

## XIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia

# Simulação numérica da ocorrência de Intermitência durante o colapso da turbulência

Numerical Simulation of Intermittency Occurrence During Turbulence Collapse

Luis Fernando Camponogara <sup>1</sup> , Lorena Aparecida Nunes Viana <sup>1</sup> ,  
Rafael Maroneze <sup>1</sup> , Otavio Costa Acevedo <sup>2</sup> , Felipe Denardin Costa <sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia, UNIPAMPA - Campus Alegrete, RS, Brasil  
<sup>2</sup>Universidade de Oklahoma, Oklahoma, EUA

## RESUMO

O presente estudo apresenta o uso de simulações de grandes vórtices na análise da laminarização de um escoamento de Couette plano turbulento, provocado pela aplicação de uma taxa constante de resfriamento na superfície. O aumento da estratificação resulta na diminuição da intensidade da turbulência até a laminarização do escoamento. Durante esse processo, observa-se uma transição de regimes no escoamento, de uma camada fracamente estável para uma camada altamente estável, onde é detectada a presença de intermitência. A consistência dos resultados é investigada por meio da avaliação da energia cinética turbulenta do escoamento. Os resultados indicam que a malha utilizada é adequada, capturando cerca de 80% da energia cinética turbulenta, evidenciando a eficácia do modelo LES na representação do colapso da turbulência. No entanto, os resultados também mostram que são necessários refinamentos adicionais nas superfícies. Ademais, a transição de regimes de escoamento ocorre após o pico absoluto do fluxo de energia na forma de calor na superfície. Após a transição, é observada a ocorrência de intermitência até a supressão de todas as escalas do escoamento turbulento, resultando na laminarização do escoamento.

**Palavras-chave:** CFD; Estratificação; Intermitência; LES; Turbulência

## ABSTRACT

This study presents the use of Large Eddy Simulations (LES) in the analysis of laminarization in a turbulent planar Couette flow, induced by the application of a constant cooling rate at the surface. The increase in stratification leads to a reduction in turbulence intensity until the flow becomes laminar. During this process, a regime transition is observed in the flow, from a weakly stable layer to a highly stable layer, where intermittency is detected. The consistency of the results is investigated through the assessment of the turbulent kinetic energy of the flow. The results indicate that the mesh used is adequate, capturing

approximately 80% of the turbulent kinetic energy, demonstrating the effectiveness of the LES model in representing turbulence collapse. However, the results also show that further refinements are needed near the surfaces. Moreover, the flow regime transition occurs after the absolute peak of heat flux energy at the surface. Following the transition, intermittency is observed until the suppression of all turbulent flow scales, leading to the laminarization of the flow.

**Keywords:** CFD; Estratificação; Intermitência; LES; Turbulência

## 1 INTRODUÇÃO

Durante o dia, devido à convecção natural causada pelo aquecimento da superfície pelo Sol, a força de flutuabilidade atua na geração de turbulência juntamente com o cisalhamento do vento. Porém, após o entardecer a superfície passa a se resfriar e a força de flutuabilidade, que antes atuava na geração da turbulência passa a destruí-la, por efeito da estratificação estável. Nessas condições o cisalhamento do vento é a principal forma para geração da turbulência (Sun et al., 2012). Além disso, a estratificação térmica pode suprimir muitas das escalas de turbulência porém a mesma não desaparece por completo na camada limite estável (CLE) (Mahrt and & Vickers, 2006).

