

Inferência em redes neurais direcionadas

Fernando da Silva Borges

Instituto de Física
Universidade de São Paulo

Apresentação

- Introdução
 - Neurônios, Sinapses e Modelagem Matemática
- Nosso estudos
 - Faixa Dinâmica em Redes Neuronais
 - Sincronização em redes corticais
 - Plasticidade Sináptica
 - Informação Mútua
- Inferência em redes neuronais direcionadas

Colaborações



UEPG



UTFPR



UFABC



UFPR



USP



INPE



Colaborações no exterior

Universidade de Aberdeen



Universidade de Essex



Universidade Rei Juan Carlos



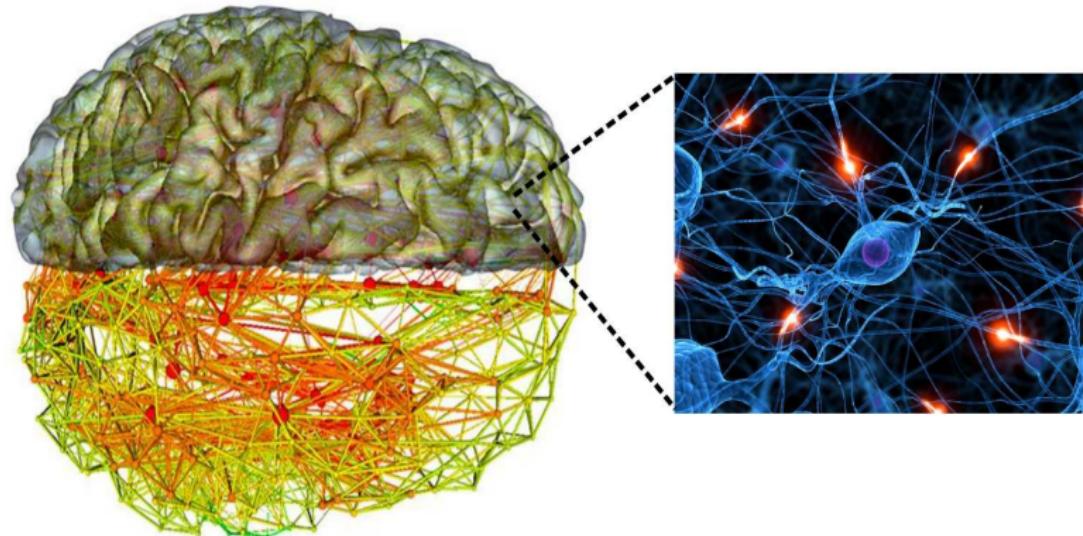
Humboldt University PICIR - Potsdam



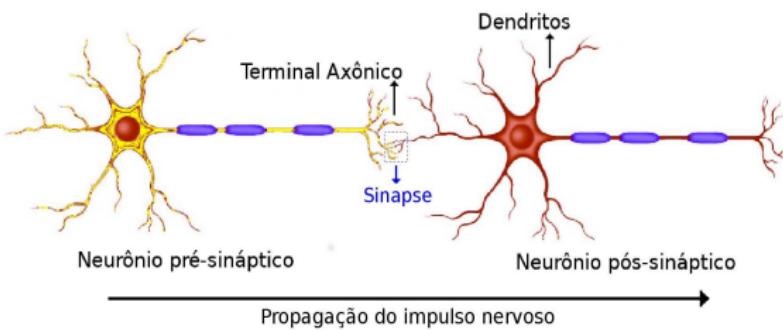
Xi'an University of Technology

Sistema nervoso

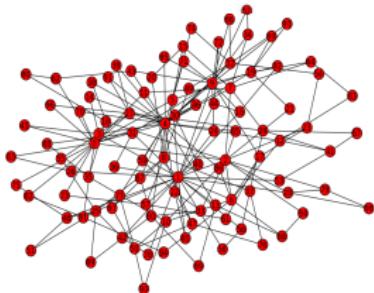
- O cérebro humano tem ≈ 100 bilhões de neurônios
- Cada neurônio é conectado com ≈ 10 mil outros neurônios



