

# Turbulência como Multifluxo: Uma Nova Perspectiva Conceitual Aprofundada (Versão 4.0)

---

**Autor / Author:** Diogenes Duarte Sobral **Data / Date:** Novembro de 2025 / November 2025

## Resumo Executivo / Executive Summary

---

A turbulência, tradicionalmente definida em contraste ao fluxo laminar, tem sua verdadeira natureza obscurecida por essa dicotomia simplista. Este artigo propõe uma redefinição fundamental: o **Fluxo Turbulento (Turbulent Flow)** deve ser entendido como **Multifluxo (Multiflux)** — uma superposição de múltiplos fluxos laminares locais (subfluxos) com direções, velocidades e escalas distintas. A aparente desordem macroscópica da turbulência emerge da interação não-linear entre esses subfluxos, cada um dos quais obedece, localmente, às leis do escoamento viscoso ordenado. Formalizamos esta visão através de uma decomposição do campo de velocidade e exploramos as implicações para a modelagem e o controle de escoamentos.

Turbulence, traditionally defined in contrast to laminar flow, has its true nature obscured by this simplistic dichotomy. This paper proposes a fundamental redefinition: **Turbulent Flow** should be understood as **Multiflux** — a superposition of multiple local laminar flows (subflows) with distinct directions, velocities, and scales. The apparent macroscopic disorder of turbulence emerges from the non-linear interaction between these subflows, each of which locally obeys the laws of ordered viscous flow. We formalize this view through a velocity field decomposition and explore the implications for modeling and flow control.

---

## 5. Licença e Nota de Esclarecimento

---

### Versão em Português (BR)

---

Esta obra está licenciada sob a **Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Compartilhável 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)**.



Isso significa que você tem a liberdade de:

- **Compartilhar** — copiar e redistribuir o material em qualquer suporte ou formato.
- **Adaptar** — remixar, transformar, e criar a partir do material.

Sob os seguintes termos:

- **Atribuição (BY)** — Você deve dar o crédito apropriado, prover um link para a licença e indicar se foram feitas alterações.
- **Não Comercial (NC)** — Você não pode usar o material para fins comerciais sem autorização prévia do autor.
- **Compartilhável (SA)** — Se você remixar, transformar, ou criar a partir do material, tem de distribuir as suas contribuições sob a mesma licença que o original.

**Nota de Esclarecimento sobre a Licença:** A menção anterior e vaga de “Creative Commons 4.0” foi corrigida para refletir os termos pretendidos pelo autor desde o início. Os termos desta licença (Atribuição, Uso Não Comercial, Compartilhamento pela mesma licença) aplicam-se a todos os novos usos a partir desta data.

---

### English Version (International)

---

This work is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-NC-SA 4.0)**.



This means you are free to:

- **Share** — copy and redistribute the material in any medium or format.
- **Adapt** — remix, transform, and build upon the material.

Under the following terms:

- **Attribution (BY)** — You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made.
- **NonCommercial (NC)** — You may not use the material for commercial purposes without prior permission from the author.
- **ShareAlike (SA)** — If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the same license as the original.

***License Clarification Note:*** *The previous, vague mention of “Creative Commons 4.0” has been corrected to reflect the author’s intended terms from the outset. The terms of this license (Attribution, NonCommercial, ShareAlike) apply to all new uses from this date forward.*

---

## 1. Fundamentos e Definições Revisadas / Fundamentals and Revised Definitions

---

A mecânica dos fluidos clássica estabelece uma separação clara entre o Fluxo Laminar (Laminar Flow) (movimento ordenado em camadas paralelas) e o Fluxo Turbulento (Turbulent Flow) (movimento irregular e caótico). A nova perspectiva do Multifluxo busca unificar esses conceitos sob um princípio comum: a ordem local.

Classical fluid mechanics establishes a clear separation between Laminar Flow (ordered movement in parallel layers) and Turbulent Flow (irregular and chaotic movement). The new Multiflux perspective seeks to unify these concepts under a common principle: local order.

## 1.1. A Analogia da Gota: Ordem Emergente / The Drop Analogy: Emerging Order

Para ilustrar a emergência da ordem a partir de uma perturbação, podemos recorrer à analogia de uma **gota caindo em um lago sereno**.

A gota, ao impactar a superfície, é uma perturbação de força conhecida e direção definida. O movimento resultante — a formação de ondas circulares concêntricas que se propagam para fora — é **perfeitamente previsível e ordenado**. A energia da perturbação é transmitida de forma coerente, mantendo a forma da onda.

