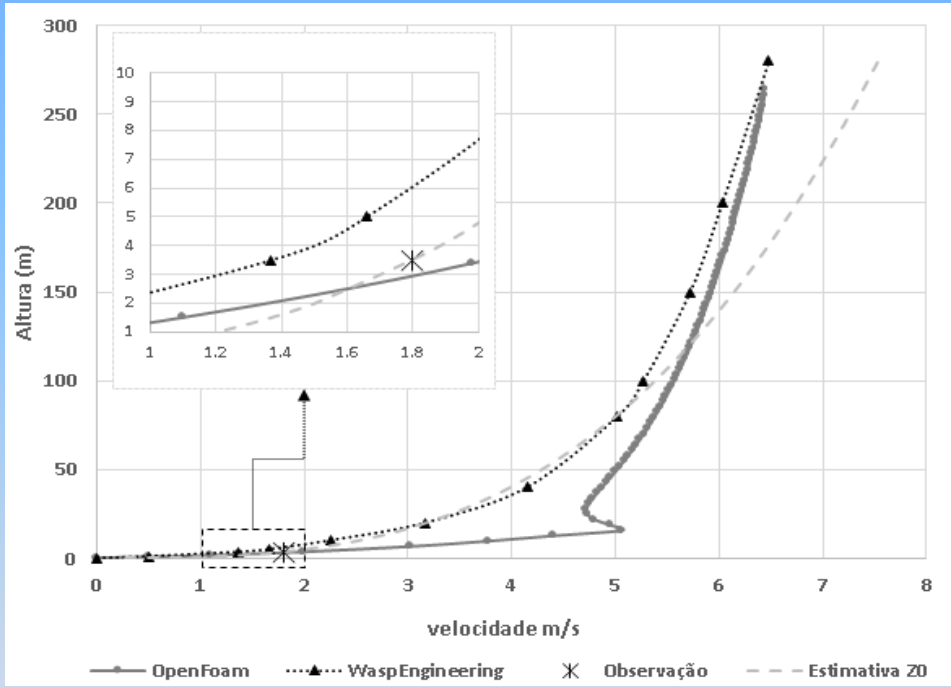
- **O perfil OpenFoam é mais realista para cidade face ao WaspEngineering**
- **O valor da velocidade do Openfoam é mais aproximado ao valor observado face ao WaspEngineering**

Organiza:

Comparação Resultados

Perfis verticais do vento vs. Observação

- Perfis simulados no ponto (-97580m ; -63260m) - Edifício Câmara Municipal Torres Vedras



- **O perfil do WaspEngineering segue um padrão de curva semelhante ao perfil do *Inlet* - vento não perturbado até h=100m**

Velocidades (setor Norte):

Observada: **1.81m/s**
Simulada OpenFoam: **1.98 m/s**
Simulada WaspEngineering: **1.37 m/s**

Desvios Velocidades (setor Norte):

OpenFoam: **+ 0.17 m/s (+ 9.4%)**
WaspEngineering: **- 0.44 m/s (-24.3%)**

- **O WaspEngineering é um modelo pouco adequado para a avaliação do vento na zona de estudo.**

Organiza:

Conclusões

- Ambos os modelos (OpenFoam e WaspEngineering) mostraram algumas semelhanças no perfil vertical acima dos 100m. Abaixo desta cota o perfil do modelo OpenFoam torna-se mais realista para ambiente urbano;
- O modelo WaspEngineering não reproduz fielmente o campo do vento em redor dos edifícios
- O local estudado mostra que para fins de aproveitamento eólico se torna um local pouco adequado. No entanto os mapas horizontais evidenciam outros edifícios onde o recurso pode ter algum aproveitamento energético na região;
- O modelo MDT-U mostrou-se adequado para utilização em modelos CDF e Não-CFD;
- Valores Simulados vs. Observação (Velocidade média do vento – setor Norte):
  - Observado: 1.77 m/s (geral) e 1.81 m/s (Setor Norte)
  - OpenFoam: 1.98 m/s
  - WaspEngineering: 1.37 m/s
- Novos locais estão sendo atualmente estudados (ex: Município de Cascais) onde existem observações de vento recolhidas a diversos níveis verticais recorrendo-se a tecnologia LiDAR de vento.

Muchas gracias

paula.costa@lneg.pt
teresa.simoes@lneg.pt
ana.estanqueiro@lneg.pt

Caso de Estudo – Munícipio de Cascais

Localização LiDAR:

- Telhado do Centro de Interpretação Ambiental da Pedra do Sal

- **Altitude: 10m**
- **Altura edifício: 5m**

- **Altura das medições LiDAR:**

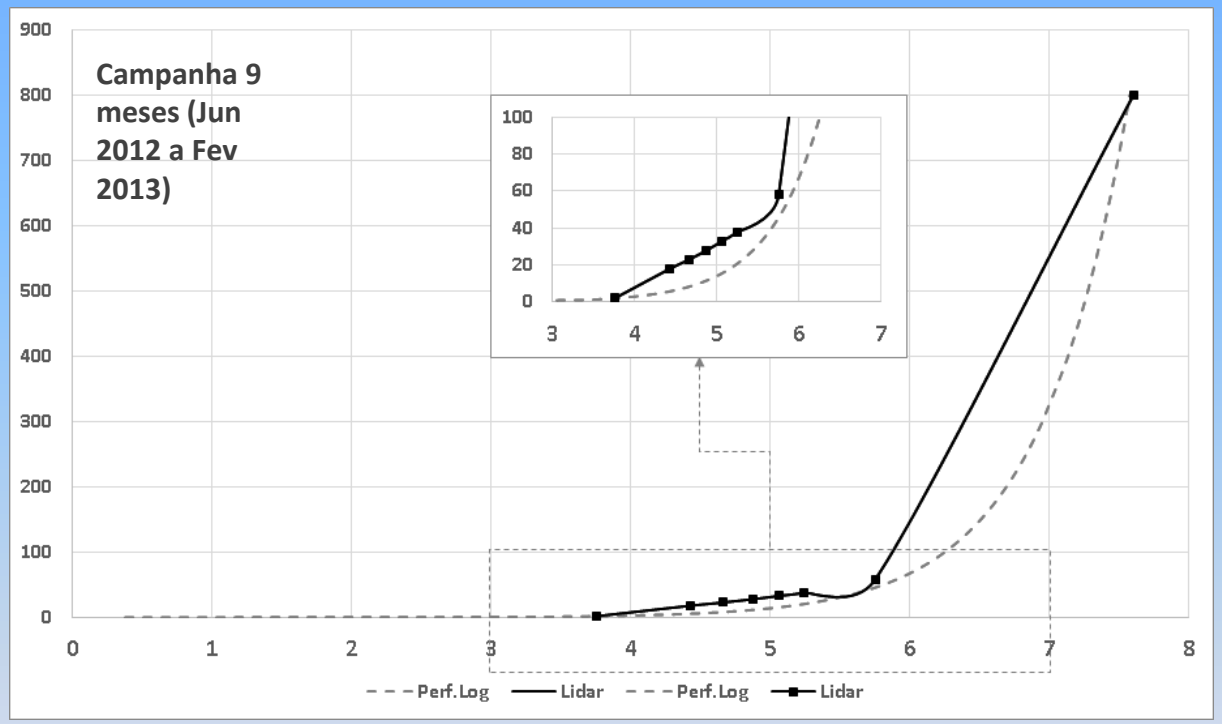
2m ⇔ 17m (altitude)
18m ⇔ 33m
23m ⇔ 38m
28m ⇔ 43m
33m ⇔ 48m
38m ⇔ 53m
58m ⇔ 73m
800m ⇔ 815m

Organiza:

Jornadas REGEDIS 2019
19-20 Noviembre 2019
Medellín (Colombia)

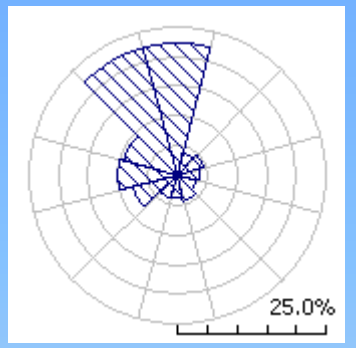
Caso de Estudo – Munícipio de Cascais

Observação Lidar vs. perfil logarítmico vento - *Inlet*

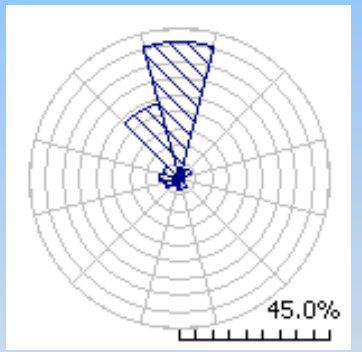


h=60m

Rosa ventos



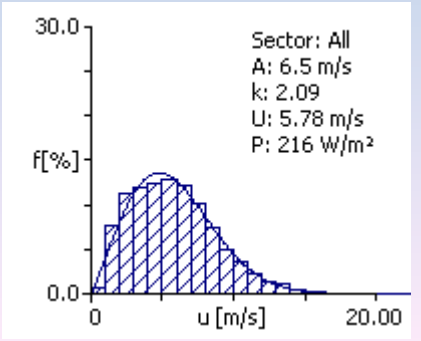
Rosa potências



h=60m : Estatísticas vento

U = 5.78 m/s ; FP = 216W/m² ; A = 6.5m/s ; k = 2.09 (adim.)

Distribuição Weibull



Local com potencial eólico urbano adequado

Organiza:

Jornadas REGEDIS 2019
19-20 Noviembre 2019
Medellín (Colombia)

Caso de Estudo – Munícipio de Cascais

Município de Cascais – Estoril

Informação e Estatísticas da Malha:

a) Malha Mãe: 3x3m regular;
b) refinamento: edifícios: 1x1m;
c) Topo da malha h = 900m;
d) Desfasamento vertical:
(dz ~ 0.5m – superfície ; dz ~ 40m – topo);
e) Nr. Total de pontos da malha: 4 551 063
f) Nr. Total de faces da malha: 12 604 342
g) Nr. Total de células da malha: 4 029 855

Condições Iniciais e de Fronteira:

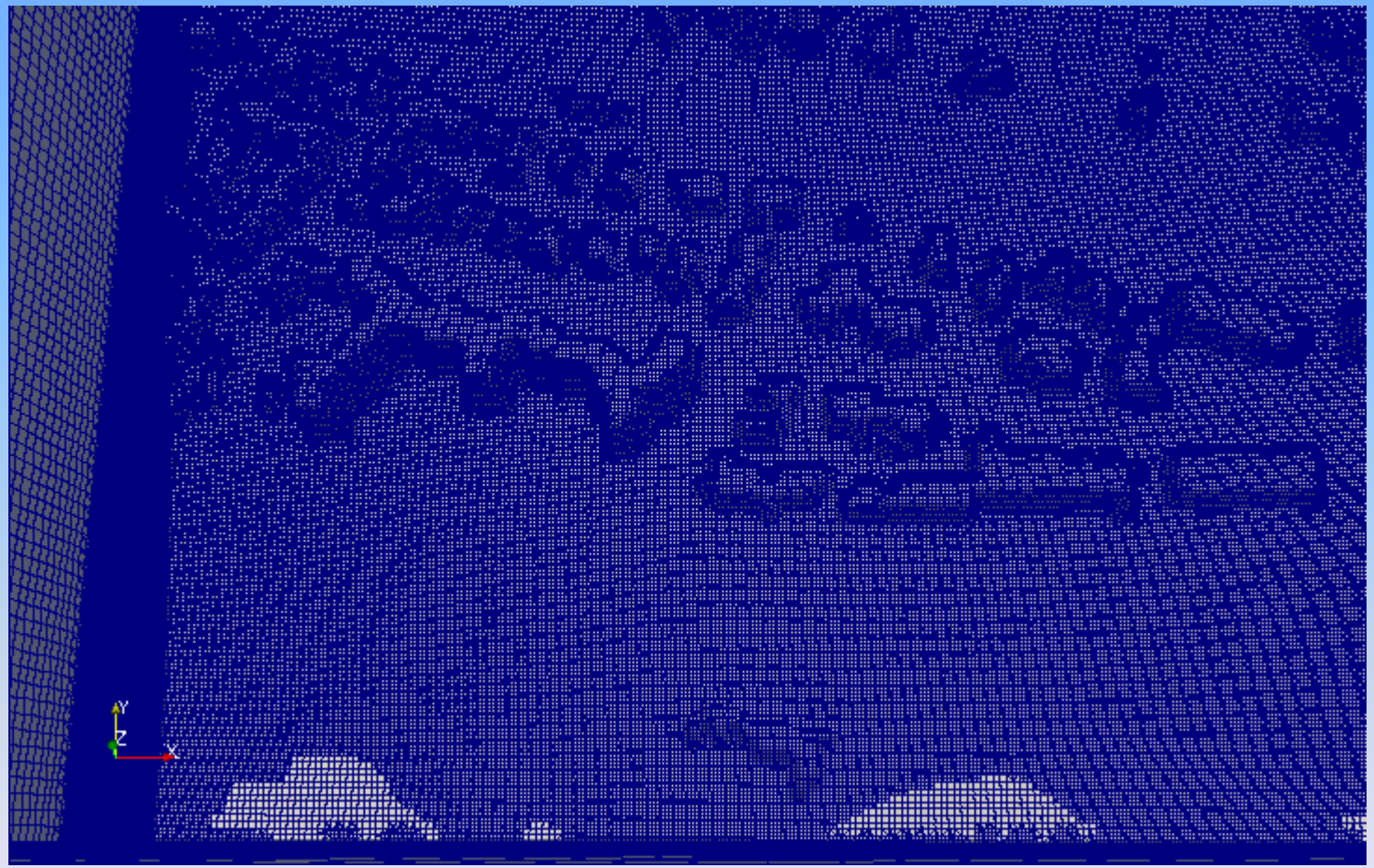
h) *Inlet*: Perfil Vertical de Vento;
h1) Uref = 6.2m/s;
h2) Zref = 80m;
h3) z0 = uniforme = 0.003;
h4) zground = 0;
h5) Direção: Noroeste;

i) *Internal field*: 5m/s (Noroeste)

Solvers e parameterizações idênticas ao caso de TorresVedras

Caso de Estudo – Munícipio de Cascais

Malha Horizontal CFD

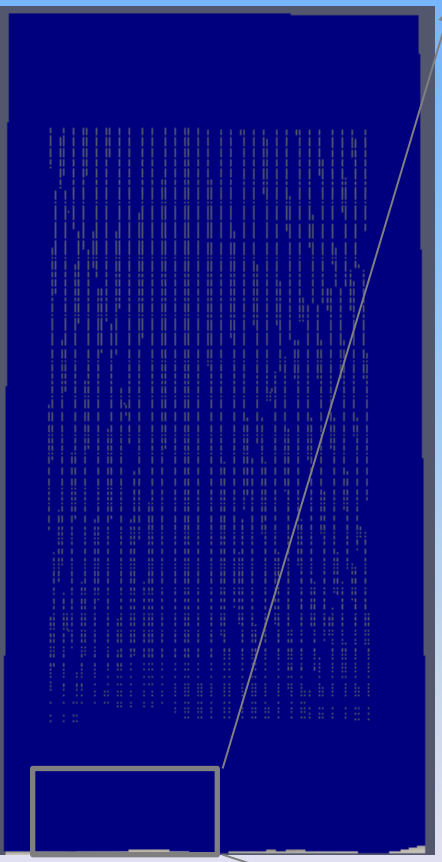


Organiza:

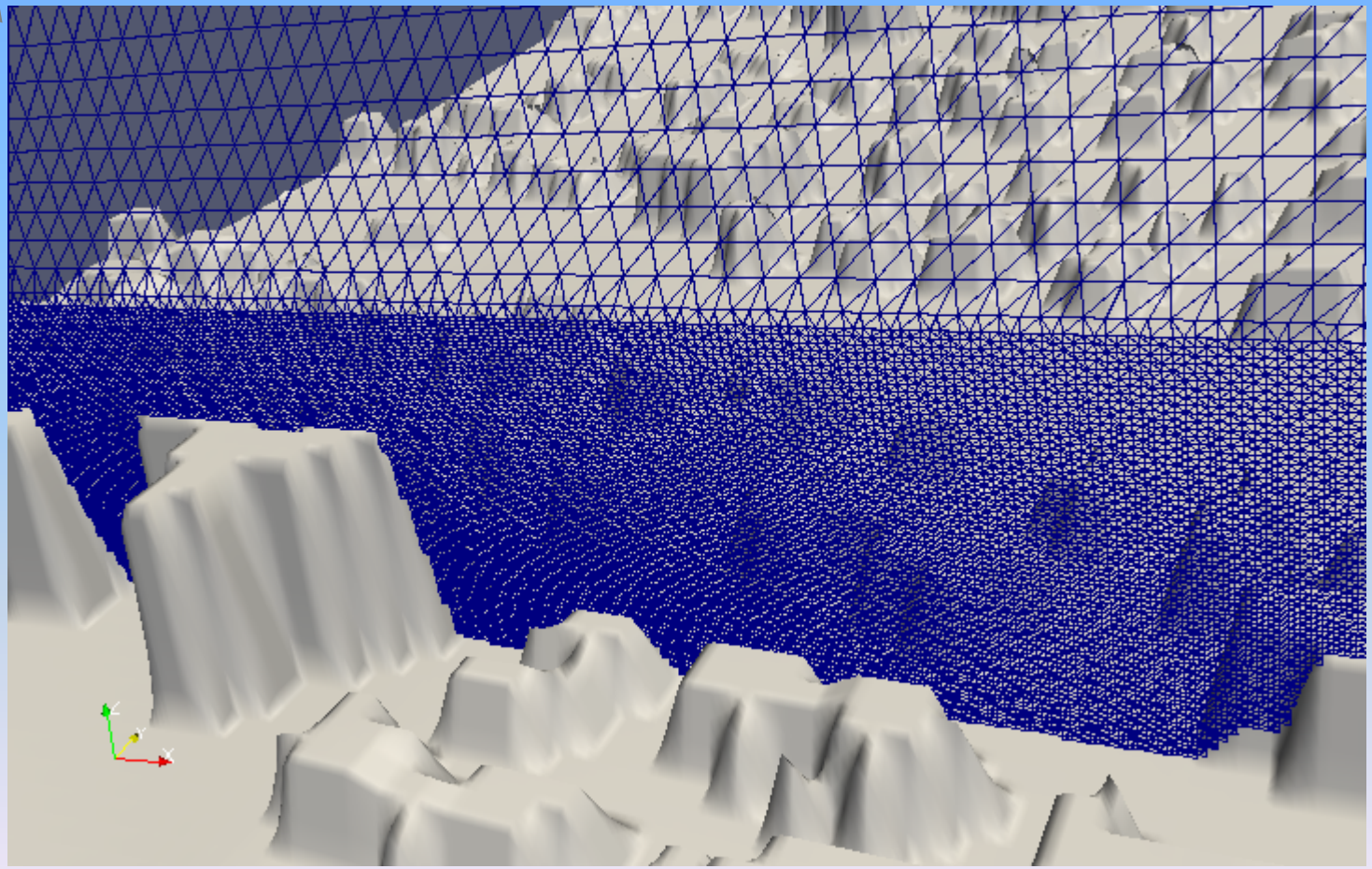
Jornadas REGEDIS 2019
19-20 Noviembre 2019
Medellín (Colombia)

Caso de Estudo – Munícipio de Cascais

Malha Vertical CFD



“zoom” Malha Vertical CFD – detalhes refinamento edifícios



Organiza:

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE ECONOMÍA, INDUSTRIA Y COMPETITIVIDAD · Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

