



I WORKSHOP BRASILEIRO SOBRE MODELAGEM DA ATMOSFERA APLICAÇÕES NA ÁREA DE ENERGIA EÓLICA

CTGAS-ER | NATAL-RN
14 e 15 junho de 2018

Efeitos Térmicos na Costa Litorânea do Rio Grande do Norte Utilizando CFD OpenFOAM

Leonardo de Lima Oliveira

CTGAS-ER

Instrutor de Educ. e Tec. I



Dinâmica do escoamento do vento na Camada Limite Atmosférica (CLA)

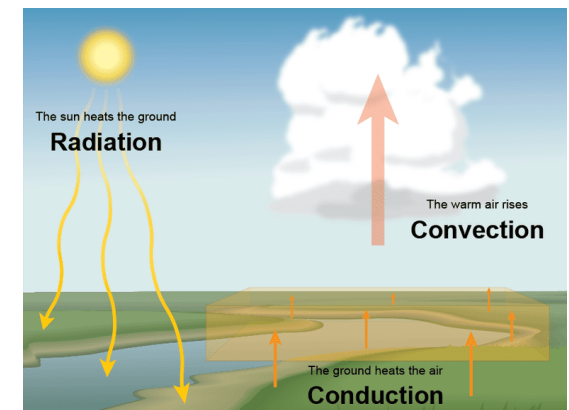
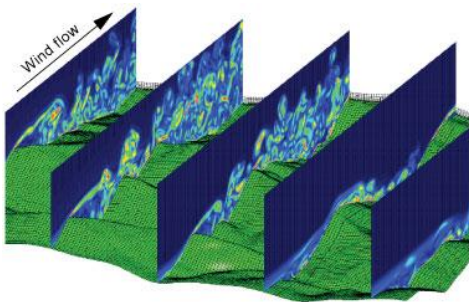
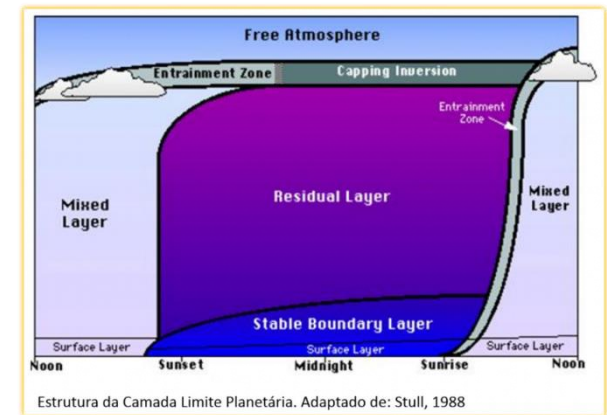
- Complexidade da orografia do terreno



