



# COMPLEXIDADE EXPLICADA

#ComplexidadeExplicada  
#ComplexityExplained

---

# CONTEÚDO

<b>1</b>	Interações	4
<b>2</b>	Emergência	6
<b>3</b>	Dinâmica	8
<b>4</b>	Auto-organização	10
<b>5</b>	Adaptação	12
<b>6</b>	Interdisciplinariedade	14
<b>7</b>	Métodos	16

# COMPLEXIDADE EXPLICADA



*"Não existe amor em um átomo de carbono,  
nem furacão em uma molécula de água,  
nem colapso financeiro em uma nota de um dólar"*  
– Peter Dodds

A ciência da complexidade, também chamada de ciência dos sistemas complexos, estuda como um grande conjunto de componentes — interagindo localmente entre si em pequenas escalas — pode espontaneamente se auto-organizar para exibir estruturas globais não-triviais e comportamentos em escalas maiores, frequentemente sem intervenção externa, autoridades centrais ou líderes. As propriedades do conjunto não necessariamente podem ser entendidas ou antecipadas através do conhecimento apenas das partes constituintes. Um conjunto deste tipo é chamado de sistema complexo e requer novas ferramentas matemáticas e metodologias científicas para sua investigação.

Aqui apresentamos algumas coisas que você deveria saber sobre sistemas complexos.





# INTERAÇÕES

SISTEMAS COMPLEXOS CONSISTEM DE MUITOS COMPONENTES INTERAGINDO ENTRE SI E COM SEU AMBIENTE DE MÚLTIPLAS MANEIRAS.



*"Todo objeto que a biologia estuda é um sistema de sistemas."*  
– François Jacob

Sistemas complexos são geralmente caracterizados por muitos componentes que interagem de diversas maneiras entre si e potencialmente com seu ambiente também. Estes componentes formam redes de interações, algumas vezes com apenas alguns componentes envolvidos em muitas interações. Interações podem produzir nova informação, o que dificulta o estudo dos componentes isolados ou a previsão completa do seu futuro. Além disso, os próprios componentes de um sistema também podem ser, em si, novos sistemas, levando a sistemas de sistemas, interdependentes uns dos outros. O principal desafio da ciência da complexidade não é apenas ver as partes e suas conexões, mas também entender como essas conexões dão origem ao todo.

## **EXEMPLOS:**

- Bilhões de neurônios interagindo no cérebro humano.
- Computadores se comunicando na Internet.
- Humanos em relações multifacetadas.

## **CONCEITOS RELEVANTES:**

Sistema, componente, interações, redes, estrutura, heterogeneidade, interligações, interconectividade, interdependência, subsistemas, fronteiras, ambiente, sistemas abertos/fechados, sistemas de sistemas.

## **REFERÊNCIAS:**

Mitchell, Melanie.

*Complexity: A Guided Tour*

[Complexidade: um passeio guiado].

Oxford University Press, 2009.

Capra, Fritjof and Luisi, Pier Luigi.

*The Systems View of Life: A Unifying Vision*

[A visão sistêmica da vida: uma concepção unificada].

Cambridge University Press, 2016.



# **INTERAÇÕES 1**





# EMERGÊNCIA

PROPRIEDADES DE SISTEMAS COMPLEXOS COMO UM TODO SÃO MUITO DIFERENTES, E FREQUENTEMENTE INESPERADAS, DAS PROPRIEDADES DOS SEUS COMPONENTES INDIVIDUAIS.



*"Você não precisa de algo a mais para obter algo a mais. Isso é o que emergência significa."*  
– Murray Gell-Mann

Em sistemas simples, as propriedades do todo podem ser entendidas ou previstas a partir da soma ou agregação das suas componentes. Em outras palavras, propriedades macroscópicas de um sistema simples podem ser deduzidas das propriedades microscópicas das partes. Em sistemas complexos, no entanto, as propriedades do todo não podem ser entendidas ou previstas a partir somente do conhecimento das componentes, por conta de um fenômeno conhecido como “emergência”. Este fenômeno envolve diversos mecanismos que fazem com que a interação entre componentes de um sistema gerem nova informação e apresentem novos comportamentos em larga escala e. Este fato geralmente é resumido com a frase popular “o todo é mais do que a soma das partes”.