A descrição da transição de regimes na CLE e as condições necessárias para a ocorrência de intermitência no escoamento atmosférico ainda são um desafio. Nesse sentido, estudos numéricos são uma opção viável para o explorar a dinâmica da camada estável devido ao seu baixo custo, menor tempo e possibilidade de controle em experimentos idealizados. O crescente avanço no poder computacional, faz com que os experimentos numéricos se tornem uma cada vez mais utilizados e que possam simular com modelos de turbulência mais realistas, tais como a simulação de grande turbilhões (LES, do inglês Large Eddy Simulation) e a simulação numérica direta (DNS, do inglês Direct Numerical Simulation) (Ansorge and & Mellado, 2014; Donda et al., 2015; Hooijdonk et al., 2014). Outra vantagem na utilização desses experimentos é que por os mesmos serem controlados, eles são livres de escalas maiores.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo utilizar simulação de grandes turbilhões para realizar uma simulação de um escoamento de Couette plano turbulento e observar os efeitos promovidos por uma taxa de resfriamento superficial. Desde a supressão da turbulência do escoamento, pela estratificação, a transição de regimes e o colapso total da turbulência quando o escoamento se torna

completamente laminar. Os limites de validade das simulações LES são analisados em termos da capacidade do modelo em resolver as escalas do escoamento.

## 2 METODOLOGIA

O experimento numérico foi realizado com o software OpenFOAM, uma ferramenta de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD, do inglês Computational Fluid Dynamics) com código aberto. Devido às características do problema, uma simulação da laminarização de um escoamento de Couette plano turbulento, foi escolhido o solver buoyantPimpleFoam. Este solver é especialmente adequado para escoamentos compressíveis, transientes, turbulentos e que envolvem transferência de calor. No contexto da Simulação de Grandes turbilhões (LES), o buoyantPimpleFoam resolve as equações de conservação de massa (Eq. (1)), conservação de momento (Eq. (2)), e conservação de energia (Eq. (3)):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \cdot (2\mu_{eff} D(\vec{V})) - \nabla \left( \frac{2}{3} \mu_{eff} (\nabla \cdot \vec{V}) \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h) + \frac{\partial (\rho \kappa)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \kappa) - \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha_{eff} \nabla h) + \rho \vec{V} \cdot \vec{g}, \quad (3)$$

onde  $\vec{V}$  é o campo de velocidade,  $\rho$  é densidade,  $p$  pressão estática,  $\vec{g}$  aceleração da gravidade,  $\mu_{eff}$  é a soma da viscosidade molecular e turbulenta e o  $D(\vec{V})$  é o tensor taxa de deformação definido pela equação 4.

$$D(\vec{V}) = \frac{1}{2} \left( \nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right) \quad (4)$$

O solver escolhido utiliza o algoritmo PIMPLE, o qual é o mais adequado para regimes transientes conforme Holzmann (2016). Na discretização espacial foi utilizado o método dos volumes finitos, enquanto que, para a integração numérica utilizamos o método implícitos das diferenças finitas de segunda ordem. O número de Courant, adotado como critério de estabilidade, foi de 0,5. Para respeitar essa condição optou se por um passo tempo variável. O domínio computacional apresenta  $(4\pi/h, 2h, (8\pi/3)/h)$

em  $(x, y, z)$  respectivamente. Foi escolhido o valor de  $h = 1$ . A malha possui (126, 100, 126) em  $(x, y, z)$ . Devido a complexidade do escoamento junto as superfícies a altura da grade nessa região, é de 0,0048 m, enquanto no centro a altura é de 0,051 m.

Optou-se pelo modelo de turbulência LES (do inglês, *large eddy simulation*). O modelo em questão calcula os maiores vórtices turbulento e modela os menores através de um filtro de sub-grade (SSG, do inglês *sub-grid scale*). Os turbilhões passam a ser considerados pequenos, quando eles possuem o mesmo tamanho da malha. Foi adotado como SSG o modelo oneEqEddy, ele utiliza para modelar a energia cinética turbulenta uma equação de equilíbrio. Conforme Penttinen et al. (2011), este modelo resolve de maneira similar ao modelo de Smagorinsky, porém foi adicionada uma equação de transporte para a energia cinética turbulenta da SGS, Eq. (5).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(U_i \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu_{Eff} \frac{\partial}{\partial x_i}(\kappa) \right) = -BL - \frac{c_e \kappa^{3/2}}{\Delta} \quad (5)$$