Esta analogia serve como um modelo intuitivo para o **subfluxo laminar** na teoria do Multifluxo:

- **A Onda:** Representa um **subfluxo laminar** em seu domínio local, um movimento ordenado e previsível.
- **A Propagação:** Demonstra que a energia de uma perturbação pode ser transmitida de forma coerente e não caótica.

A turbulência, sob a ótica do Multifluxo, não é o oposto dessa ordem, mas sim o resultado da **superposição e interação não-linear de inúmeras “ondas”** (subfluxos) que se cruzam e se realimentam em um domínio tridimensional. O caos aparente é, na verdade, a soma complexa de múltiplas ordens locais.

---

## 5. Licença e Nota de Esclarecimento

---

### Versão em Português (BR)

---

Esta obra está licenciada sob a **Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Compartilhável 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)**.



Isso significa que você tem a liberdade de:

- **Compartilhar** — copiar e redistribuir o material em qualquer suporte ou formato.

- **Adaptar** — remixar, transformar, e criar a partir do material.

Sob os seguintes termos:

- **Atribuição (BY)** — Você deve dar o crédito apropriado, prover um link para a licença e indicar se foram feitas alterações.
- **Não Comercial (NC)** — Você não pode usar o material para fins comerciais sem autorização prévia do autor.
- **Compartilhamento (SA)** — Se você remixar, transformar, ou criar a partir do material, tem de distribuir as suas contribuições sob a mesma licença que o original.

***Nota de Esclarecimento sobre a Licença:** A menção anterior e vaga de “Creative Commons 4.0” foi corrigida para refletir os termos pretendidos pelo autor desde o início. Os termos desta licença (Atribuição, Uso Não Comercial, Compartilhamento pela mesma licença) aplicam-se a todos os novos usos a partir desta data.*

---

## English Version (International)

---

This work is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-NC-SA 4.0)**.



This means you are free to:

- **Share** — copy and redistribute the material in any medium or format.
- **Adapt** — remix, transform, and build upon the material.

Under the following terms:

- **Attribution (BY)** — You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made.
- **NonCommercial (NC)** — You may not use the material for commercial purposes without prior permission from the author.
- **ShareAlike (SA)** — If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the same license as the original.

**License Clarification Note:** The previous, vague mention of “Creative Commons 4.0” has been corrected to reflect the author’s intended terms from the outset. The terms of this license (Attribution, NonCommercial, ShareAlike) apply to all new uses from this date forward.

---

## 2. O Fluxo Laminar como Base da Ordem Global / Laminar Flow as the Basis of Global Order

---

O fluxo laminar é o estado fundamental do escoamento. O exemplo canônico é o escoamento de Poiseuille em um tubo cilíndrico, onde a solução é obtida a partir de uma simplificação da Equação de Navier-Stokes.

Laminar flow is the fundamental state of fluid motion. The canonical example is Poiseuille flow in a cylindrical pipe, where the solution is obtained from a simplification of the Navier-Stokes Equation.

### 2.1. Equação de Poiseuille / Poiseuille Equation

Para um escoamento incompressível, newtoniano, permanente e totalmente desenvolvido em um tubo, a Equação de Navier-Stokes se reduz a um balanço entre a força de pressão e a força viscosa:

For an incompressible, Newtonian, steady, and fully developed flow in a pipe, the Navier-Stokes Equation reduces to a balance between the pressure force and the viscous force:

[FÓRMULA 2.1: Equação de Poiseuille - Balanceamento de Forças]

Onde / Where:

- $v_x$  é a componente da velocidade na direção axial ( $x$ ). /  $v_x$  is the velocity component in the axial direction ( $x$ ).
- $p$  é a pressão. /  $p$  is the pressure.
- $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido. /  $\mu$  is the dynamic viscosity of the fluid.
- $r$  é a coordenada radial. /  $r$  is the radial coordinate.

## 2.2. Solução (Perfil Parabólico) / Solution (Parabolic Profile)

A solução para esta equação, com as condições de contorno de velocidade nula na parede ( $v_x(R) = 0$ ) e simetria no centro, resulta no perfil de velocidade parabólico de Hagen-Poiseuille:

The solution to this equation, with the boundary conditions of zero velocity at the wall ( $v_x(R) = 0$ ) and symmetry at the center, results in the parabolic Hagen-Poiseuille velocity profile:

$$[\text{FÓRMULA 2.2: Perfil de Velocidade Parabólico} - v_x(r) = \frac{\Delta p}{4\mu L}(R^2 - r^2)]$$

Este perfil demonstra a ordem global do fluxo laminar, onde o movimento das partículas é determinado pelo arrasto viscoso das camadas adjacentes, resultando em trajetórias paralelas e previsíveis.