## **EXEMPLOS:**

- Uma enorme massa de ar e vapor de moléculas formando um furacão.
- Múltiplas células formando um organismo vivo.
- Bilhões de neurônios no cérebro produzindo consciência e inteligência.

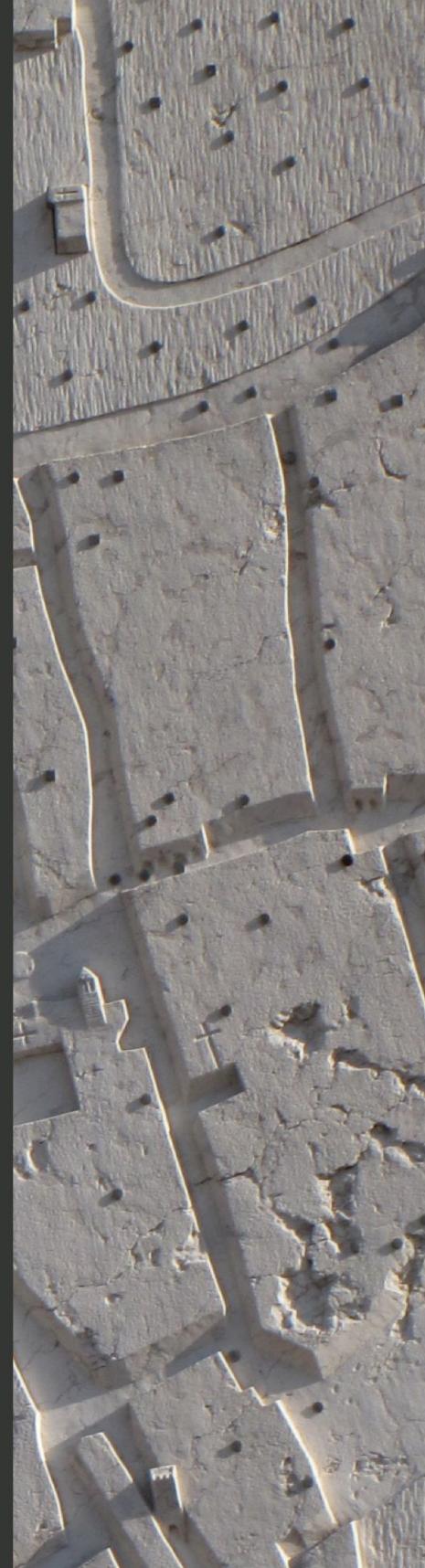
## **CONCEITOS RELEVANTES:**

Emergência, leis de escala, não-linearidade, bottom-up/de baixo para cima, descrição, surpresa, efeitos indiretos, contra-intuitivo, transição de fase, não-redutibilidade, ruptura do pensamento estatístico/linear tradicional, "o todo é mais do que a soma das partes".

## **REFERÊNCIAS:**

Bar-Yam, Yaneer.  
*Dynamics of Complex Systems*  
[Dinâmica de sistemas complexos].  
Addison-Wesley, 1997.

Ball, Philip.  
*Critical Mass: How One Thing Leads to Another*  
[Massa crítica: como uma coisa leva a outra].  
Macmillan, 2004.



**EMERGÊNCIA 2**



# DINÂMICA

SISTEMAS COMPLEXOS TENDEM A MUDAR SEUS ESTADOS DINAMICAMENTE, FREQUENTEMENTE APRESENTANDO COMPORTAMENTO IMPREVISTO A LONGO PRAZO.



*"Caos: Quando o presente determina o futuro, mas uma aproximação do presente não determina aproximadamente o futuro."*

– Edward Lorenz

Sistemas podem ser analisados em termos das mudanças de seus estados ao longo do tempo. Um estado é descrito por um conjunto de variáveis que melhor descrevem o sistema. Conforme o sistema muda de um estado para outro, suas variáveis também mudam, frequentemente respondendo ao seu meio. Essa mudança é dita linear caso seja diretamente proporcional ao tempo, ao estado atual do sistema, ou a mudanças em seu meio; e não-linear, caso contrário. Sistemas complexos são tipicamente não-lineares, possuindo taxas de mudança diferentes a depender de seus estados e meios. Esses sistemas podem ainda ter estados estáveis, que permanecem os mesmos mesmo quando perturbados, ou estados instáveis nos quais pequenas perturbações alteram o sistema. Em alguns casos, pequenas mudanças do meio no qual o sistema está inserido, conhecidas como bifurações, transições de fase ou pontos críticos, podem modificar completamente o comportamento do sistema.