O primeiro termo do lado esquerdo, representa a mudança da energia cinética turbulenta com relação ao tempo dentro da SGS, o segundo termo descreve convecção e o terceiro a difusão. O primeiro termo do lado direito, representa o decaimento e é calculado conforme a Eq. (6) e o segundo termo corresponde a dissipação da turbulência.

$$-BL = 2,0 \nu_{SGS} |\bar{S}|^2 \quad (6)$$

Como condições de contorno, foi adotada a condição de não escorregamento na parede inferior (do inglês *no slip*), já na parede superior foi mantida uma velocidade constante de  $2 \text{ ms}^{-1}$ , durante toda simulação. Bech et al. (1995), afirma que para o calculo do número de Reynolds utiliza-se o centro do domínio, assim, sob essas condições o escoamento tem um  $Re \approx 127000$ . Nas paredes do domínio que são perpendiculares e paralelas à direção do escoamento foram utilizadas condições cíclicas. Inicialmente, a simulação decorreu por um período transiente de 2 h, com a temperatura constante e igual a 300 K, no qual o escoamento se tornou plenamente turbulento. Após o transiente a taxa de resfriamento superficial (Eq. (7)) estabelecida na parede inferior do domínio.

Após o início do resfriamento da superfície a simulação transcorreu por mais 16 h. Os análises da velocidade do escoamento (nas três componentes), energia cinética turbulenta e temperatura foram realizadas com dados em uma única coordenada horizontal no centro do domínio em 39 pontos diferentes ao longo da vertical. Os 11 pontos mais próximos a superfícies inferior e superior apresentam espaçamento de  $dy = 0,01$  m, já o espaçamento entre os outros níveis são de  $dy = 0,1$  m.

$$T_s = -0,00013889t + 301 \quad (7)$$

Onde  $T_s$  é a temperatura na superfície e  $t$  é o tempo da simulação em s. A Eq. (7) representa o decaimento da temperatura numa taxa constante de 1 K a cada 2 h.

### 3 RESULTADOS

Pope (2001) afirma que para uma simulação em LES ser válida, a energia cinética resolvida deve ser maior que 80%. Assim, o índice  $LESIQ_\nu$  (Eq. 8) representa a razão entre a energia cinética turbulenta de subgrade e a energia cinética turbulenta total:

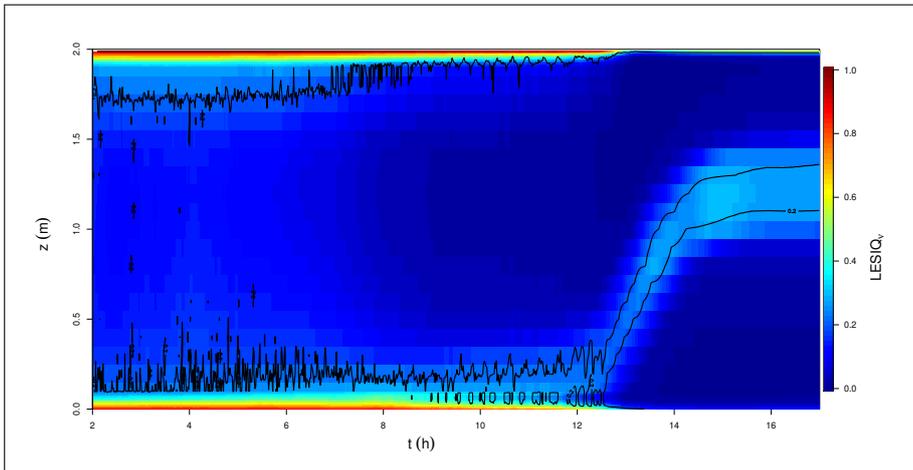
$$LESIQ_\nu = \frac{k_{sgs}}{k_T} \quad (8)$$

Dessa forma,  $LESIQ_\nu$  é o índice que indica se a simulação LES está resolvendo a maior parte das escalas do escoamento ou parametrizando. O  $k_{sgs}$  é energia cinética turbulenta no SGS e o  $k_T = k_{res} + k_{sgs}$  é a energia cinética turbulenta total. Para uma simulação em LES ser válida, o valor do  $LESIQ_\nu$  não deve ser superior a 0,2. Celik et al. (2005) sugeriram que valores entre 0,15 e 0,25 são adequados para aplicações em engenharia.