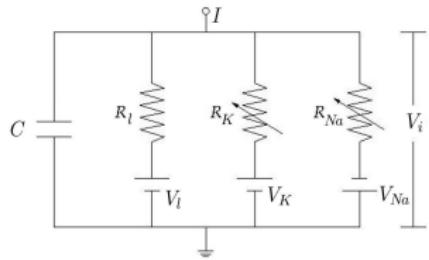
Acoplamento dos neurônios



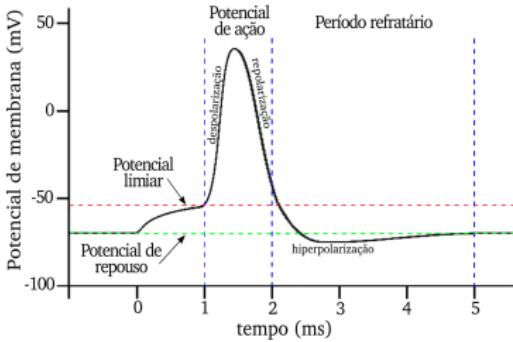
Redes neurais



Círcuito elétrico para membrana neuronal

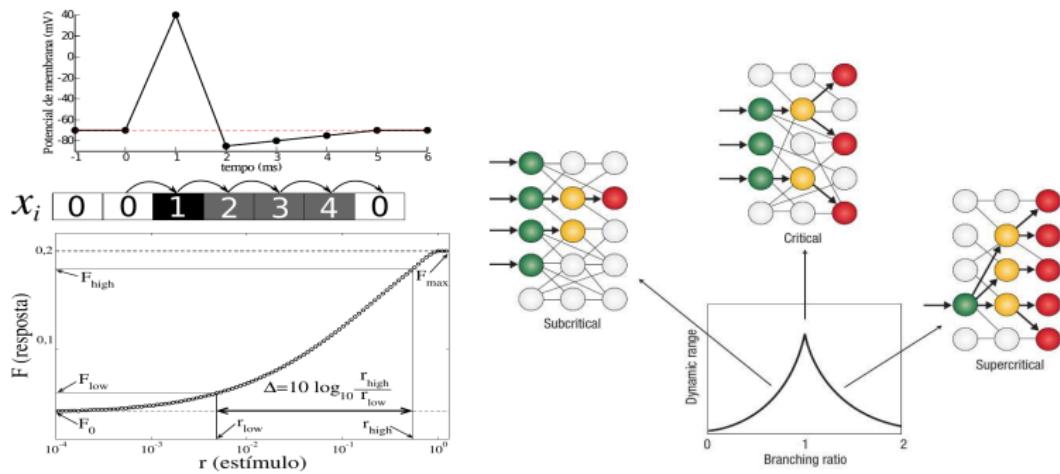


$$C \dot{V}_i = I_i - g_K n_i^4 (V_i - V_K) \\ - g_{Na} m_i^3 h_i (V_i - V_{Na}) \\ - g_l (V_i - V_l) \\ + (V_r - V_i) \sum_{j=1}^N a_{ij} s_j(t)$$

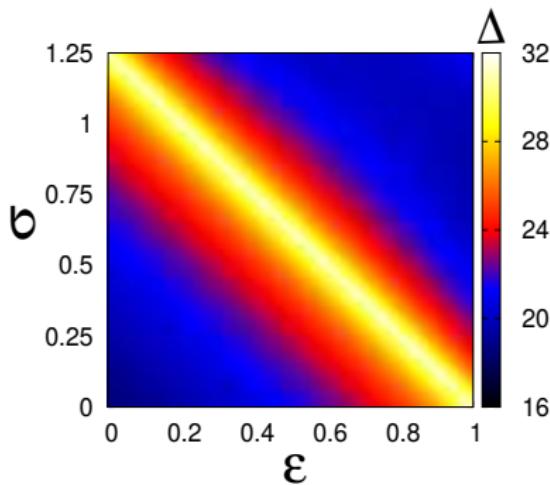
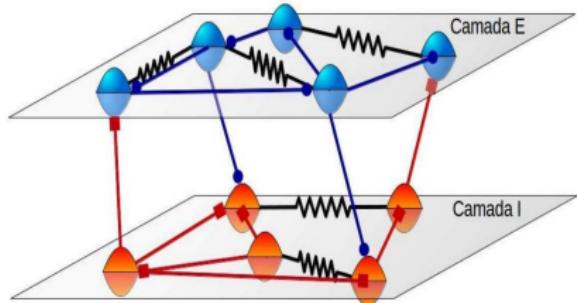


Faixa Dinâmica em Redes Neuronais

- Kinouchi e Copelli (Nature Physics, 2006)
 - Neurônios probabilísticos
 - Redes aleatórias
 - Sinapses elétricas
- Chialvo (Nature Physics, 2006) - Sentidos críticos



Sinapses elétricas e químicas



- A faixa dinâmica é máxima em valores críticos que dependem complementarmente das sinapses elétricas e químicas
- Atraso sináptico nas sinapses químicas decresce os valores da faixa dinâmica

Faixa Dinâmica em Redes Neuronais

Commun Nonlinear Sci Numer Simulat 19 (2014) 164–172



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Commun Nonlinear Sci Numer Simulat

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cnsns



Dynamic range in a neuron network with electrical and chemical synapses



R.L. Viana ^{a,*}, F.S. Borges ^b, K.C. Iarosz ^b, A.M. Batista ^c, S.R. Lopes ^a, I.L. Caldas ^d

^a Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná, 81530-990 Curitiba, PR, Brazil

^b Pós-Graduação em Ciências, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 84030-900 Ponta Grossa, PR, Brazil

^c Departamento de Matemática e Estatística, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 84030-900 Ponta Grossa, PR, Brazil

^d Instituto de Física, Universidade de São Paulo, Caixa Postal 66316, 05315-970 São Paulo, SP, Brazil

Physica A 430 (2015) 236–241



Contents lists available at ScienceDirect

Physica A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/physa



Complementary action of chemical and electrical synapses to perception



F.S. Borges ^a, E.L. Lameu ^a, A.M. Batista ^{a,b,*}, K.C. Iarosz ^c, M.S. Baptista ^c, R.L. Viana ^d

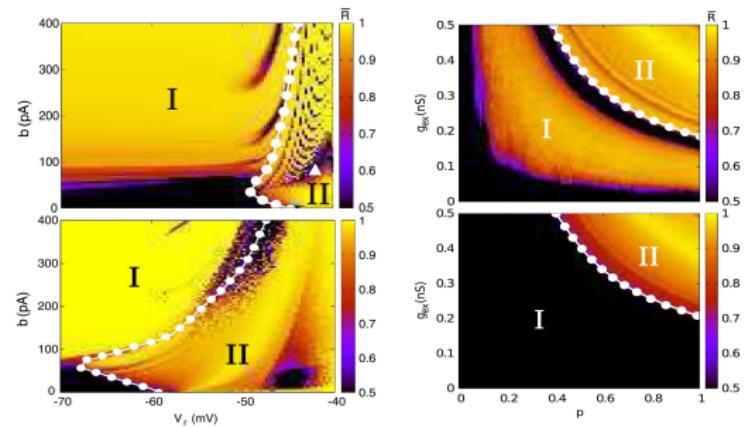
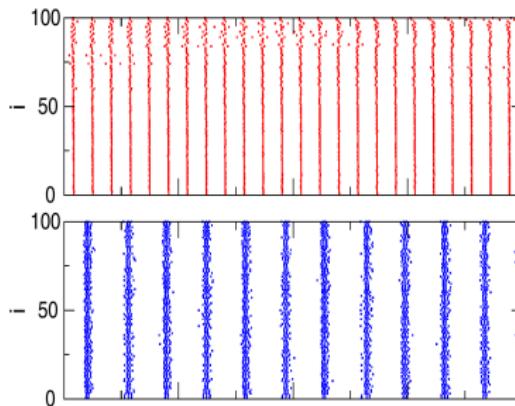
^a Pós-Graduação em Ciências, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 84030-900, Ponta Grossa, Paraná, Brazil