Alguns sistemas são “caóticos”, o que significa serem extremamente sensíveis a pequenas perturbações e imprevisíveis em um futuro mais distante, manifestação do chamado “efeito borboleta”. Um sistema complexo pode ainda ser dependente de sua trajetória, isto é, seu futuro depende não apenas do seu estado presente mas também da sua história passada.

### **EXEMPLOS:**

- Condições meteorológicas mudando constantemente de modo imprevisível.
- Volatilidade financeira na bolsa de valores.

### **CONCEITOS RELEVANTES:**

Dinâmica, comportamento, não-linearidade, caos, desequilíbrio, sensibilidade, efeito borboleta, bifurcação, imprevisibilidade no longo prazo, não-ergodicidade, dependência de trajetória/contexto.

### **REFERÊNCIAS:**

Strogatz, Steven H.  
*Nonlinear Dynamics and Chaos*  
[Dinâmica não-linear e caos].  
CRC Press, 1994.

Gleick, James.  
*Chaos: Making a New Science*  
[Caos: a criação de uma nova ciência].  
Open Road Media, 2011.





# AUTO-ORGANIZAÇÃO

SISTEMAS COMPLEXOS PODEM SE AUTO-ORGANIZAR ESPONTANEAMENTE PARA PRODUZIR PADRÕES NÃO-TRIVIAIS SEM UM PLANO PREEXISTENTE.



*"Sugere-se que um sistema de substâncias químicas, chamadas morfógenos, reagindo em conjunto e difundindo através de um tecido, é adequado para explicar o fenômeno da morfogênese"*

– Alan Turing

As interações entre os componentes de um sistema complexo podem produzir um padrão ou comportamento global. Isso é frequentemente chamado de auto-organização, uma vez que não há controle ou controlador externo. Em vez disso, o "controle" de um sistema auto-organizado está distribuído entre suas partes e integrado através de suas interações. A auto-organização pode produzir estruturas físicas/funcionais como padrões de materiais cristalinos e morfologias de organismos vivos, ou comportamentos dinâmicos/informacionais como o movimento de cardumes de peixes e impulsos elétricos que se propagam nos músculos de animais. À medida que o sistema torna-se mais organizado por esse processo, novos padrões de interação podem surgir ao longo do tempo, potencialmente levando à produção de complexidade ainda maior. Em alguns casos, sistemas complexos podem se auto-organizar em um estado "crítico" que só pode existir em uma condição sutil de equilíbrio entre aleatoriedade e regularidade.

Os padrões que surgem nesses estados de criticalidade auto-organizada frequentemente exibem várias propriedades peculiares, tais como autossimilaridade e características com distribuições em lei de potência.

### **EXEMPLOS:**

- Uma célula-ovo se dividindo e, eventualmente, se auto-organizando na forma complexa de um organismo.
- Cidades crescendo à medida que atraem mais pessoas e dinheiro.
- A revoada de uma grande população de estorninhos exibindo padrões complexos.

### **CONCEITOS RELEVANTES:**

Auto-organização, comportamento coletivo, enxames, padrões, espaço e tempo, criticalidade, autossimilaridade, rupturas, ordem a partir de desordem, criticalidade auto-organizada, leis de potência, auto-organização guiada, controle distribuído/descentralizado,

### **REFERÊNCIAS:**

Ball, Philip. *The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature* [A tapeçaria auto-criada: formação de padrões na natureza]. Oxford University Press, 1999.

Camazine, Scott, et al. *Self-Organization in Biological Systems* [Auto-organização em sistemas biológicos]. Princeton University Press, 2003.



# **AUTO-ORGANIZAÇÃO 4**



# ADAPTAÇÃO

SISTEMAS COMPLEXOS PODEM  
SE ADAPTAR E EVOLUIR.