- Rugosidade do terreno

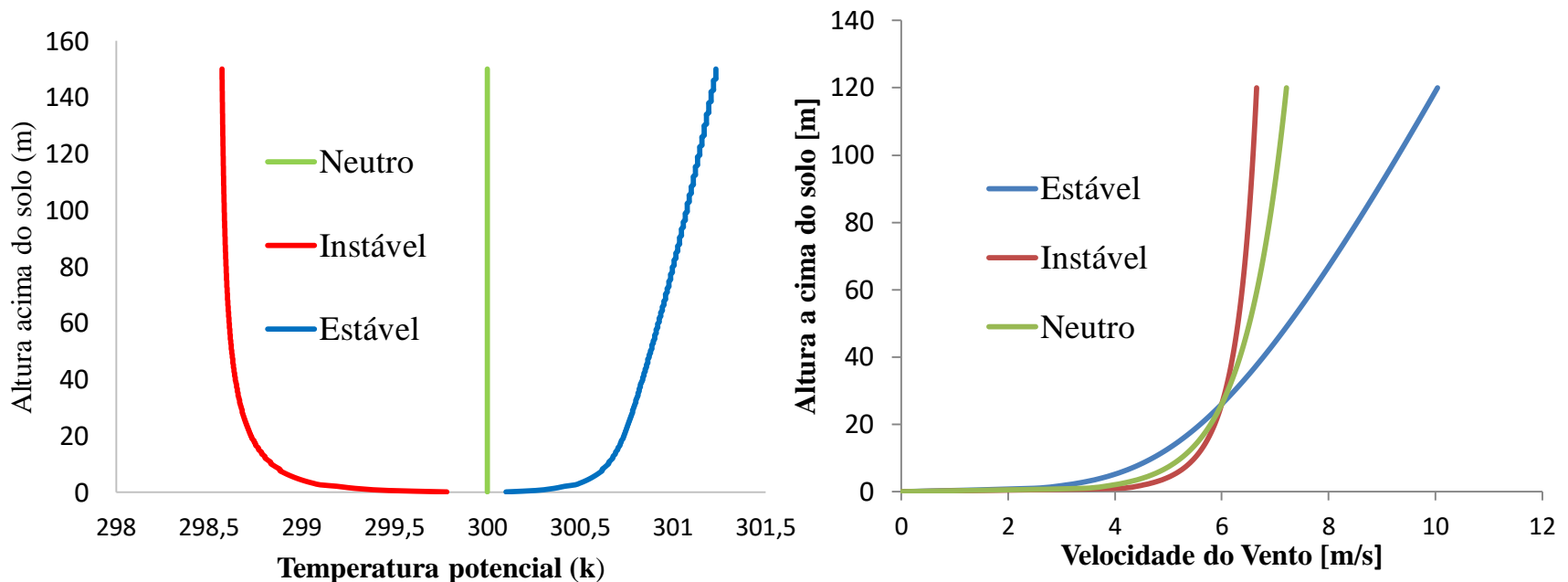


- Estratificação da atmosfera

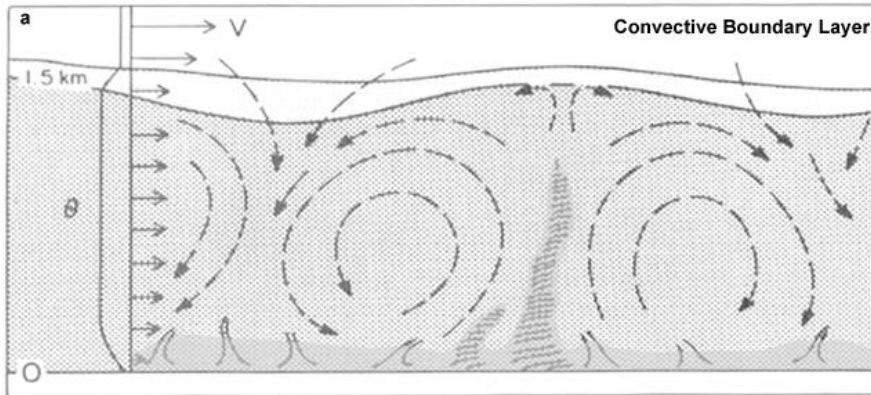


Influência da Estratificação da CLA

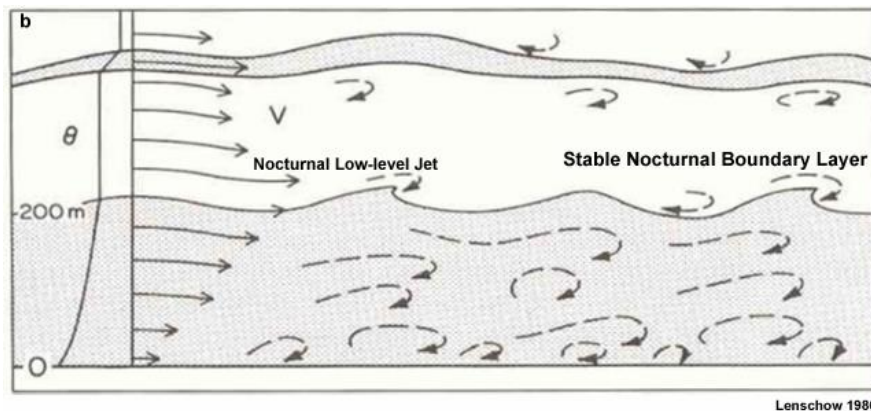
- Gradiente de temperatura com relação a altura
- Transferência de calor -> Força de flutuabilidade (*buoyancy*)
- Modificação do perfil de velocidade



Condições atmosféricas



- Atmosfera Instável:
 - A temperatura potencial diminui com altura;
 - Escoamento predominantemente turbulento;



- Atmosfera estável:
 - A temperatura potencial aumenta com altura;
 - Escoamento predominantemente laminar;

Lei de similaridade de Monin-Obukhov

- Perfil Logarítmico de velocidade:
$$U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right]$$
- Perfil Logarítmico de temperatura potencial:
$$\theta(z) = \theta_0 + \frac{\theta^*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \psi_h \left(\frac{z}{L} \right) \right]$$

$$\psi_m \left(\frac{z}{L} \right) = \begin{cases} -4.7 \left(\frac{z}{L} \right), & L > 0 \text{ (atmosfera estável)} \\ \ln \left(\frac{1+X^2}{2} \left(\frac{1+X}{2} \right)^2 \right) - 2 \tan^{-1}(X) + \frac{\pi}{2}, & L < 0 \text{ (atmosfera instável)} \end{cases}$$

$$\psi_h \left(\frac{z}{L} \right) = \begin{cases} -4.7 \left(\frac{z}{L} \right), & L > 0 \text{ (atmosfera estável)} \\ 2 \ln \left(\frac{1}{2} \left(1 + \left(1 - 16 \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right) - 2 \tan^{-1}(X) + \frac{\pi}{2}, & L < 0 \text{ (atmosfera instável)} \end{cases}$$

Onde $X = \left(1 - 16 \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{4}}$

OpenFOAM

- OpenFOAM é uma ferramenta de CFD de código aberto
- Programação em C++ orientada ao objeto
- Ventagens:
 - Sintaxe amigável;
 - Código fonte totalmente documentado;
 - Grande variedade de aplicações e modelagens prontas para uso;
 - Sem custo de licença;
 - Desenvolvimento de aplicações específicas pela comunidade.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla)U - \nabla \cdot (\nu \nabla U) = -\frac{1}{\rho} \nabla p$$

```
(  
    fvm :: ddt (U)  
    + fvm :: div (phi,U)  
    - fvm :: laplacian (nu,U)  
    ==  
    - fvc :: grad(p)  
)
```



Modelagem da Camada Limite atmosférica em CFD

- Equações governantes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \times V) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g$$

- Modelo de turbulência k-ε:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

- Equações de Richards and Hoxey (1993):