This profile demonstrates the global order of laminar flow, where the movement of particles is determined by the viscous drag of adjacent layers, resulting in parallel and predictable trajectories.

## 3. Turbulência como Decomposição em Multifluxo / Turbulence as Multiflux Decomposition

---

A turbulência não é um estado de “caos aleatório”, mas sim uma manifestação de estruturas coerentes que são localmente laminares, mas globalmente desalinhadas. Estruturas como vórtices em ferradura (*hairpin vortices*), faixas de alta/baixa velocidade (*streaks*) e camadas de cisalhamento instáveis são evidências desses subfluxos.

Turbulence is not a state of “random chaos,” but rather a manifestation of coherent structures that are locally laminar but globally misaligned. Structures such as hairpin vortices, high/low-speed streaks, and unstable shear layers are evidence of these subflows.

### 3.1. Decomposição do Campo de Velocidade / Velocity Field Decomposition

Propomos que o campo de velocidade turbulento  $\vec{v}(\vec{x}, t)$  possa ser decomposto em uma soma finita de  $N$  subfluxos laminares locais  $\vec{v}_i(\vec{x}, t)$ :

We propose that the turbulent velocity field  $\vec{v}(\vec{x}, t)$  can be decomposed into a finite sum of  $N$  local laminar subflows  $\vec{v}_i(\vec{x}, t)$ :

$$[\text{FÓRMULA 3.1: Decomposição do Campo de Velocidade - } \vec{v}(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^N \vec{v}_i(\vec{x}, t)]$$

Onde cada  $\vec{v}_i$  representa um subfluxo laminar em um domínio local  $\Omega_i$ , com uma direção principal  $\hat{n}_i$  distinta.

Where each  $\vec{v}_i$  represents a laminar subflow in a local domain  $\Omega_i$ , with a distinct main direction  $\hat{n}_i$ .

### 3.2. Equação Local (Aproximada) / Local Equation (Approximate)

Em seu domínio local  $\Omega_i$ , cada subfluxo  $\vec{v}_i$  é aproximadamente governado por uma forma linearizada da Equação de Navier-Stokes, semelhante ao fluxo laminar, mas com um gradiente de pressão local  $\nabla p_i$ :

In its local domain  $\Omega_i$ , each subflow  $\vec{v}_i$  is approximately governed by a linearized form of the Navier-Stokes Equation, similar to laminar flow, but with a local pressure gradient  $\nabla p_i$ :

$$[\text{FÓRMULA 3.2: Equação Local Aproximada - } \rho \frac{D\vec{v}_i}{Dt} \approx -\nabla p_i + \mu \nabla^2 \vec{v}_i \text{ em } \Omega_i]$$

Onde  $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{v}_i \cdot \nabla)$  é a derivada material. Esta equação descreve a ordem local de cada subfluxo.

Where  $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{v}_i \cdot \nabla)$  is the material derivative. This equation describes the local order of each subflow.

### 3.3. A Origem da Turbulência: Interação Não-Linear / The Origin of Turbulence: Non-Linear Interaction

A turbulência, ou o Multifluxo, emerge da interação entre esses subfluxos. A Equação de Navier-Stokes completa para o campo total  $\vec{v}$  é:

Turbulence, or Multiflux, emerges from the interaction between these subflows. The complete Navier-Stokes Equation for the total field  $\vec{v}$  is:

$$[\text{FÓRMULA 3.3: Equação de Navier-Stokes Completa} - \rho(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f}]$$

Substituindo a decomposição  $\vec{v} = \sum \vec{v}_i$  no termo de convecção não-linear  $(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}$ , obtemos:

Substituting the decomposition  $\vec{v} = \sum \vec{v}_i$  into the non-linear convection term  $(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}$ , we obtain:

$$[\text{FÓRMULA 3.4: Termo de Convecção Decomposto} - (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \sum_i \sum_j (\vec{v}_i \cdot \nabla) \vec{v}_j]$$

O termo de interação, responsável pela transferência de energia entre as escalas (cascata de energia de Kolmogorov), é dado por:

The interaction term, responsible for the energy transfer between scales (Kolmogorov energy cascade), is given by:

$$[\text{FÓRMULA 3.5: Interação Não-Linear} - \sum_{i \neq j} (\vec{v}_i \cdot \nabla) \vec{v}_j]$$

Este termo demonstra que a turbulência não é uma propriedade intrínseca de um único fluxo, mas sim o resultado da convecção de um subfluxo pelo campo de velocidade de outro subfluxo. A não-linearidade da Equação de Navier-Stokes, portanto, não “esconde” a turbulência, mas sim descreve o mecanismo de acoplamento dos subfluxos.