^b Departamento de Matemática e Estatística, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 84030-900, Ponta Grossa, PR, Brazil

^c Institute for Complex Systems and Mathematical Biology, University of Aberdeen, AB24 3UE, Aberdeen, UK

^d Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná, 81530-990, Curitiba, PR, Brazil

Padrões de Disparos Sincronizados



- Spike ↔ Burst
 - ① Parâmetros eletrofisiológicos
 - ② Conectividade e acoplamento
- Sincronização de Burst é mais robusta a perturbações

Padrões de Disparos Sincronizados

Neural Networks 90 (2017) 1–7



Contents lists available at ScienceDirect

Neural Networks

journal homepage: www.elsevier.com/locate/neunet



Synchronised firing patterns in a random network of adaptive exponential integrate-and-fire neuron model



F.S. Borges^a, P.R. Protachevicz^b, E.L. Lameu^b, R.C. Bonetti^b, K.C. Iarosz^{a,c,*}, I.L. Caldas^a, M.S. Baptista^c, A.M. Batista^{a,b,c,d,*}

^a Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brazil

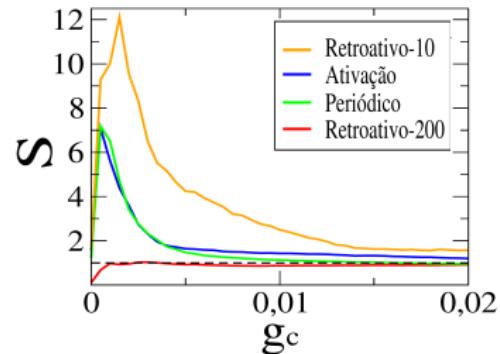
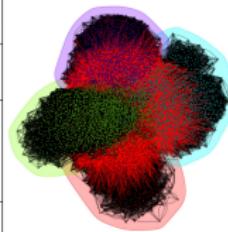
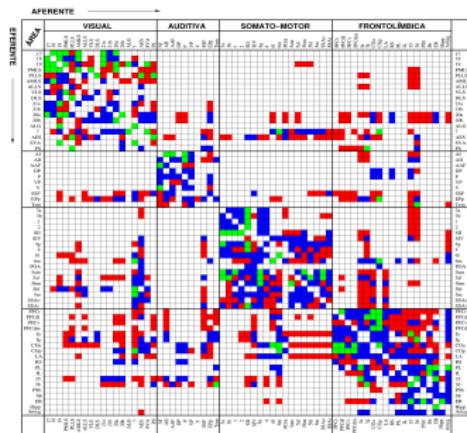
^b Pós-Graduação em Ciências/Física, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brazil

^c Institute for Complex Systems and Mathematical Biology, Aberdeen, SUPA, UK

^d Departamento de Matemática e Estatística, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brazil

Sincronização em redes corticais

- Matriz do gato (Scannell e colaboradores - 1999)



- Supressão de sincronização
- Retroativo com atraso de ≈ 10 ms
- Coexistência de regiões sincronizadas e dessincronizadas

Sincronização em redes corticais

CHAOS 26, 043107 (2016)



Suppression of phase synchronisation in network based on cat's brain

Ewanson L. Lameu,¹ Fernando S. Borges,¹ Rafael R. Borges,¹ Kelly C. Iarosz,²

Iberê L. Caldas,² Antonio M. Batista,^{3,a)} Ricardo L. Viana,⁴ and Jürgen Kurths⁵

¹Pós-Graduação em Ciências, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Paraná, Brazil

²Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brazil

³Departamento de Matemática e Estatística, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Paraná, Brazil

⁴Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brazil

⁵Department of Physics, Humboldt University, Berlin, Germany; Institute for Complex Systems and Mathematical Biology, Aberdeen, Scotland; and Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany

Commun Nonlinear Sci Numer Simulat 34 (2016) 45–54



Contents lists available at ScienceDirect

Commun Nonlinear Sci Numer Simulat

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cnsns



Network and external perturbation induce burst synchronization in cat cerebral cortex



Ewanson L. Lameu^a, Fernando S. Borges^a, Rafael R. Borges^a,
Antonio M. Batista^{a,b,*}, Murilo S. Baptista^c, Ricardo L. Viana^d

^aPós-Graduação em Ciências/Física, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 84030-900 Ponta Grossa, PR, Brazil

^bDepartamento de Matemática e Estatística, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa 84030-900, PR, Brazil

^cInstitute for Complex Systems and Mathematical Biology, University of Aberdeen, AB24 3UE Aberdeen, SUPA, UK

^dDepartamento de Física, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 81531-990 PR, Brazil

Sincronização na rede cortical do gato

- Coexistência de regiões sincronizadas e dessincronizadas
- Spike ou Burst
- Sincronização de Burst é mais robusta a perturbações

Chaos, Solitons and Fractals 101 (2017) 86–91



Chimera-like states in a neuronal network model of the cat brain

M.S. Santos^a, J.D. Szezech^{a,b,1}, F.S. Borges^c, K.C. Iarosz^{c,d}, I.L. Caldas^c, A.M. Batista^{a,b,c,d,*}, R.L. Viana^e, J. Kurths^{d,f}