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z+z_0}{z_0} \right)$$

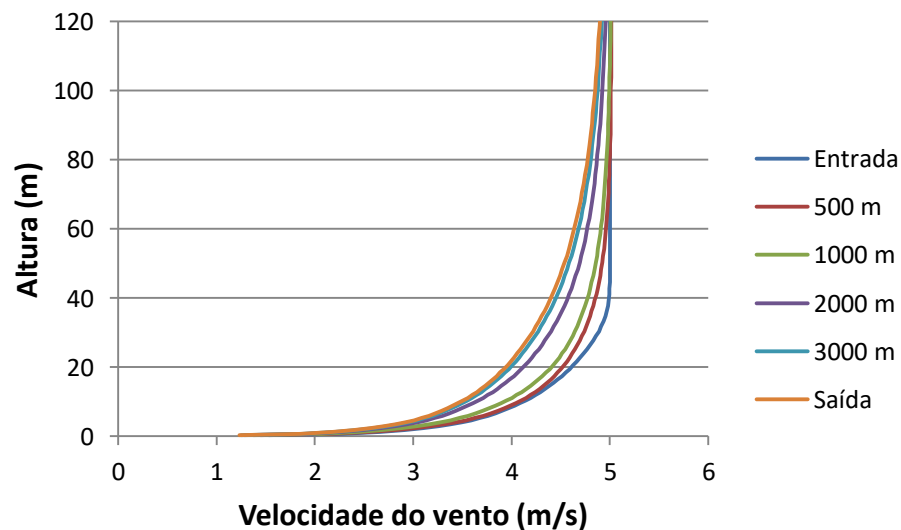
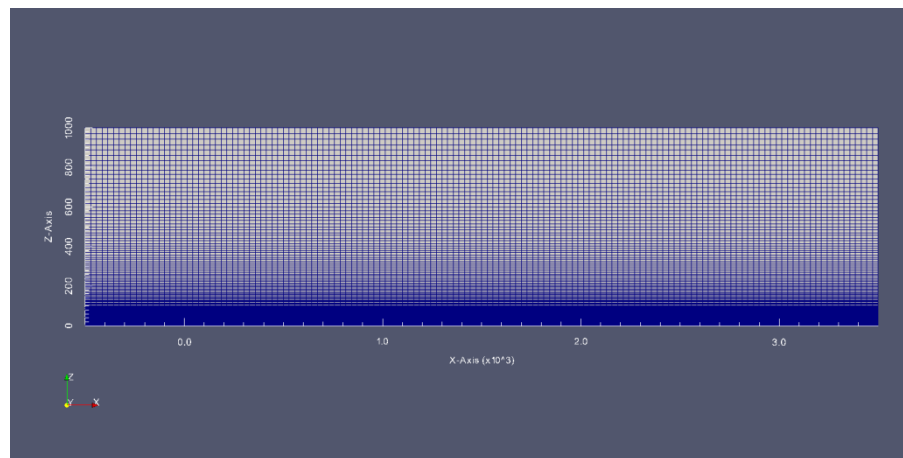
$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z+z_0)}$$



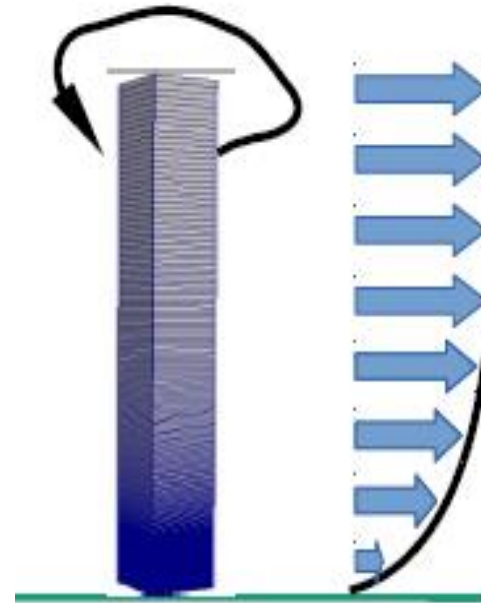
Modelagem da Camada Limite atmosférica em CFD

- Parametrização da simulação
 - Href: 35m
 - Uref: 5 m/s
 - z_0 : 0,03 m (uniforme)
 - Domínio de 3,5 Km x 1 Km
 - Terreno plano
 - Condição neutra
- A simulação não apresentou equilíbrio no escoamento;
- Valores de perfil de velocidade variam sem a existência de uma variação do terreno ou rugosidade.



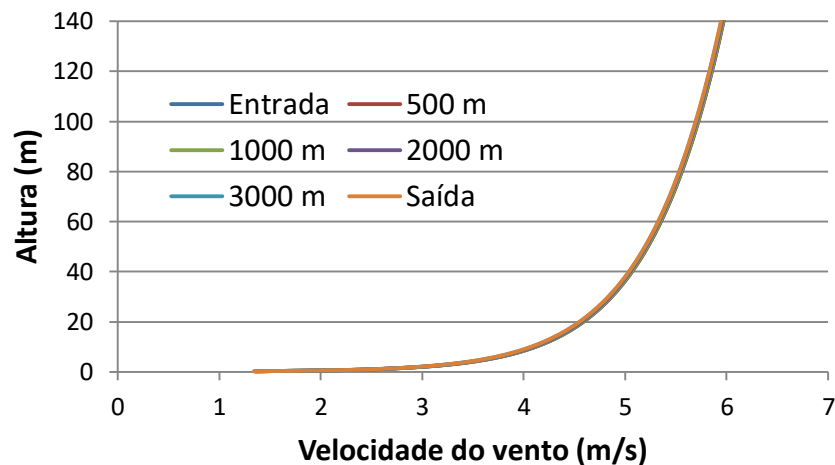
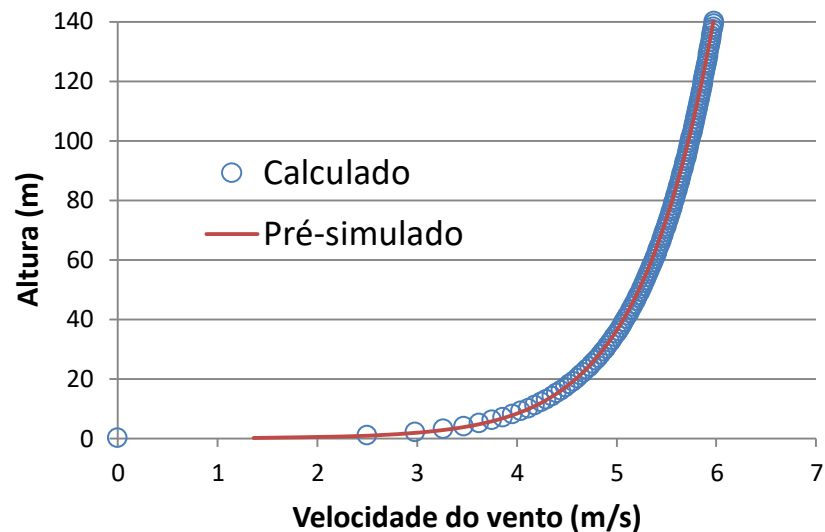
Metodologia criada pelo Instituto FRAUNHOFER IWES