This term demonstrates that turbulence is not an intrinsic property of a single flow, but rather the result of the convection of one subflow by the velocity field of another subflow. The non-linearity of the Navier-Stokes Equation, therefore, does not “hide” turbulence, but rather describes the coupling mechanism of the subflows.

## 4. Implicações Práticas e Modelagem / Practical Implications and Modeling

---

A visão do Multifluxo oferece novas abordagens para a modelagem e o controle de escoamentos turbulentos.

The Multiflux view offers new approaches for modeling and controlling turbulent flows.

[TABELA 4.1: Aplicações e Benefícios do Modelo Multifluxo]

<b>Aplicação / Application</b>	<b>Desafio Clássico / Classical Challenge</b>	<b>Benefício do Modelo Multifluxo / Benefit of Multiflux Model</b>
<b>LES (Large Eddy Simulation)</b>	Modelagem do termo de tensão de sub-rede (SGS) como um termo de difusão. / Modeling the subgrid-scale (SGS) stress term as a diffusion term.	Modelar grandes vórtices (eddies) como subfluxos laminares $\vec{v}_i$ e o termo SGS como a interação não-linear residual. Isso permite uma formulação mais física e menos empírica. / Model large vortices (eddies) as laminar subflows $\vec{v}_i$ and the SGS term as the residual non-linear interaction. This allows for a more physical and less empirical formulation.
<b>Controle Ativo de Arrasto / Active Drag Control</b>	Dificuldade em prever e suprimir flutuações aleatórias. / Difficulty in predicting and suppressing random fluctuations.	O objetivo passa a ser alinhar os subfluxos. Técnicas como injeção direcional de momento ou uso de superfícies ativas podem ser usadas para forçar $\hat{n}_i \approx \hat{n}_j$ , reduzindo o termo de interação e, consequentemente, o arrasto. / The goal shifts to aligning the subflows. Techniques like targeted momentum injection or the use of active surfaces can be used to force $\hat{n}_i \approx \hat{n}_j$ , reducing the interaction term and consequently the drag.
<b>Ensino de Fluidos / Fluid Mechanics Education</b>	O conceito de “caos” e “flutuações aleatórias” é abstrato e contra-intuitivo. / The concept of “chaos” and “random fluctuations” is abstract and counter-intuitive.	A turbulência é apresentada como a soma de ordens locais (subfluxos), tornando o conceito mais intuitivo e tangível para estudantes. / Turbulence is presented as the sum of local orders (subflows), making the concept more intuitive and tangible for students.

## 5. Licença e Nota de Esclarecimento

---

### Versão em Português (BR)

---

Esta obra está licenciada sob a **Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Compartilhável 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)**.



Isso significa que você tem a liberdade de:

- **Compartilhar** — copiar e redistribuir o material em qualquer suporte ou formato.
- **Adaptar** — remixar, transformar, e criar a partir do material.

Sob os seguintes termos:

- **Atribuição (BY)** — Você deve dar o crédito apropriado, prover um link para a licença e indicar se foram feitas alterações.
- **Não Comercial (NC)** — Você não pode usar o material para fins comerciais sem autorização prévia do autor.
- **Compartilhável (SA)** — Se você remixar, transformar, ou criar a partir do material, tem de distribuir as suas contribuições sob a mesma licença que o original.

**Nota de Esclarecimento sobre a Licença:** A menção anterior e vaga de “Creative Commons 4.0” foi corrigida para refletir os termos pretendidos pelo autor desde o início. Os termos desta licença (Atribuição, Uso Não Comercial, Compartilhamento pela mesma licença) aplicam-se a todos os novos usos a partir desta data.

---

### English Version (International)

---

This work is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-NC-SA 4.0)**.



This means you are free to:

- **Share** — copy and redistribute the material in any medium or format.
- **Adapt** — remix, transform, and build upon the material.

Under the following terms:

- **Attribution (BY)** — You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made.
- **NonCommercial (NC)** — You may not use the material for commercial purposes without prior permission from the author.
- **ShareAlike (SA)** — If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the same license as the original.

***License Clarification Note:*** *The previous, vague mention of “Creative Commons 4.0” has been corrected to reflect the author’s intended terms from the outset. The terms of this license (Attribution, NonCommercial, ShareAlike) apply to all new uses from this date forward.*

---