^aPós-Graduação em Ciências, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brazil

^bDepartamento de Matemática e Estatística, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brazil

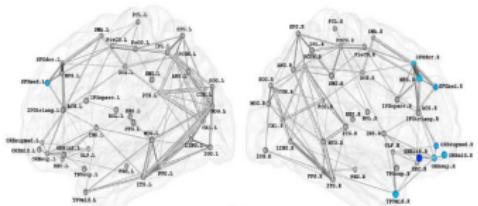
^cInstituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brazil

^dInstitute for Complex Systems and Mathematical Biology, Aberdeen, Scotland

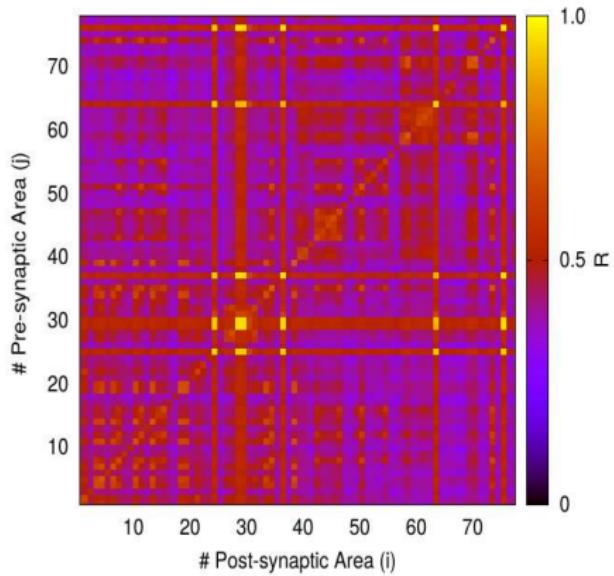
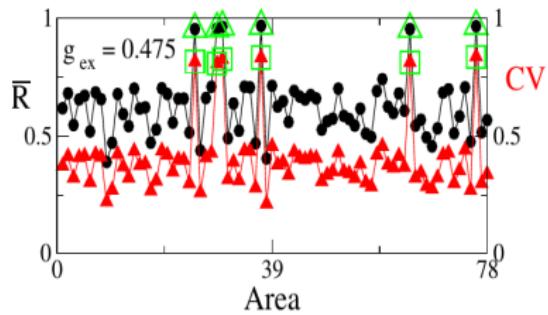
^eDepartamento de Física, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brazil

^fDepartment of Physics, Humboldt University, Berlin, Germany; and Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany

Sincronização em redes corticais humanas

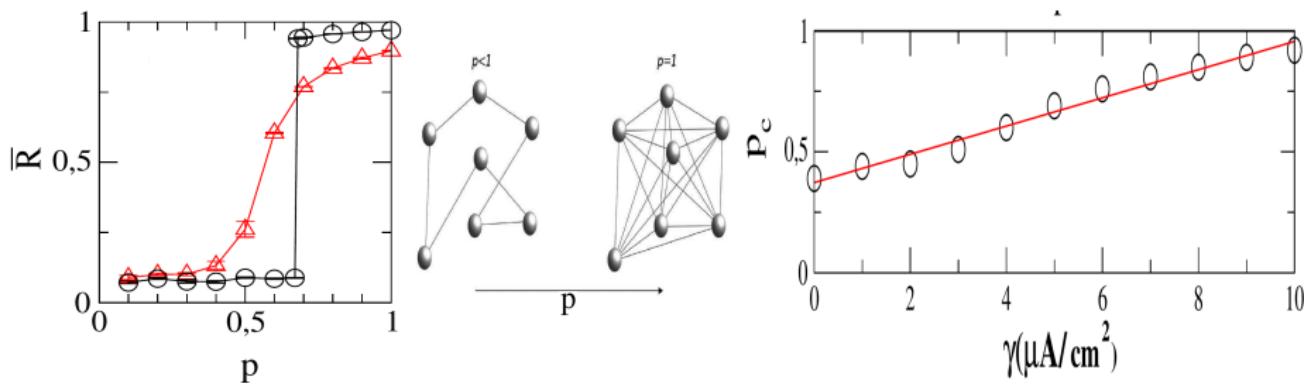


Chun-Yi Lo, Pei-Ning Wang, Kun-Hsien Chou, Jinhui Wang, Yong He, Ching-Po Lin. Diffusion Tensor Tractography Reveals Abnormal Topological Organization in Structural Cortical Networks in Alzheimer's Disease. The Journal of Neuroscience, v. 30, n. 50, p. 16876 - 16885, 2010



Plasticidade Sináptica

- Donald Hebb (1949) - Atividade conjunta entre dois neurônios
- Bi e Poo (1998) - Ordem dos disparos



- Perturbações estocásticas
- Transições abruptas que dependem do tempo médio entre os disparos
- Densidade de conexão crítica (p_c)

Plasticidade Sináptica

Commun Nonlinear Sci Numer Simulat 34 (2016) 12–22



Effects of the spike timing-dependent plasticity on the synchronisation in a random Hodgkin–Huxley neuronal network



R.R. Borges^{a,b}, F.S. Borges^a, E.L. Lameu^a, A.M. Batista^{a,c,d,*}, K.C. Iarosz^d, I.L. Caldas^d, R.L. Viana^e, M.A.F. Sanjuán^f

^a Pós-Graduação em Ciências, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 84030-900 Ponta Grossa, PR, Brazil

^b Departamento de Matemática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 86812-460 Apucarana, PR, Brazil

^c Departamento de Matemática e Estatística, Universidade Estadual de Ponta Grossa, 84030-900 Ponta Grossa, PR, Brazil