- Estudo sobre a modelagem
 - A simulação depende fortemente das condições contorno;
 - O modelo de turbulência domina a simulação depois de iniciada;
- Gerar perfis iniciais através de uma pré-simulação;
- Utilizar uma simulação unidimensional com as mesmas equações/condições de contorno da simulação 3D.
- Velocidade representativa do perfil utilizada como parâmetro inicial da simulação.
 - $u(z)$
 - $k(z)$
 - $\varepsilon(z)$



Metodologia criada pelo Instituto FRAUNHOFER IWES

- Grande concordância entre o perfil calculado e o perfil modelado pela pré-simulação;
- Os perfis das propriedades k e ε não precisaram ser calculados como parâmetros iniciais.
- A simulação final (3D) apresenta maior equilíbrio no escoamento resolvido;



Modificação da modelagem da CLA – Efeitos da temperatura

- Equação de conservação da energia:

$$\frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \theta) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) + S^t$$

- Inserção da flutuabilidade (*buoyant force*) no modelo k-ε:

$$G_b = -g_i \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

Geração de turbulência devido a flutuabilidade (*buoyant force*)

Definição da constante C_3

Tratamento próximo ao contorno de parede (“terreno”)

- 1º: A produção e dissipação de turbulência precisam estar em equilíbrio;
- 2º: A turbulência devido ao cisalhamento e ao calor dominam o escoamento;
- 3º: A lei de Similaridade deve ser respeitada.

Viscosidade cinemática turbulenta:

$$\nu_t = \frac{\kappa u^* z_p}{\ln(z_p/z_0) - \psi_m(z_p/L)}$$

Condutividade térmica turbulenta:

$$\alpha_t = \frac{\kappa \theta^* z_p}{\ln(z_p/z_0) - \psi_h(z_p/L)}$$



O número de Prandtl turbulento - Pr_t

- Parâmetro utilizado na equação de energia para transformar a tensão de cisalhamento turbulenta em uma representação de fluxo escalar turbulento;
- Na maioria das simulações da CLA, assume-se um valor constante de Pr_t para toda a camada, considerando um comportamento linear para a viscosidade cinemática turbulenta e para a condutividade térmica turbulenta;
- Para CLA estratificada devido a temperatura, o comportamento linear de ambas as propriedades falha em modelar o gradiente vertical de temperatura.

$$Pr_t = \frac{\phi_m(z/L)}{\phi_h(z/L)}$$

$$\phi_m(z/L) = \begin{cases} -4,7 \left(\frac{z}{L}\right), & L > 0 \text{ (atmosfera estável)} \\ \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{-\frac{1}{4}}, & L < 0 \text{ (atmosfera instável)} \end{cases}$$

$$\phi_h(z/L) = \begin{cases} -4,7 \left(\frac{z}{L}\right), & L > 0 \text{ (atmosfera estável)} \\ \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{-\frac{1}{2}}, & L < 0 \text{ (atmosfera instável)} \end{cases}$$