---

*“Nada em biologia faz sentido  
exceto à luz da evolução.”*  
– Theodosius Dobzhansky

Em vez de simplesmente avançar em direção a um estado estacionário, sistemas complexos frequentemente são ativos e respondem ao ambiente — a diferença entre uma bola que rola até a parte mais baixa de uma colina e ali cessa seu movimento e um pássaro que se adapta às correntes de vento enquanto voa. Essa adaptação pode acontecer em múltiplas escalas: cognitiva, por meio do aprendizado e desenvolvimento psicológico; social, via compartilhamento de informações por meio de laços sociais; ou até evolutivo, através de variação genética e seleção natural. Quando os componentes são danificados ou removidos, esses sistemas geralmente são capazes de se adaptar e recuperar sua funcionalidade anterior, às vezes tornando-se ainda melhores do que antes. Isso pode ser alcançado através da robustez, habilidade de suportar perturbações; resiliência, habilidade de retornar ao estado original após uma longa perturbação; ou adaptação, habilidade de alterar o próprio sistema para permanecer funcional e sobreviver. Sistemas complexos com essas propriedades são conhecidos como sistemas adaptativos complexos.

## **EXEMPLOS:**

- O sistema imunológico continuamente aprendendo sobre patógenos
- Uma colônia de cupins que repara os danos causados ao seu cupinzeiro.
- Vida terrestre que sobreviveu a numerosos eventos de crise em bilhões de anos de sua história.

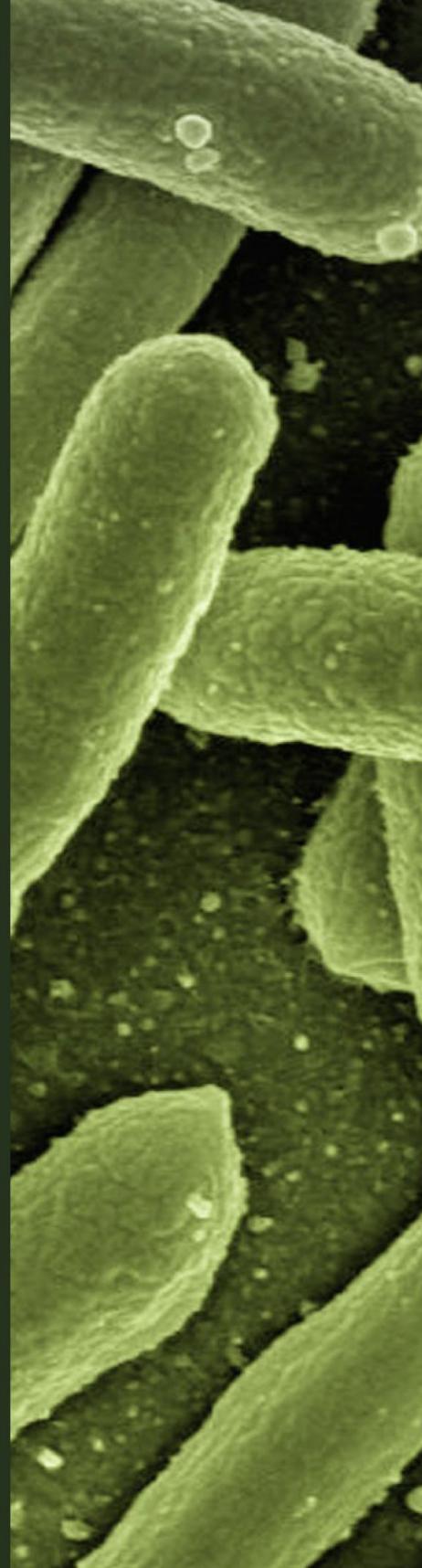
## **CONCEITOS RELEVANTES:**

Aprendizado, adaptação, evolução, paisagens de aptidão, robustez, resiliência, diversidade, sistemas adaptativos complexos, algoritmos genéticos, vida artificial, inteligência artificial, inteligência de enxame, criatividade, caráter aberto.

## **REFERÊNCIAS:**

Holland, John Henry.  
*Adaptation in Natural and Artificial Systems*  
[Adaptação em sistemas naturais e artificiais]. MIT press, 1992.