^d Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 05315-970 São Paulo, SP, Brazil

^e Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná, 81531-990 Curitiba, PR, Brazil

^f Departamento de Física, Universidad Rey Juan Carlos, Tulipán s/n, 28933 Móstoles, Madrid, Spain

Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 37, n. 2, 2310 (2015)

www.sbfisica.org.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11173721787>

Sincronização de disparos em redes neurais com plasticidade sináptica (Spikes synchronization in neural networks with synaptic plasticity)

Rafael R. Borges¹, Kelly C. Iarosz², Antonio M. Batista³, Iberê L. Caldas²,
Fernando S. Borges¹, Ewandson L. Lameu¹

¹ Pós-Graduação em Ciências/Física, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil

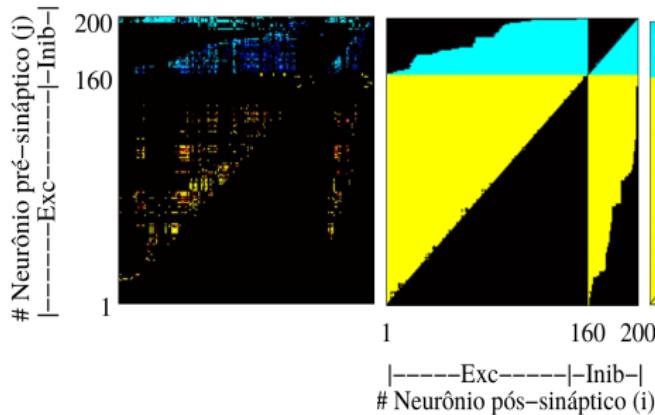
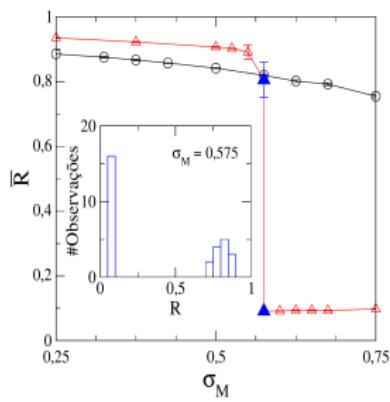
² Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

³ Departamento de Matemática e Estatística, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil

Recebido em 9/1/2015; Aceito em 9/3/2015; Publicado em 30/6/2015

Plasticidade Sináptica

- Plasticidade nas sinapses excitatórias e inibitórias
- Perturbações estocásticas
- Muitas topologias possíveis



Plasticidade Sináptica

Neural Networks 88 (2017) 58–64



Contents lists available at ScienceDirect

Neural Networks

journal homepage: www.elsevier.com/locate/neunet



Spike timing-dependent plasticity induces non-trivial topology in the brain



R.R. Borges^{a,b}, F.S. Borges^a, E.L. Lameu^a, A.M. Batista^{a,c,d,*}, K.C. Iarosz^d, I.L. Caldas^d, C.G. Antonopoulos^e, M.S. Baptista^f

^a Pós-Graduação em Ciências, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brazil

^b Departamento de Matemática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 86812-460, Apucarana, PR, Brazil

^c Departamento de Matemática e Estatística, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brazil

^d Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brazil

^e Department of Mathematical Sciences, University of Essex, Wivenhoe Park, UK

^f Institute for Complex Systems and Mathematical Biology, University of Aberdeen, SUPA, Aberdeen, UK

Plasticidade Sináptica

Alterations in brain connectivity due to plasticity and synaptic delay

E.L. Lameu^{1,a}, E.E.N. Macau¹, F.S. Borges², K.C. Iarosz², I.L. Caldas², R.R. Borges³, P.R. Protachevitz⁴, R.L. Viana⁵, and A.M. Batista^{2,4,6}

¹ National Institute for Space Research, São José dos Campos, SP, Brazil

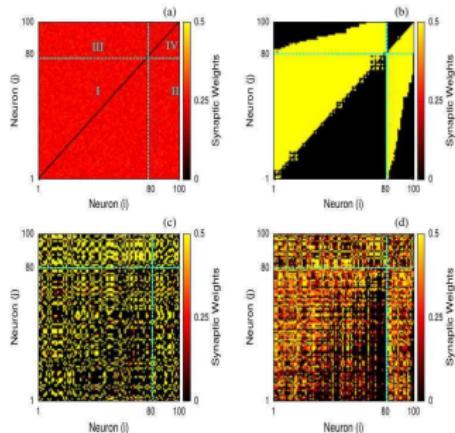
² Physics Institute, University of São Paulo, São Paulo, SP, Brazil

³ Department of Mathematics, Federal Technological University of Paraná, Apucarana, PR, Brazil

⁴ Science Post-Graduation, State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brazil

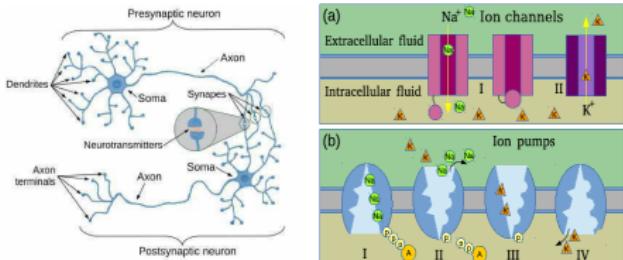
⁵ Physics Department, Federal University of Paraná, Curitiba, PR, Brazil

⁶ Department of Mathematics and Statistics, State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brazil