A Fig. 1 mostra que em grande parte domínio é calculado mais de 80% dos turbilhões, porém devido há grande complexidade junto as superfícies superior e inferior a energia cinética turbulenta dessa região passa a ser mais parametrizada. Foi optado pela não utilização de condições de parede. Freire (2022) sugere que apesar de parametrizar a viscosidade turbulenta  $\nu_t$  próximo à parede, as condições de parede pode vir a contribuir para a melhor representação da turbulência no escoamento, inclusive em condições estáveis. As isolinhas na Fig. 1 mostram o  $LESIQ_\nu = 0,2$ . A medida que a estratificação aumenta, a região parametrizada próxima a camada

inferior também aumenta. Após as 8 h de simulação surgem regiões do domínio onde o valor do  $LESIQ_v < 0,2$  isso caracteriza eventos intermitentes na transição entre escoamentos turbulentos e laminares.

Figura 1 – Evolução temporal de Verificação temporal de  $LESIQ_v$  ao longo da simulação



Fonte: Autores (2023)

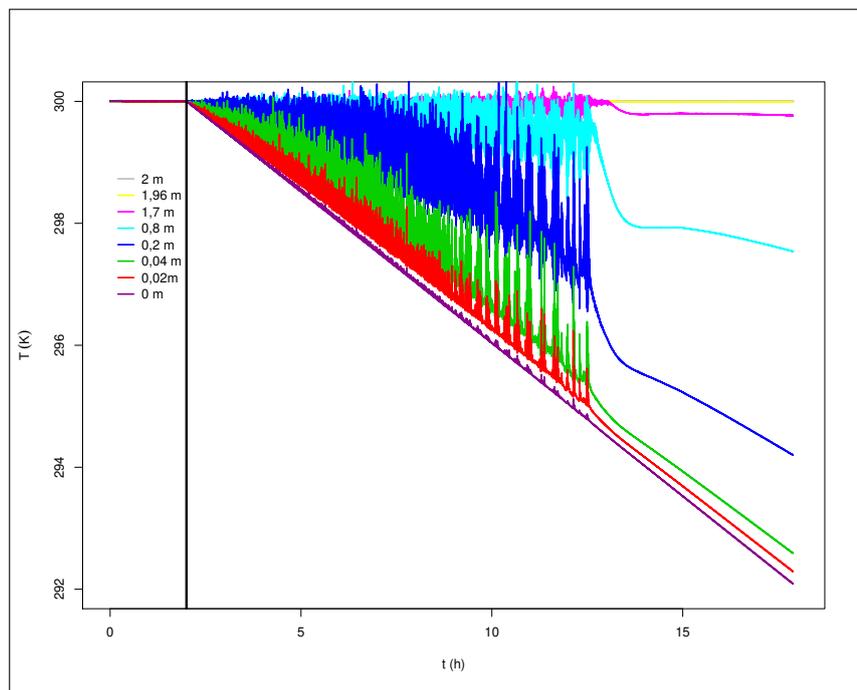
A Fig. 2 apresenta a série temporal da temperatura. Durante o período da simulação a temperatura diminuiu  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  de forma linear nos níveis próximos a superfície inferior, enquanto que nos níveis superiores o decaimento não foi tão acentuado. Após as 8 h surge alguns eventos de turbulência intermitente, com duração aproximada de 300 s. Alguns desses eventos apresentam picos de energia da mesma escala do escoamento anterior ao resfriamento e são percebidos em quase todos os níveis do domínio.