Solé, Ricard y Elena, Santiago F. *Viruses as Complex Adaptive Systems* [Vírus como sistemas adaptativos complexos]. Princeton University Press, 2018.



# **ADAPTAÇÃO 5**



# INTERDISCIPLINARIEDADE

A CIÊNCIA DA COMPLEXIDADE PODE SER USADA PARA ENTENDER E GERENCIAR UMA AMPLA VARIEDADE DE SISTEMAS EM MUITAS ÁREAS.



*"Pode não ser totalmente em vão, no entanto, procurar propriedades comuns entre os diversos tipos de sistemas complexos... As ideias de feedback e informação fornecem um quadro de referência para a visualização de uma ampla gama de situações."*

– Herbert Simon

Sistemas complexos aparecem em todos os domínios científicos e profissionais, incluindo física, biologia, ecologia, ciências sociais, finanças, negócios, gestão, política, psicologia, antropologia, medicina, engenharia, tecnologia da informação e outros. Muitas das mais recentes tecnologias, de mídias sociais e tecnologias móveis a veículos autônomos e blockchain, produzem sistemas com propriedades emergentes que são cruciais para entender e prever o bem-estar social. Um conceito-chave da ciência da complexidade é a universalidade, que é a ideia de que muitos sistemas em diferentes domínios exibem fenômenos com características subadjacentes comuns que podem ser descritas usando-se os mesmos modelos científicos. Esses conceitos garantem uma nova estrutura multidisciplinar matemática/computacional.

A ciência da complexidade pode fornecer uma abordagem analítica interdisciplinar e abrangente que complementa as abordagens científicas tradicionais que focam em assuntos específicos em cada domínio.

## **EXEMPLOS:**

- Propriedades comuns de vários sistemas de processamento de informações (sistema nervoso, Internet, infra-estrutura de comunicação).
- Padrões universais encontrados em vários processos de disseminação (epidemias, modismos, incêndios florestais).

## **CONCEITOS RELEVANTES:**

Universalidade, diversas aplicações, multi/interdisciplinaridade, economia, sistemas sociais, ecossistemas, sustentabilidade, solução de problemas do mundo real, sistemas culturais, relevância para a tomada de decisão na vida cotidiana.

## **REFERÊNCIAS:**

Thurner, Stefan, Hanel, Rudolf and Klimek, Peter. *Introduction to the Theory of Complex Systems* [Introdução à teoria de sistemas complexos]. Oxford University Press, 2018.

Page, Scott E. *The Model Thinker* [O pensador de modelos]. Hachette UK, 2018.



# **INTERDISCIPLINARIEDADE 6**



# MÉTODOS

MÉTODOS MATEMÁTICOS E COMPUTACIONAIS SÃO FERRAMENTAS PODEROSAS PARA O ESTUDO DE SISTEMAS COMPLEXOS.



*"Todos modelos estão errados,  
mas alguns são úteis."*  
– George Box

Sistemas complexos envolvem muitas variáveis e configurações que não podem ser exploradas simplesmente com a intuição ou com cálculos feitos com lápis e papel. Em vez disso, quase sempre são necessárias análises, simulações e modelos computacionais e matemáticos avançados para entender como esses sistemas são estruturados e mudam com o passar do tempo. Com a ajuda dos computadores, podemos verificar se um conjunto de regras hipotéticas pode levar a um comportamento observado na natureza, e em seguida utilizar nosso conhecimento dessas regras para criar previsões de diferentes cenários possíveis. Os computadores também são usados para analisar conjuntos de dados massivos obtidos de sistemas complexos para revelar e visualizar padrões ocultos que não são visíveis aos olhos humanos. Esses métodos computacionais podem levar a descobertas que aprofundam nossa compreensão e apreciação da natureza.

## **EXEMPLOS:**

- Modelagem de bandos de pássaros baseada em agentes.
- Modelos matemáticos e computacionais do cérebro.
- Modelos computacionais de previsão climática.
- Modelos computacionais da dinâmica de pedestres.

## **CONCEITOS RELEVANTES:**

Modelagem, simulação, análise de dados, metodologia, modelagem baseada em agentes, análise de redes, teoria dos jogos, visualização, regras, entendimento.