Synaptic Plasticity and Spikes Synchronisation in Neuronal Networks

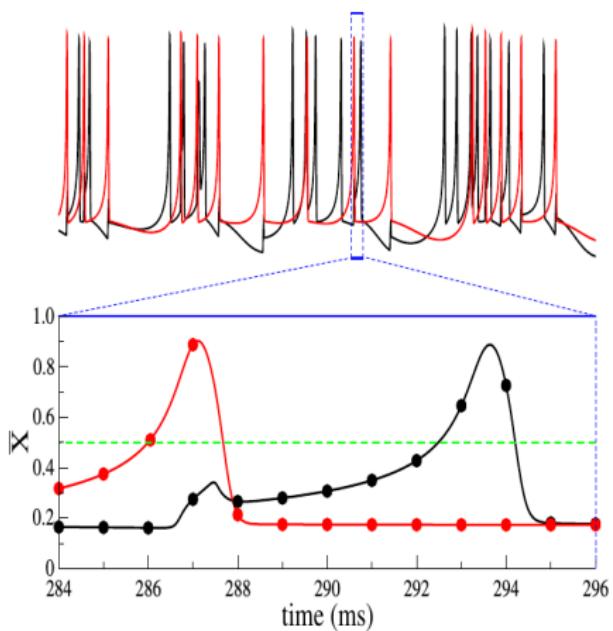
R. R. Borges¹ · F. S. Borges² · E. L. Lameu³ · P. R. Protachevitz⁴ ·
K. C. Iarosz² · I. L. Caldas² · R. L. Viana⁵ · E. E. N. Macau³ · M. S.
Baptista⁶ · C. Grebogi⁵ · A. M. Batista^{2,4,7}



Inferência em redes neurais direcionadas

- Neurônios conectados trocam mais informações
- Direção do fluxo de informação
- Atividade neuronal é medida pelo seu potencial de membrana
- A conectividade da rede é desconhecida
- Inferir as conexões por meio de séries temporais do potencial de membrana
- Informação mútua causal entre todos os neurônios da rede

Mapeamento Simbólico



$t = n$	x_1^n	s_1^n	$S_1^{L=2}(n)$	x_2^n	s_2^n	$S_2^{L=4}(n)$
285	0.163	0	00	0.374	0	0110
286	0.161	0	00	0.501	1	1100
287	0.274	0	00	0.886	1	0000
288	0.265	0	00	0.213	0	0000
289	0.279	0	00	0.174	0	0000
290	0.306	0	00	0.174	0	0000
291	0.349	0	00	0.173	0	0000
292	0.427	0	01	0.173	0	0000
293	0.645	1	11	0.173	0	0000
294	0.725	1	10	0.173	0	0000
295	0.180	0	00	0.173	0	0000

Informação mútua causal

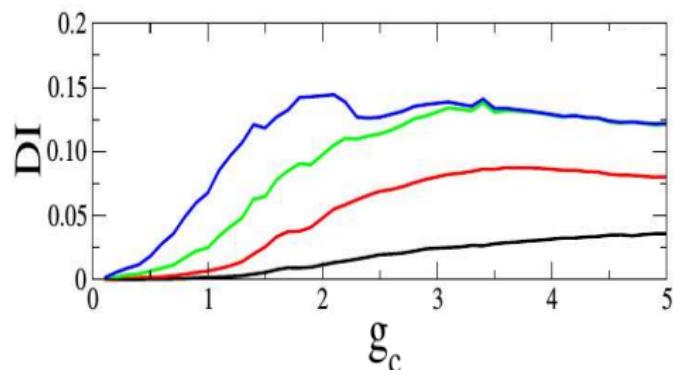
$$\begin{aligned} CaMI_{X_i \rightarrow X_j} &= MI(X_i^{-L}; (X_j^{-L}, X_j^L)) \\ &= MI(X_i^L; W_j^{2L}), \end{aligned} \quad (1)$$

$$MI(X_i^L; X_j^L) = H(X_i^L) + H(X_j^L) - H(X_i^L, X_j^L). \quad (2)$$

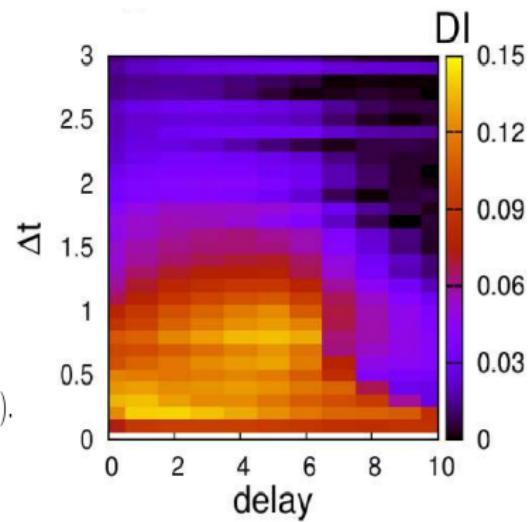
$$CaMI_{X_i \rightarrow X_j} = \sum_{S_i} \sum_{S_j} P(S_i^L, S_j^{2L}) \log \frac{P(S_i^L, S_j^{2L})}{P(S_i^L)P(S_j^{2L})}, \quad (3)$$

$$DI_{X_i \rightarrow X_j} = CaMI_{X_i \rightarrow X_j} - CaMI_{X_j \rightarrow X_i}. \quad (4)$$