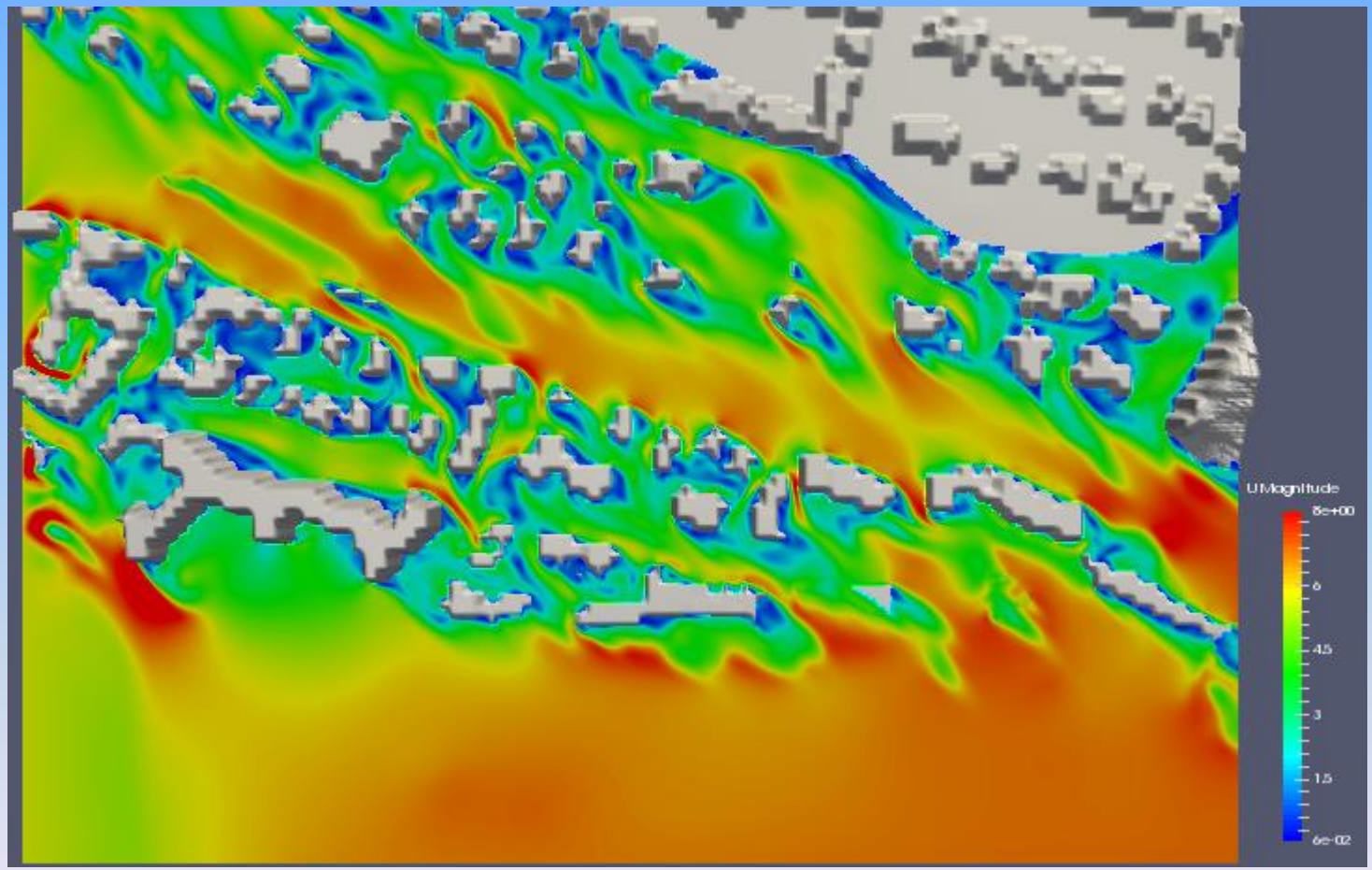
Universidad Pontificia Bolivariana

Jornadas REGEDIS 2019
19-20 Noviembre 2019
Medellín (Colombia)

Caso de Estudo – Munícipio de Cascais

Simulação teste – "*run ongoing*" com 90s integração apenas! **Plano Z = 30m**

magnitude vento (m/s)



Organiza:

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE ECONOMÍA, INDUSTRIA Y COMPETITIVIDAD · Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Universidad Pontificia Bolivariana