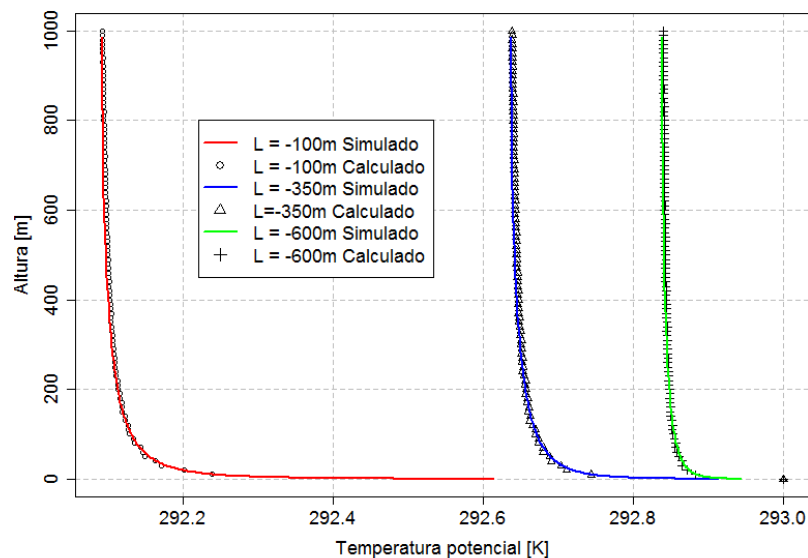
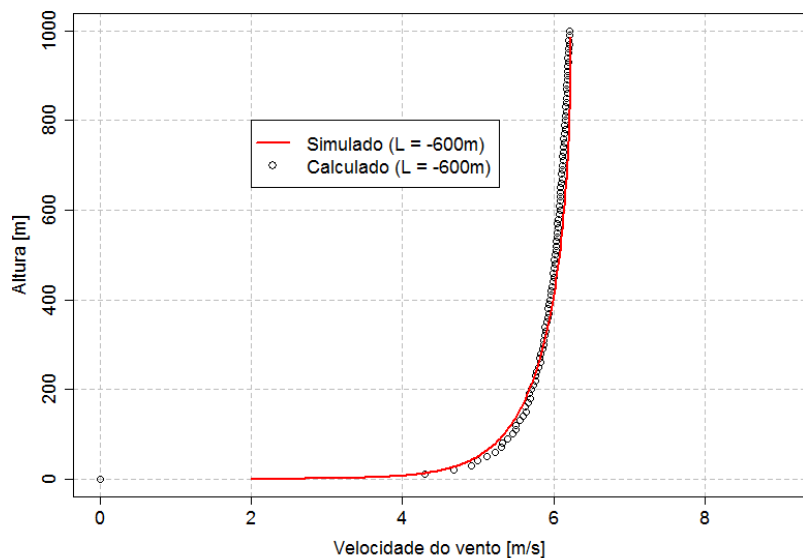
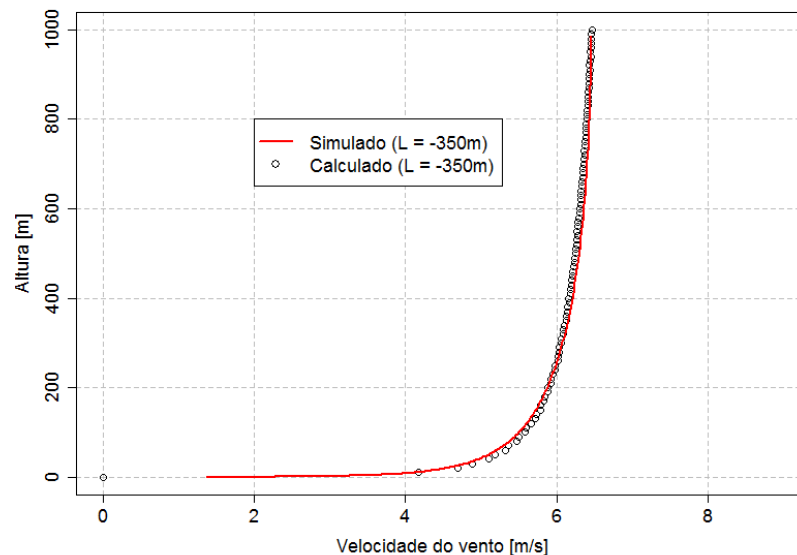
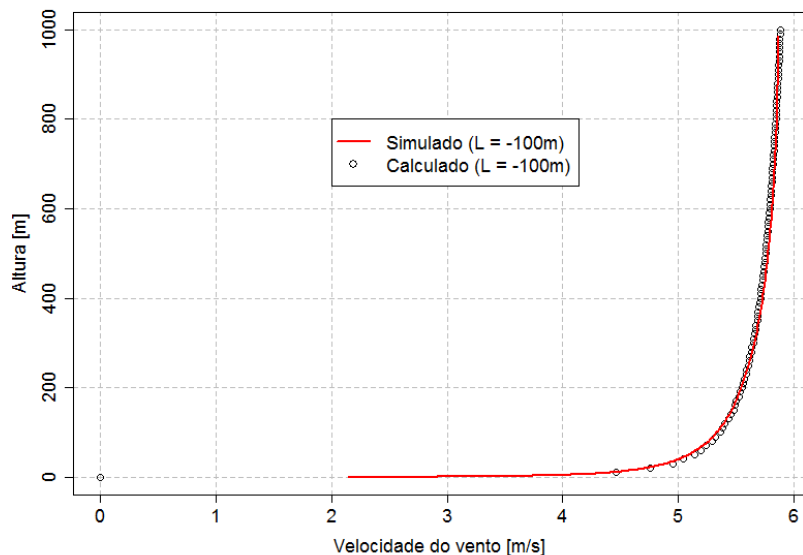
Diagram illustrating the calculation of the turbulent Prandtl number Pr_t based on the stability of the atmosphere:

- For $L > 0$ (atmosphere stable), $Pr_t = 1$.
- For $L < 0$ (atmosphere unstable), $Pr_t = \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{\frac{1}{4}}$.