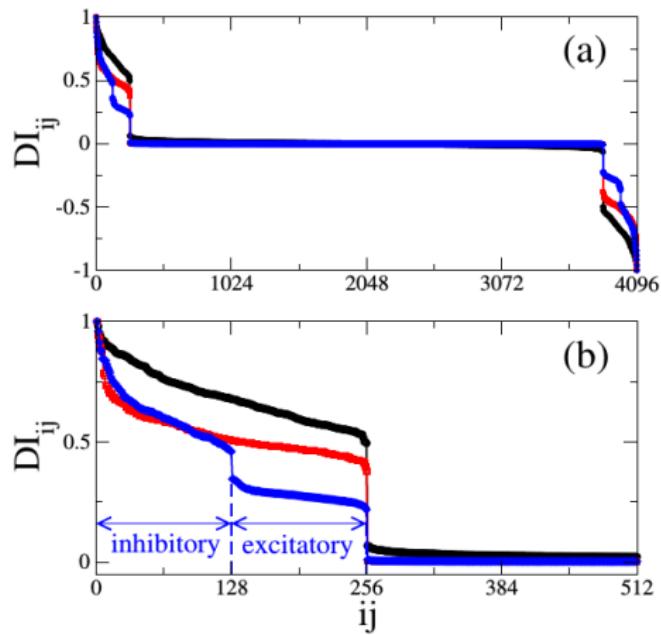
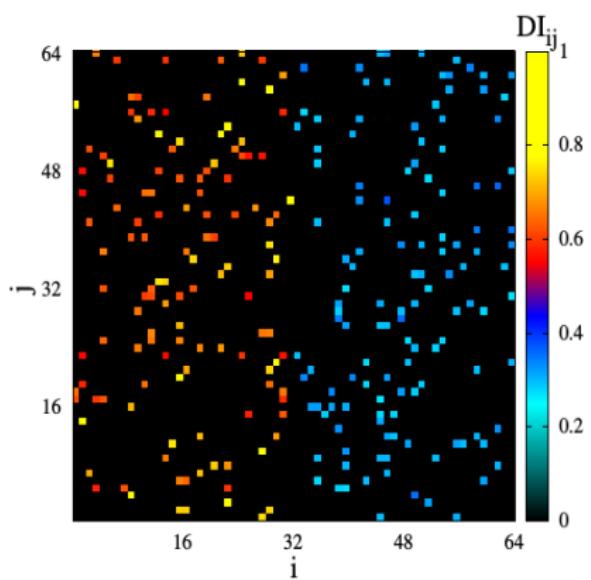
Dois Neurônios



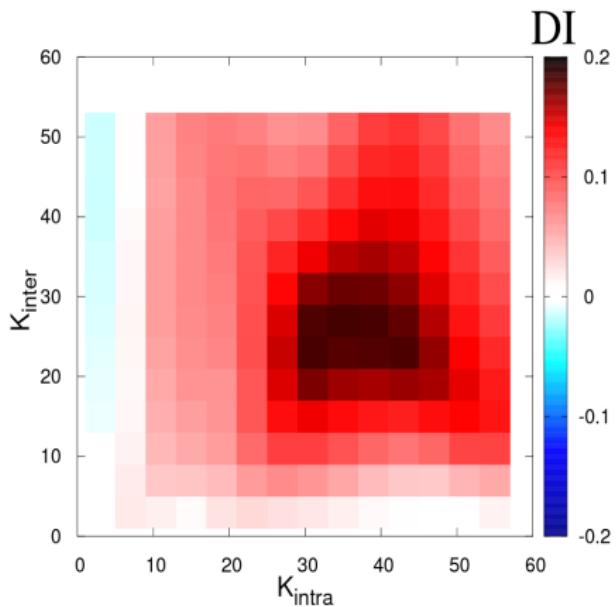
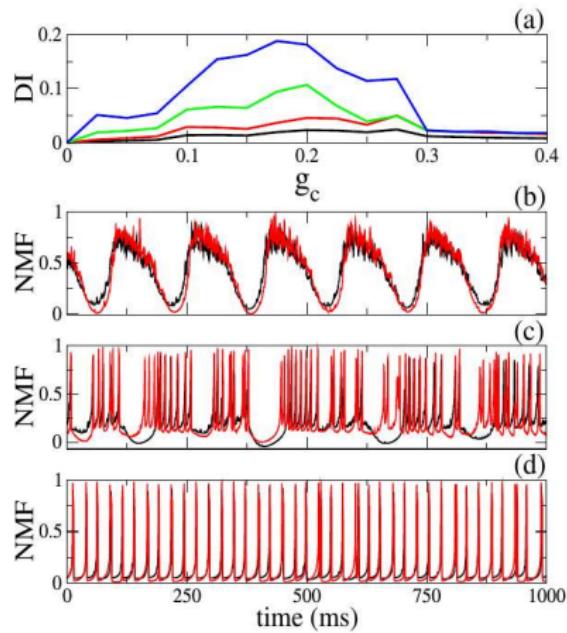
$L = 1$ (black line), $L = 2$ (red line), $L = 4$ (green line), and $L = 8$ (blue line).



Redes Neuronais



Fluxo de Informação entre Redes Neuronais



Informação Mútua

Inference and characterisation of synapses in neuronal networks

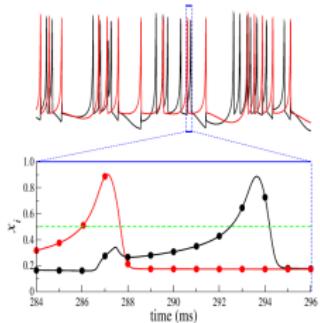
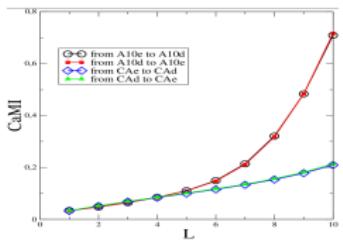
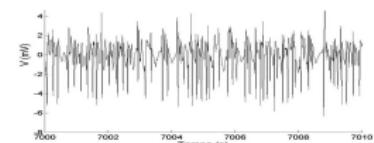
F. S. Borges¹, E. L. Lameu², M. S. Baptista³, K. C. Iaros^{1,3}, I. L. Caldas¹, R. L. Viana⁴, E. E. N. Macau⁵, A. M. Batista^{1,3,5,6}

¹National Institute for Space Research, São Paulo, São Paulo, SP, Brazil.