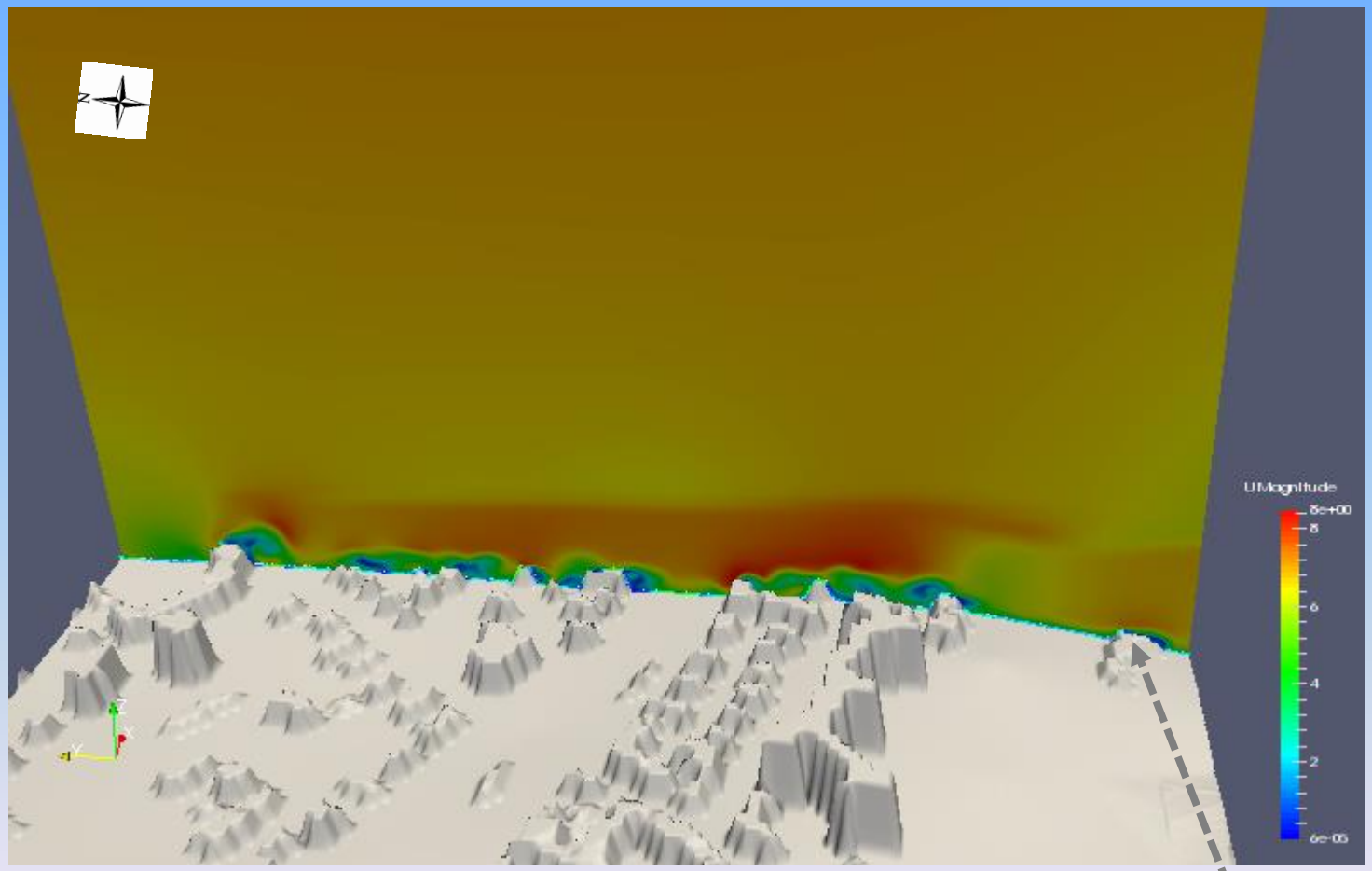
Jornadas REGEDIS 2019
19-20 Noviembre 2019
Medellín (Colombia)

Caso de Estudo – Munícipio de Cascais

Simulação teste – "*run ongoing*" com 90s integração apenas!

Plano YZ

magnitude vento (m/s)



Edifício c/ LiDAR

Organiza:

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE ECONOMÍA, INDUSTRIA Y COMPETITIVIDAD · Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