Para as próximas análises, foram adotadas as variáveis localizadas a 20 cm da superfície inferior. Essa escolha se dá devido a maior parte das escalas serem resolvidas nesse nível, enquanto que na proximidade com a superfície inferior a maior parte das escalas do são parametrizadas, conforme discutido na Fig. 1.

Feraco et al. (2018) mostraram que a curtose, que representa o quarto momento estatístico, da velocidade horizontal não consegue identificar a ocorrência de eventos intermitentes, já a curtose de  $w$  e  $T$  sempre que ocorrem eventos de turbulência intermitente é maior que 3. A curtose de  $w$  ( $k_w$ ) pode ser observada na Eq.9.

$$k_w = \frac{\overline{(w - \bar{w})^4}}{\overline{(w - \bar{w})^2}^2}. \quad (9)$$

Figura 2 – Série temporal da temperatura em diferentes níveis, conforme indicados pela legenda

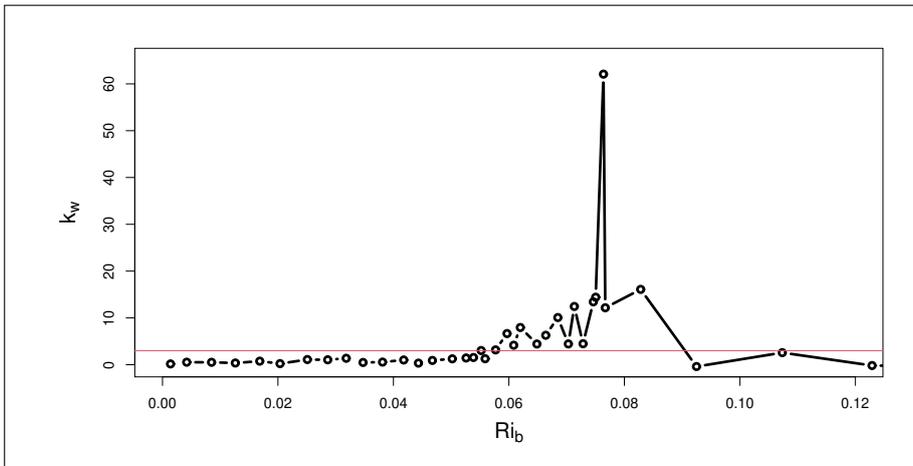


Fonte: Autores (2023)

A Fig. 3 mostra a relação entre as variáveis  $k_w$  e  $Ri_b$  (curtose de  $w$  e Richardson bulk, respectivamente) em uma janela temporal de 10 min. O intervalo em questão foi adotado para que flutuações associadas à janela temporal não interferissem na identificação da transição de regimes. Quando a  $k_w$  é analisada em função de  $Ri_b$  torna-se evidente quando  $k_w$  passa a ser maior que 3 (Fig. 3). Quando  $Ri_b \approx 0,058$  a curtose de  $w$  se torna maior que 3, provando que o escoamento é predominantemente intermitente.

A Fig. 4 se assemelha muito ao esquema proposto por Hooijdonk et al. (2018) da dependência do fluxo de fluabilidade com o número de Richardson. O fluxo de fluabilidade na parede foi determinado como:  $g/T_0(\delta T_s/\delta t)\delta z$ . O termo entre os parênteses é a taxa de resfriamento superficial (determinada na simulação) e  $\delta z$  a altura do domínio. O fluxo de fluabilidade na parede é apresentado pela linha horizontal da Fig. 4, enquanto a linha vertical representa o valor de  $Ri_b$ , obtido anteriormente. Todos os valores à esquerda da linha vertical estão associados ao regime de turbulência contínua, enquanto os valores à direita estão sujeitos a um regime de escoamento com turbulência intermitente e colapsando para um regime laminar.