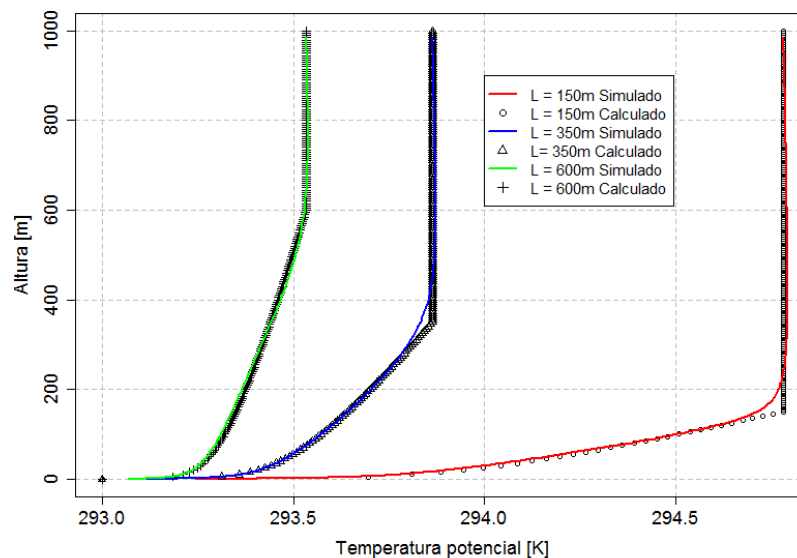
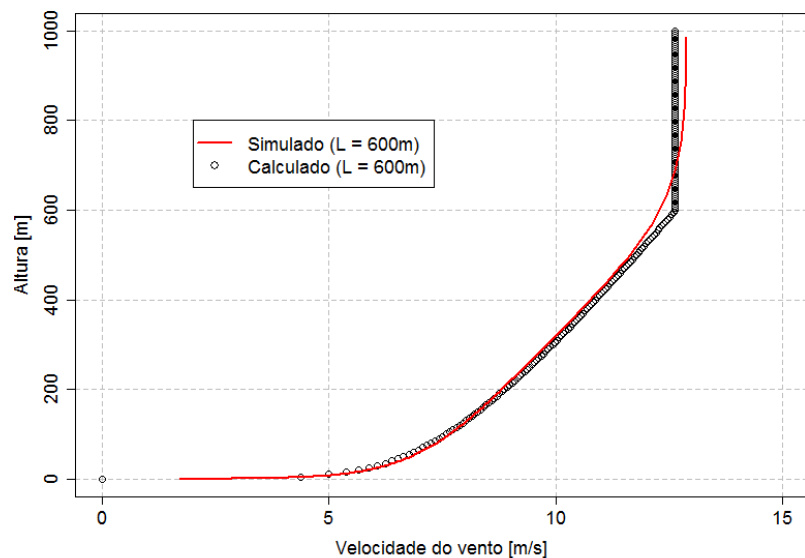
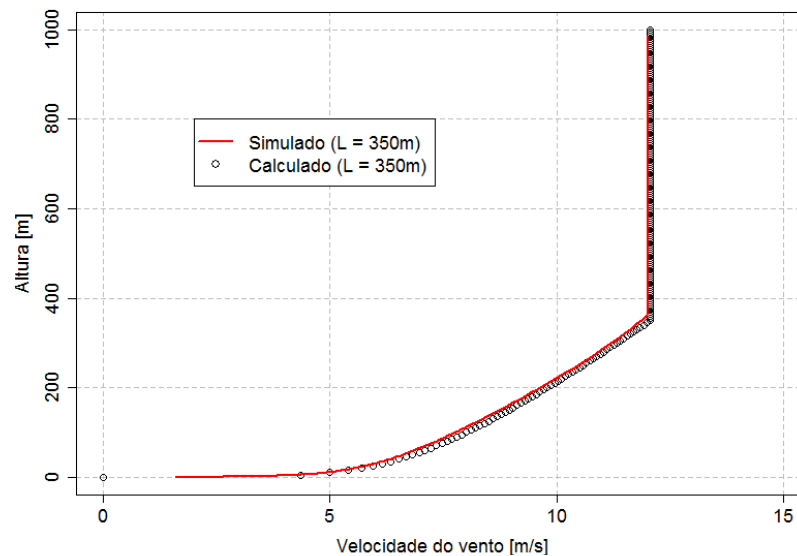
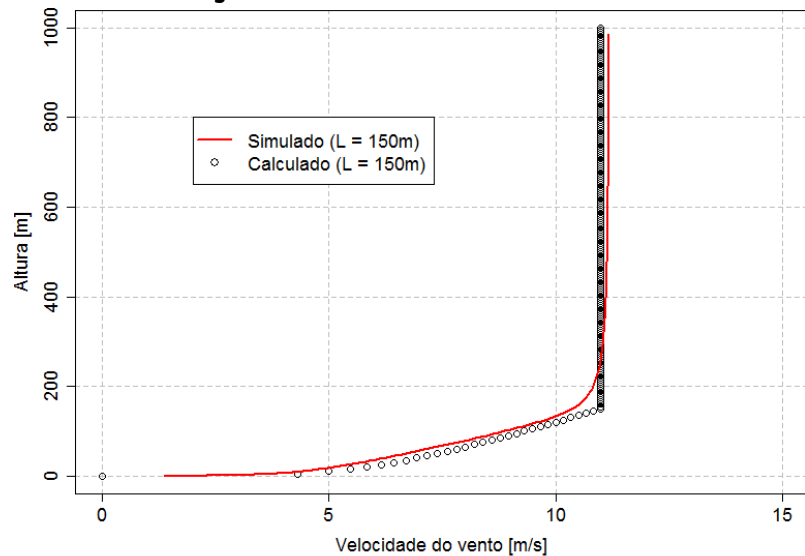
Condições de contorno do topo do domínio

- Condição estável da atmosfera:
 - Fluxo de calor orientado para baixo;
 - No contorno de terreno o fluxo é negativo (problemático para simulações numéricas considerando MVF);
 - Sugerido utilizar valor prescrito de temperatura para os contornos de topo e de terreno do domínio.
- Condição instável da atmosfera:
 - Fluxo de calor orientado para cima;
 - A força de flutuabilidade carrega calor e momento;
 - Nessa condição, a CLA possui quilômetros de extensão;
 - Normalmente, simulações com valor prescrito de temperatura e de velocidade não conseguem cumprir a condição de velocidade vertical “zero” no topo.
 - Sugerido utilizar fluxo prescrito de temperatura para os contornos de topo e de terreno do domínio.