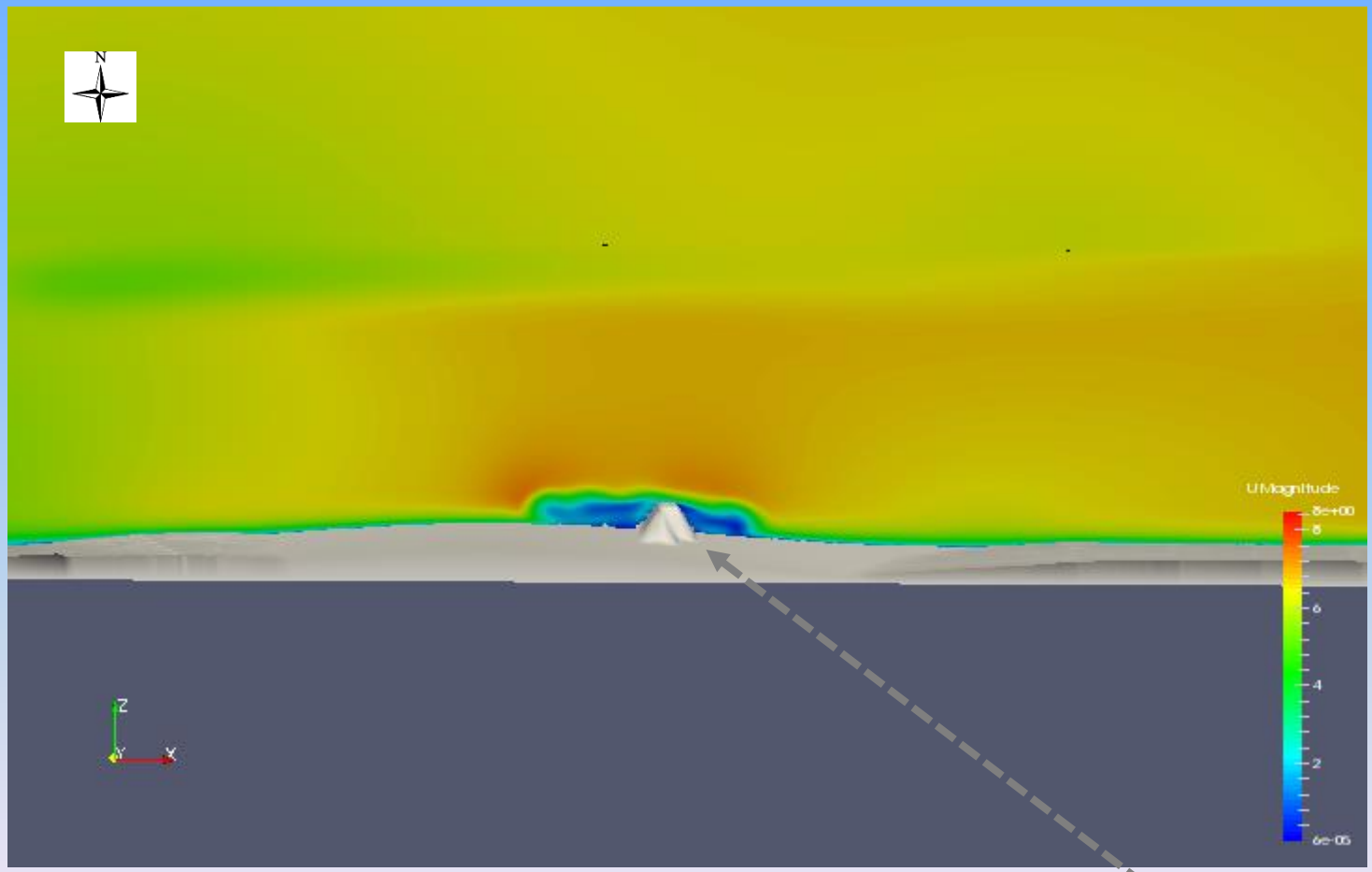
Universidad Pontificia Bolivariana

Jornadas REGEDIS 2019
19-20 Noviembre 2019
Medellín (Colombia)

Caso de Estudo – Munícipio de Cascais

Simulação teste – "*run ongoing*" com 90s integração apenas! **Plano XZ - zoom**

magnitude vento (m/s)



Edifício c/ LiDAR

Organiza:

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE ECONOMÍA, INDUSTRIA Y COMPETITIVIDAD · Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

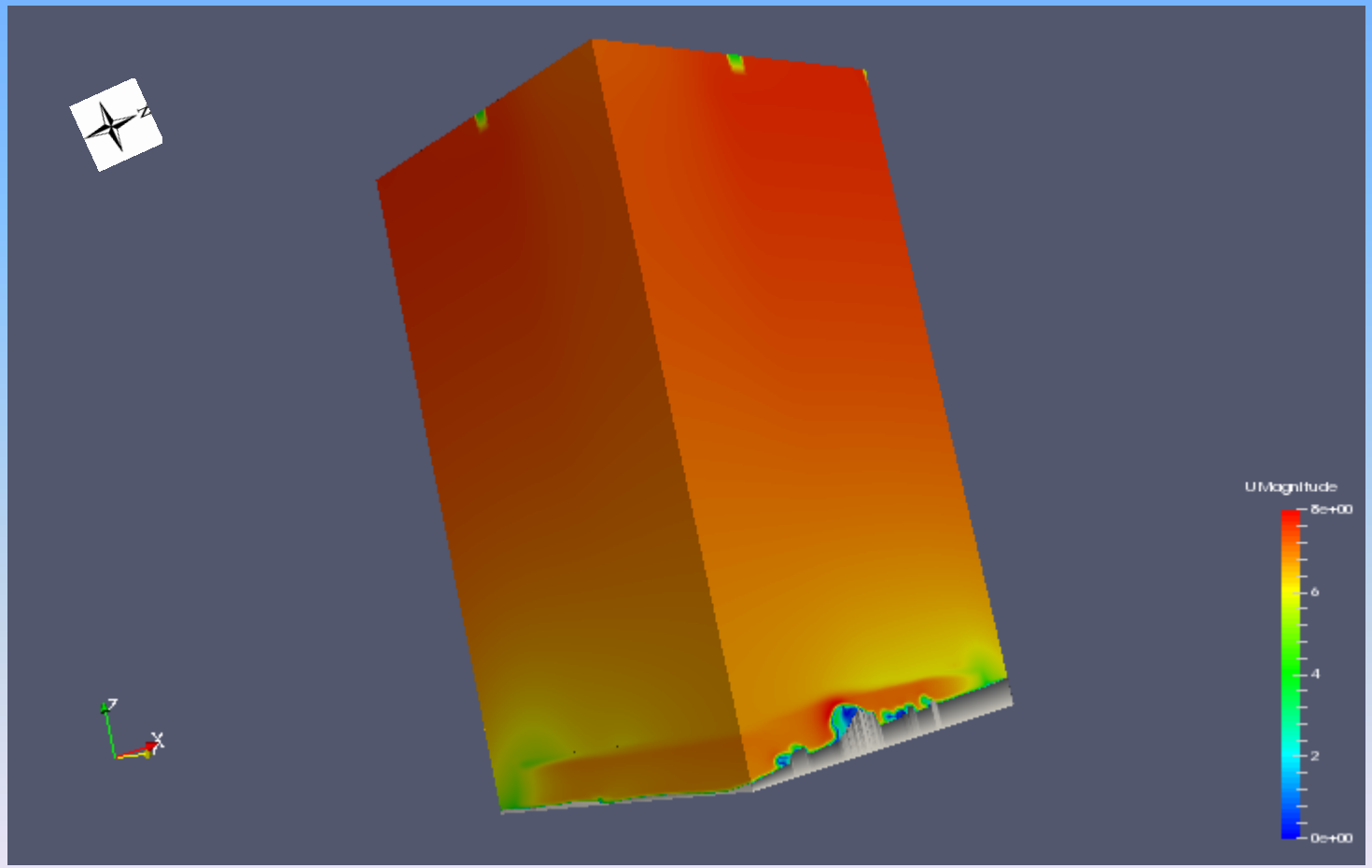
Universidad Pontificia Bolivariana

Jornadas REGEDIS 2019
19-20 Noviembre 2019
Medellín (Colombia)