## **REFERÊNCIAS:**

Pagels, Heinz R.

*The Dreams of Reason: The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity* [Sonhos da razão: o computador e o advento das ciências da complexidade]. Bantam Books, 1989.

Sayama, Hiroki.

*Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems* [Introdução à modelagem e análise de sistemas complexos]. Open SUNY Textbooks, 2015.





*"Penso que o próximo século [XXI]  
será o século da complexidade."*  
– Stephen Hawking

## COLABORADORES

Manlio De Domenico\*, Chico Camargo, Carlos Gershenson, Daniel Goldsmith, Sabine Jeschonnek, Lorren Kay, Stefano Nicheli, José R. Nicolás, Thomas Schmickl, Massimo Stella, Josh Brandoff, Ángel José Martínez Salinas, Hiroki Sayama\*

\* Autores correspondentes:  
mdedomenico[at]fbk.eu  
sayama[at]binghamton.edu

## CRÉDITOS

Diagramado e editado por: ***Serafina Agnello***

✉ [serafina.agnello@gmail.com](mailto:serafina.agnello@gmail.com)

in [Serafina.Agnello](https://www.linkedin.com/in/Serafina.Agnello)

Página web:  
<https://complexityexplained.github.io/>

Agradecimentos especiais a todos que forneceram ideias e feedback:

Hayford Adjavor, Alex Arenas, Yaneer Bar-Yam, Rogelio Basurto Flores, Michele Battle-Fisher, Anton Bernatskiy, Jacob D. Biamonte, Victor Bonilla, Dirk Brockmann, Victor Buendia, Seth Bullock, Simon Carrignon, Xubin Chai, Jon Darkow, Luca Dellanna, David Rushing Dewhurst, Peter Dodds, Alan Dorin, Peter Eerens, Christos Ellinad, Diego Espinosa, Ernesto Estrada, Nelson Fernández, Len Fisher, Erin Gallagher, Riccardo Gallotti, Pier Luigi Gentilli, Lasse Gerrits, Nigel Goldenfeld, Sergio Gómez, Héctor Gómez-Escobar, Alfredo González-Espinoza, Marcus Guest, J. W. Helkenberg, Stephan Herminghaus, Enrique Hernández-Zavaleta, Marco A. Javarone, Hang-Hyun Jo, Pedro Jordano, Abbas Karimi, J. Kasmire, Erin Kenzie, Tamer Khraisha, Heetae Kim, Bob Klapetzky, Brennan Klein, Karen Kommerce, Roman Koziol, Roland Kupers, Erika Legara, Carl Lipo, Oliver Lopez-Corona, Yeu Wen Mak, Vivien Marmelat, Steve McCormack, Dan Mønster, Alfredo Morales, Yamir Moreno, Ronald Nicholson, Enzo Nicosia, Sibout Nooteboom, Dragan Okanovic, Charles R Paez, Julia Poncela C., Francisco Rodrigues, Jorge P. Rodríguez, Iza Romanowska, Pier Luigi Sacco, Joaquín Sanz, Samuel Scarpino, Alice Schwarze, Nasser Sharareh, Keith Malcolm Smith, Ricard Sole, Keith Sonnenburg, Cédric Sueur, Ali Sumner, Michael Szell, Ali Tareq, Adam Timlett, Ignacio Toledo, Leo Torres, Paul van der Cingel, Ben van Lier, Jeffrey Ventrella, Alessandro Vespignani, Joe Wasserman, Kristen Weiss, Daehan Won, Phil Wood, Nicky Zachariou, Mengsen Zhang, Arshi, Brewingsense, Complexity Space Consulting, Raoul, Systems Innovation, The NoDE Lab.

**Tradutores da versão em Português:**

**Kleber Oliveira, Arthur A. B. Pessa, Higor Y. D. Sigaki, Haroldo V. Ribeiro, Denner S. Vieira, Lucas Silva Simões, Francisco A. Rodrigues, Bruno Mota, Chico Q. Camargo.**



***Serafina Agnello***

Versão 1.0 (13 de maio de 2019) (Em inglês)

Tradução para o português: 15 de agosto de 2019.