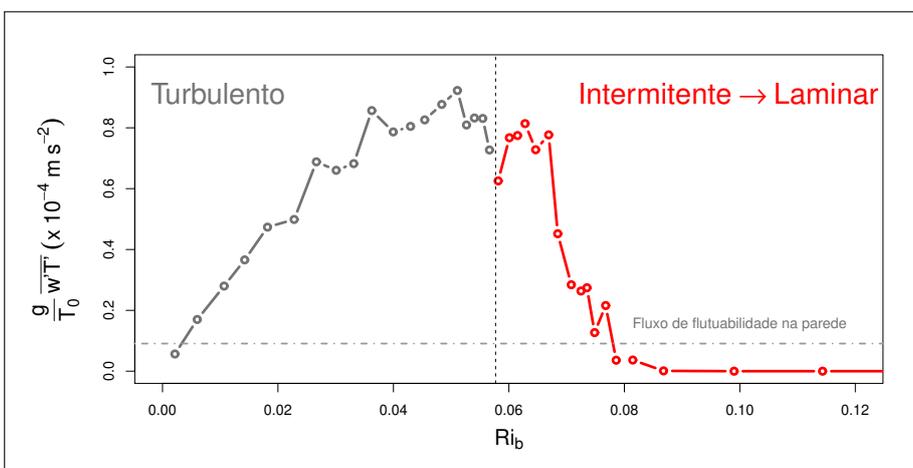
Figura 3 – Evolução da curtose de  $w$ , no nível de 20 cm acima superfície, com o número de Richardson bulk



Fonte: Autores (2023)

Com o aumento de  $Ri_b$ , observa-se um crescimento no fluxo de fluabilidade, apesar da redução da turbulência pelo aumento da estratificação. Esse fenômeno pode ser explicado pelo aumento do gradiente de temperatura, que mantém o fluxo elevado, apesar da redução na mistura, até alcançar um valor máximo. No entanto, após atingir esse valor, o fluxo começa a diminuir em função dos eventos de turbulência intermitente. Os eventos intermitentes transportam a energia térmica das regiões superiores para as inferiores do domínio. Vale destacar que o fluxo máximo não coincide com a transição de regime, conforme ilustrado na Fig. 4.

Figura 4 – Dependência do fluxo de fluabilidade com o número de Richardson bulk. A linha pontilhada na vertical indica o valor de  $Ri_b$  onde ocorre a transição determinada pela curtose  $w$



Fonte: Autores (2023)

## 4 CONCLUSÃO

No presente trabalho o colapso da turbulência em um escoamento estratificado é estudado através da utilização de uma simulação numérica transiente utilizando simulação de grandes turbilhões. A validação foi feita através da análise da malha, que na maior parte do domínio maioria, o modelo é capaz de resolver mais de 80% da energia cinética turbulenta. Por outro lado, há alguns pontos, principalmente próximo à superfícies, onde a maior parte da energia foi parametrizada indicando que a malha deve ser refinada, ou deve ser implementada uma função de parede para promover mais turbulência e evitar que a região parametrização se estenda para longe das superfícies limitantes.

Os resultados também mostram que a transição entre regimes de escoamento durante o regime turbulento estratificado ocorreu após o pico no fluxo de calor sensível. Além disso, a intermitência foi observada apenas na camada fracamente turbulenta, durante a evolução para a laminarização do escoamento. É importante destacar que são necessárias análises adicionais, que podem incluir observações atmosféricas, experimentos em túnel de vento e simulações de outros casos. Além disso, é essencial melhorar a qualidade da simulação, especialmente nas superfícies do domínio.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem às agências de fomento à pesquisa Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (FDC auxílio nº 312929/2022-6), e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

## REFERÊNCIAS

Ansorge, C. & Mellado, J. P. (2014). Global intermittency and collapsing turbulence in the stratified planetary boundary layer. *Boundary-layer meteorology*, 153(1):89–116.