Condições de atmosfera instável



Condições de atmosfera estável



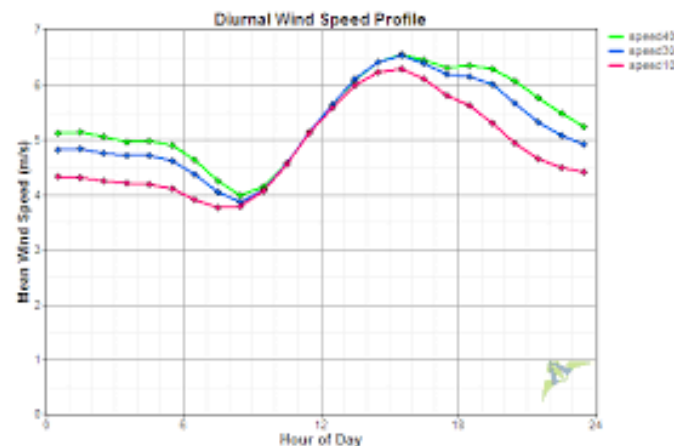
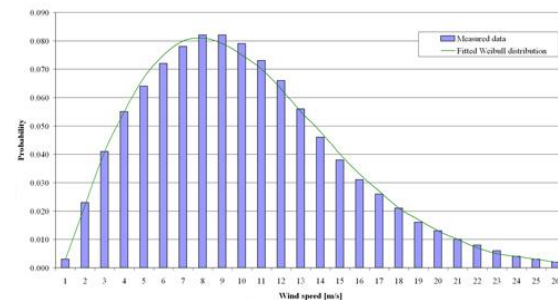
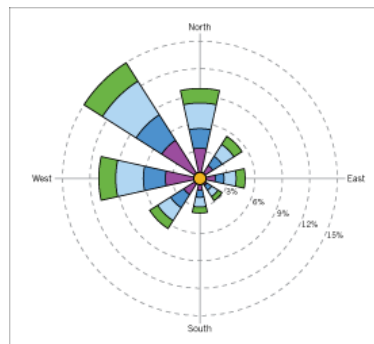
Aplicação da metodologia

- Caso para aplicação:
 - Terreno simples;
 - Diversas condições atmosféricas;
 - Desenvolvimento de ferramenta para tratamento de resultados;
- Parâmetros utilizados nas simulações
 - Total de 6 meses de dados medidos
 - 4 alturas diferentes de medição de velocidade do vento
 - 2 alturas diferentes de medição de temperatura
 - 2 pontos de medição diferentes para validação
 - Área total de 5 km x 5 km

Aplicação da metodologia

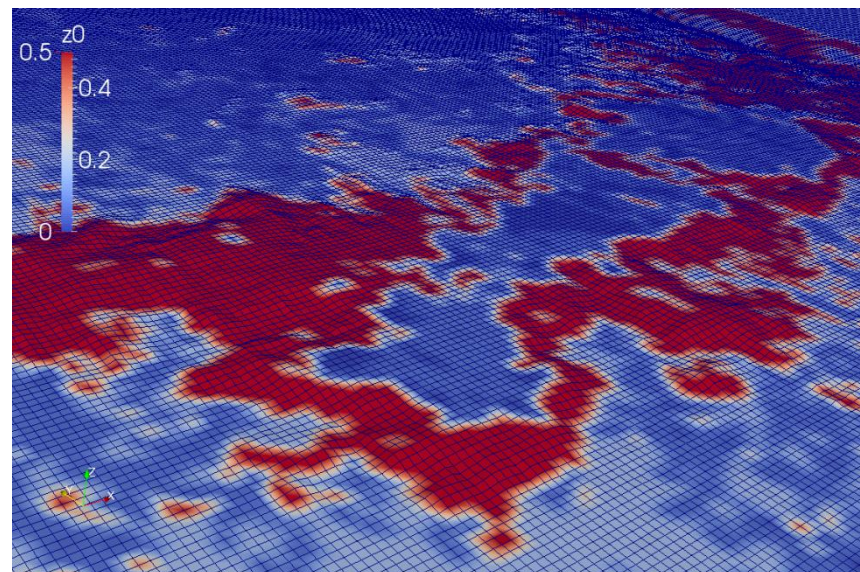
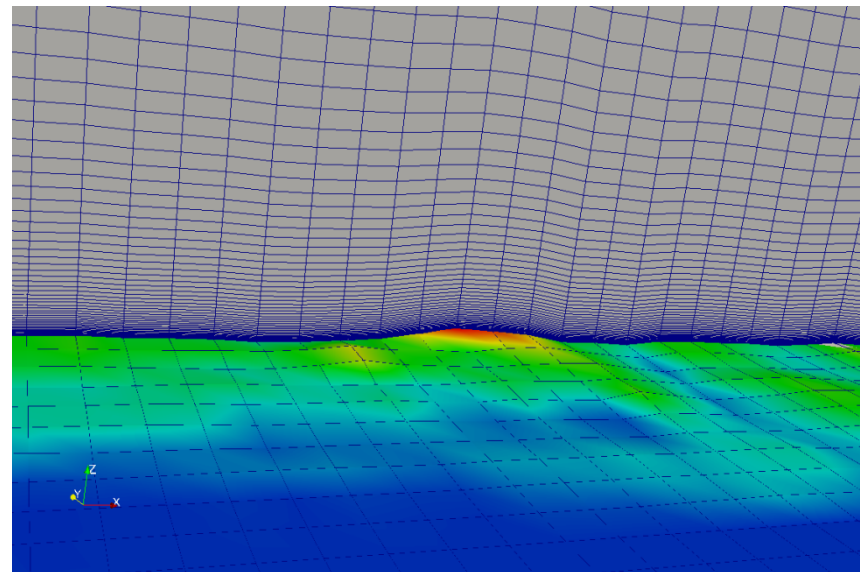
- Análise das medições

- O período diurno foi dividido em duas partes, nas quais predominavam condições atmosféricas diferentes;
- Checagem da necessidade de mais de uma simulação por setor de direção do vento;
- Simulação dos setores de direção do vento com frequências de ocorrências significativas.