²Institute for Complex Systems and Mathematical Biology, University of Aberdeen, SUPA, UK.

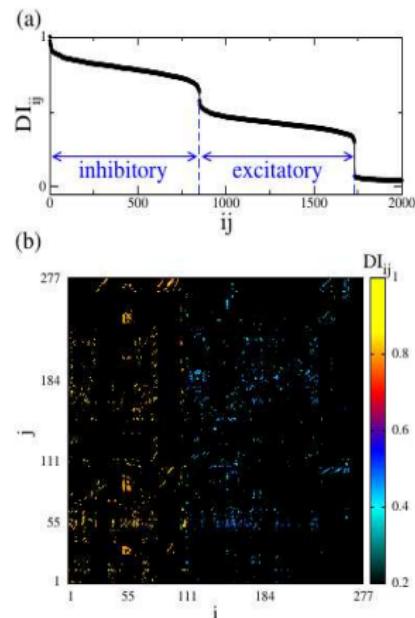
³Physics Department, Federal University of Paraná, Curitiba, PR, Brazil.

⁴Science Post-graduation, State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brazil.
⁵Mathematics and Statistics Department, State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brazil.



$$CaMI_{X_i \rightarrow X_j} = \sum_{S_i} \sum_{S_j} P(S_i^L, S_j^{2L}) \log \frac{P(S_i^L, S_j^{2L})}{P(S_i^L)P(S_j^{2L})},$$

$$DI_{X_i \rightarrow X_j} = CaMI_{X_i \rightarrow X_j} - CaMI_{X_j \rightarrow X_i}$$



Entrevistas e Comentários - Nacional

EBC Agências • TVs • Rádios • Agência Brasil TV Brasil Rádio Nacional Rádio MEC NBR A Voz do Brasil Sobre a EBC Ar... Ar... 0

TV BRASIL Programas Programação Vídeos Sobre a TV Contato Como Sintonizar WebTV f t g+ q

Pesquisadores do Instituto de Física da USP estão usando a matemática para tentar compreender o cérebro

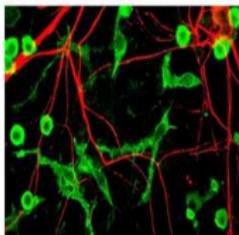
Reporter São Paulo
No Ar em 15/05/2017 - 15:55

Agência **FAPESP** NOTÍCIAS AGENDA VÍDEOS ASSINE f t g+ q

Estudo mostra como a plasticidade induz configurações não triviais no cérebro
17 de maio de 2017

José Tadeu Arantes | Agência FAPESP – Com aproximadamente 100 bilhões de neurônios, cada qual dotado de cerca de 10 mil conexões com outros neurônios, o cérebro humano é o objeto material mais sofisticado em estudo pela ciência contemporânea.

Um aspecto de sua sofisticação é a chamada "neuroplasticidade", a capacidade que o cérebro possui de reorganizar seus caminhos



Em simulação computacional, o termo matemático que expressa a plasticidade leva à mudanças na topologia da rede neural, fazendo crescer diferentes padrões de sincronização entre os neurônios (Imagem: Wikimedia)

EXAME Michel Temer Neymar Nubank Venezuela

CIÊNCIA

Estudo mostra como a plasticidade induz configurações no cérebro

Plasticidade sináptica pode ser reforçada ou inibida, e isso é de enorme interesse não só para eventuais aplicações médicas

Por José Tadeu Arantes, da Agência Fapesp
07 maio 2017, 19h11

Jornal da USP

CIÉNCIAS CULTURA ATUALIDADES UNIVERSIDADE INSTITUCIONAL

Home > Ciências > Ciências Exatas e da Terra > Física ajuda a entender como redes de neurônios se organizam

Ciências Exatas e da Terra - 28/04/2017

Física ajuda a entender como redes de neurônios se organizam

Simulações computacionais buscam desvendar como os neurônios mudam conexões e comportamento



Entrevistas e Comentários - Internacional

AANS
NEUROSURGEON
 Online. Anytime.
 By and for neurosurgeons.

HOME | FEATURES | DEPARTMENTS | INSIDE NEUROSURGEON | AANS STUDENT | SURVEYS | MULTIMEDIA

Toward Quieting the Brain: Cluster Analysis of Cat Neural Network Models Reveals Promising Anti-seizure Strategies

| Newsline



Chronic brain disease such as epilepsy involve disturbances of the brain's electrical activity. Finding new and better ways to connect them is the dream of millions of patients, their physicians and researchers.

newswise

Home | Sections | Channels | Wires | Experts | Newsrooms | About | Blog

< PREVIOUS ARTICLE

RETURN TO ARTICLE LIST

Toward Quieting the Brain: Cluster Analysis of Cat Neural Network Models Reveals Promising Anti-Seizure Strategies



About | Publications | Librarians | Authors | Publishing Partners | Advertisers | Careers | Contact Us

Toward Quieting the Brain: Cluster Analysis of Cat Neural Network Models Reveals Promising Anti-seizure Strategies



NEWS | NEUROSCIENCE | NEUROLOGY | ROBOTICS | PSYCHOLOGY | SHOP | ABOUT

Home > Featured

Quieting the Brain: Neural Network Models Reveal Possible Anti-Seizure Strategies

NEUROSCIENCE NEWS | APRIL 19, 2016

Neuroscience
 from TECHNOLOGY NETWORKS

HOME | COMMUNITIES | EXCLUSIVES | NEWS | VIDEOS | PRODUCTS | EVENTS

Quieting the brain: Cluster analysis of cat neural network models reveals promising anti-seizure strategies

NEWS | Apr 19, 2016