- Bech, K. H., Tillmark, N., Alfredsson, P. H., & Andersson, H. I. (1995). An investigation of turbulent plane couette flow at low reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 286:291–325.
- Celik, I. B., Cehreli, Z. N., & Yavuz, I. (2005). Index of Resolution Quality for Large Eddy Simulations. *Journal of Fluids Engineering*, 127(5):949–958.
- Donda, J., Van Hooijdonk, I., Moene, A., Jonker, H., van Heijst, G., Clercx, H., & van de Wiel, B. (2015). Collapse of turbulence in stably stratified channel flow: a transient phenomenon. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(691):2137–2147.
- Feraco, F., Marino, R., Pumir, A., Primavera, L., Mininni, P. D., Pouquet, A., & Rosenberg, D. (2018). Vertical drafts and mixing in stratified turbulence: Sharp transition with froude number. *EPL(Europhysics Letters)*, 123(4), 44002.
- Freire, L. S. (2022). Large-Eddy Simulation of the Atmospheric Boundary Layer with Near-Wall Resolved Turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 1-19.
- Holzmann, T. (2016). *Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFOAM®*. Loeben, Germany: Holzmann CFD. Recovered from: <https://holzmann-cfd>.
- Hooijdonk, I. G., Clercx, H. J., Ansorge, C., Moene, A. F., & Wiel, B. J. (2018). Parameters for the collapse of turbulence in the stratified plane couette flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 75(9):3211–3231.
- Hooijdonk, I. G., Donda, J. M., Clercx, H. J., Bosveld, F. C., & Wiel, B. J. (2014). Shear capacity as prognostic of nocturnal boundary layer regimes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72(4):1518–1532.
- Mahrt, L. & Vickers, D. (2006). Extremely weak mixing in stable conditions. *Boundary-layer meteorology*, 119(1):19–39.
- Penttinen, O., Yasari, E., & Nilsson, H. (2011). A pimplefoam tutorial for channel flow, with respect to different les models. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 23(2):1–23.

Pope, S. B. (2001). *Turbulent flows*.

Sun, J., Mahrt, L., Banta, R. M., & Pichugina, Y. L. (2012). Turbulence regimes and turbulence intermittency in the stable boundary layer during cases-99. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(1):338–351.

## **Contribuições dos autores**

### **1 – Luis Fernando Camponogara**

Mestre em Engenharia

<https://orcid.org/0000-0002-1065-4265> • [lfcamponogara@gmail.com](mailto:lfcamponogara@gmail.com)

Contribution: Conceituação, Escrita - Primeira redação

### **2 – Lorena Aparecida Nunes Viana**

Mestre em Engenharia

<https://orcid.org/0000-0002-5997-6783> • [lorenanviana@gmail.com](mailto:lorenanviana@gmail.com)

Contribution: Escrita - Primeira redação

### **3 – Rafael Maroneze**

Dr. em Física

<https://orcid.org/0000-0002-3025-9676> • [rafaelmaroneze@gmail.com](mailto:rafaelmaroneze@gmail.com)

Contribution: Escrita - Revisão e edição

### **4 – Otavio Costa Acevedo**

Dr. em Ciências Atmosféricas

<https://orcid.org/0000-0003-2606-4726> • [otavio@ufsm.br](mailto:otavio@ufsm.br)

Contribution: Escrita - Revisão e edição

### **5 – Felipe Denardin Costa**

Dr. em Física

<https://orcid.org/0000-0003-0004-7100> • [felipecosta@unipampa.edu.br](mailto:felipecosta@unipampa.edu.br)

Contribution: Supervisor

## **Como citar este artigo**

Camponogara, L. F., Viana, L. A. N., Maroneze, R., Acevedo, O. C., & Costa, F. D. (2024). Simulação numérica da ocorrência de Intermitência durante o colapso da turbulência. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 46, esp. 2, e87947. <https://doi.org/10.5902/2179460X87947>