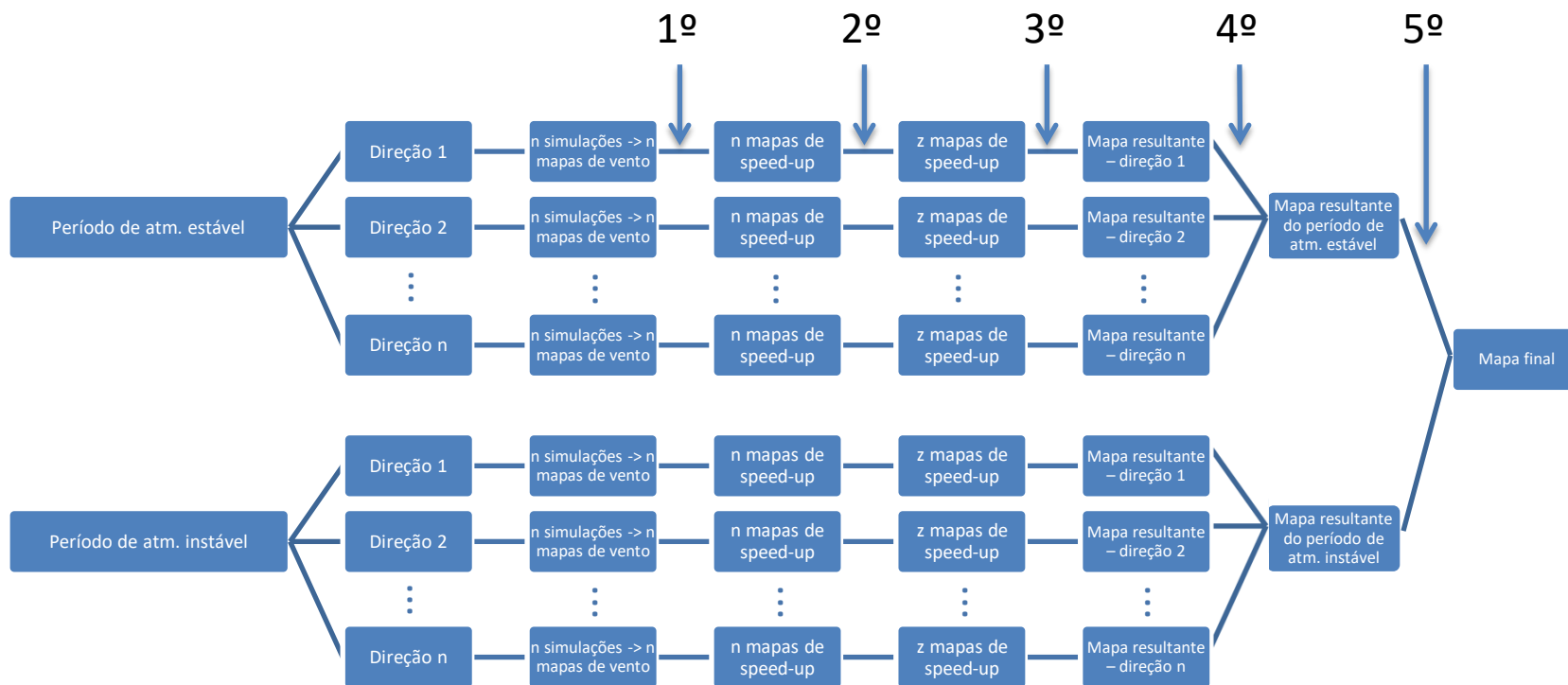
Aplicação da metodologia

- Configurações da simulação
 - Malha computacional gerada pelo aplicativo *terrainBlockMesher*;
 - Mapa de rugosidade gerado pelo aplicativo *roughnessToFoam*;
 - Malha final de 2,6 milhões de células;
 - ✓ Resolução espacial de 50 m X 50 m;
 - ✓ 100% hexa.
 - Domínio circular;
 - Cada simulação com condições de contorno calculadas:
 - ✓ Temperatura do contorno de topo;
 - ✓ Rugosidade z_0 ;
 - ✓ Comprimento de Monin-Obukhov.



Aplicação da metodologia

- 1º: Cálculo de mapas de speed-up;
- 2º: Interpolação para criação de mapas não simulados;
- 3º: Média ponderada entre os mapas de cada direção. Os pesos utilizados correspondem as frequências de ocorrência medidas de cada velocidade de referência;
- 4º: Média Ponderada entre os mapas resultantes de cada direção. Os pesos utilizados correspondem as frequências de ocorrência medidas de cada direção escolhida;
- 5º: Média ponderada entre os mapas resultantes de cada período diurno. Os pesos utilizados correspondem a cada porção do dia referente ao período.



Considerações Finais

- A metodologia Fraunhofer IWES , juntamente com o uso da ferramenta para compilação dos resultados obteve erros menores em comparação com o outro software utilizado;
- O OpenFOAM obteve erros menores do que 1% com relação aos dois pontos de validação, considerando os efeitos de temperatura e atmosfera neutra;

Leonardo de Lima Oliveira
Email: leonardooliveira@ctgas-er.com.br