Caso de Estudo – Munícipio de Cascais

Simulação teste – "*run ongoing*" com 90s integração apenas! **Plano XZ - zoom**

magnitude vento (m/s)



Organiza:

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE ECONOMÍA, INDUSTRIA Y COMPETITIVIDAD · Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

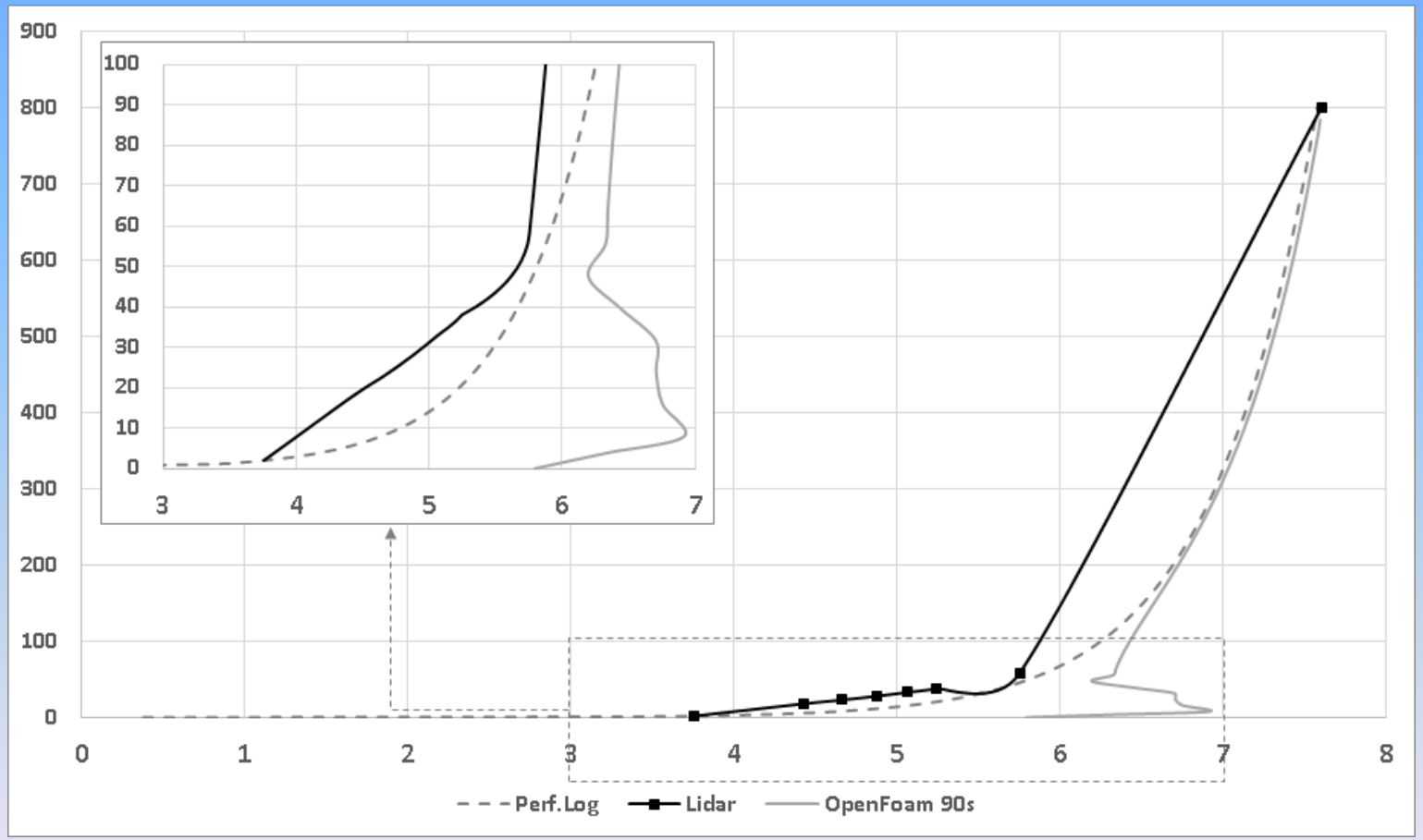
Universidad Pontificia Bolivariana

Jornadas REGEDIS 2019
19-20 Noviembre 2019
Medellín (Colombia)

Dominio – 3D

Caso de Estudo – Munícipio de Cascais

Simulação teste – "*run ongoing*" com 90s integração apenas! **Perfil Vertical**



Organiza:

Jornadas REGEDIS 2019
19-20 Noviembre 2019
Medellín (Colombia)

Resultados sector Noroeste