



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DE COMPUTAÇÃO  
Departamento de Ciências de Computação

# **SCC-5809 - Capítulo 9**

## **Modelos Computacionais do Cérebro**

### **Baseados em Populações Neurodinâmicas**

### **no Nível Mesoscópico**

João Luís Garcia Rosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SCC-ICMC-USP - [joaoluis@icmc.usp.br](mailto:joaoluis@icmc.usp.br)

2012

# Sumário

- 1 Modelos de Cérebro
  - Neurodinâmica
  - Hodgkin-Huxley
  - Sistemas Dinâmicos
- 2 Neurodinâmica de Freeman
  - Modelo
  - EEG
  - Conjuntos-K
  - Ação em massa
  - Percolação
- 3 BCI
  - Interface Cérebro-Computador

# Sumário

1

## Modelos de Cérebro

- Neurodinâmica
- Hodgkin-Huxley
- Sistemas Dinâmicos

2

## Neurodinâmica de Freeman

- Modelo
- EEG
- Conjuntos-K
- Ação em massa
- Percolação

3

## BCI

- Interface Cérebro-Computador

# Introdução

- Modelos de redes neurais atuais estão muito aquém da fisiologia do neurônio do cortex cerebral.
- Modelos do cérebro baseados em neurodinâmica consideram neurônios sistemas dinâmicos.
- E como tais, buscam compreender e representar as razões pelas quais os neurônios são células excitáveis.
- A corrente microscópica de cada neurônio soma com as correntes de outros neurônios, o que provoca uma diferença de potencial macroscópica, medida com o electroencefalograma (EEG).
- O EEG registra os padrões de atividade de populações de neurônios mesoscópicas.

# Introdução

- Um bom modelo neural deve reproduzir a dinâmica dos neurônios [32].
- *Palavras-chave:*
  - neurodinâmica computacional,
  - modelos do cérebro,
  - redes neurais,
  - populações de neurônios,
  - eletroencefalograma (EEG),
  - interfaces cérebro-computador.

# Introdução

- De acordo com a quinta edição do livro de Gordon Shepherd, *A Organização Sináptica do Cérebro*, “o processamento de informação depende não apenas dos substratos anatômicos dos circuitos sinápticos, mas também das propriedades eletrofisiológicas dos neurônios” [35].
- Na literatura de sistemas dinâmicos, é largamente aceito que conhecer as correntes elétricas das células nervosas é suficiente para determinar o que a célula está fazendo e o porquê.
- Na verdade, isso de certa forma contradiz observações de que células que têm correntes similares podem exibir comportamentos diferentes.

# Introdução

- Mas, na comunidade de neurociência, esse fato foi ignorado até recentemente, quando foi mostrado [30] que a diferença no comportamento é devida a diferentes mecanismos de bifurcação de excitabilidade.
- Uma bifurcação em um sistema dinâmico é uma mudança qualitativa em sua dinâmica produzida pela variação de parâmetros [15].
- O tipo de bifurcação determina as propriedades computacionais mais fundamentais dos neurônios, como a classe de excitabilidade, a existência ou não existência do limiar de ativação, potenciais de ação (*spikes*) tudo ou nada, oscilações de sublimiar, bi-estabilidade de estados de repouso e *spiking*, se o neurônio é um integrador ou ressoador etc [22].

# Os neurônios são diferentes

- As correntes definem o tipo de sistema dinâmico do neurônio [17].
- Há milhões de mecanismos de geração de *spikes* eletrofisiológicos diferentes.
- Os axônios são filamentos (há 72 km de fibras no cérebro) que podem alcançar desde 100 microns ( $10^{-4}$  m) (célula granule típica), até 4,5 metros (aferente primário da girafa).
- E a comunicação via *spikes* pode ser estereotípica, nas células piramidais comuns, ou não haver nenhuma comunicação (células horizontais da retina).
- A velocidade do potencial de ação (*spike*) varia de 2 a 400 km/h.
- As conexões de entrada variam de 500 (células do gânglio da retina) a 200.000 (células purkinje).



# Os neurônios são diferentes

- Nos cerca de 100 bilhões de neurônios do cérebro humano, há centenas de milhares de tipos diferentes de neurônios e pelo menos uma centena de neurotransmissores.
- Cada neurônio faz em média 1.000 sinapses em outros neurônios [6].

# Sumário

1

## Modelos de Cérebro

- Neurodinâmica
- **Hodgkin-Huxley**
- Sistemas Dinâmicos

2

## Neurodinâmica de Freeman

- Modelo
- EEG
- Conjuntos-K
- Ação em massa
- Percolação

3

## BCI

- Interface Cérebro-Computador

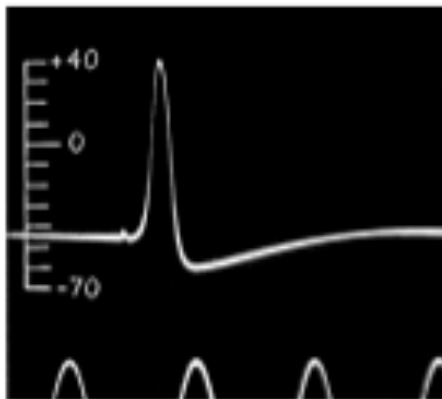
# Modelo de Hodgkin-Huxley

- A teoria de Hodgkin-Huxley (H-H) do potencial de ação, formulada há mais de 60 anos, permanece uma das grandes histórias de sucesso da biologia [16].
- Juntamente com a rede neural artificial de McCulloch e Pitts [28], a teoria H-H provê a fundação para a neurociência computacional moderna.
- A teoria foi resultado de intensa colaboração experimental e teórica entre Alan Lloyd Hodgkin e Andrew Fielding Huxley, de 1938 até a publicação em 1952 de cinco artigos no *Journal of Physiology*.
- Os mecanismos iônicos responsáveis pela geração de um potencial de ação foram elucidados pelos trabalhos de Hodgkin e Huxley com o axônio gigante da lula.
- Foram quatro os experimentos principais:

# Hodgkin-Huxley

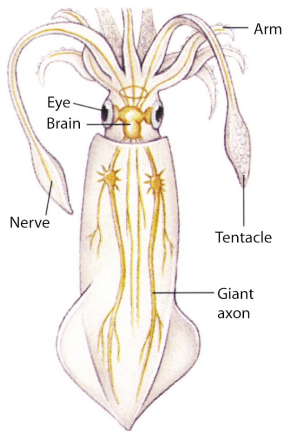
- 1 Cole e Curtis demonstraram que o potencial de ação é associado a um grande aumento na condutância da membrana [5].
- 2 Hodgkin e Huxley fizeram a primeira gravação intracelular de um potencial de ação [18]. Veja figura 1. Isto demonstrou que o potencial de ação excedia zero mV, contradizendo a hipótese de Bernstein [2] de que o aumento fundamental na permeabilidade da membrana é não-seletivo.
- 3 Hodgkin e Katz explicaram o pico do potencial de ação mostrando que era resultado de um aumento na permeabilidade do sódio [19].
- 4 Hodgkin, Huxley e Katz desenvolveram um circuito grampo de voltagem para habilitar medição quantitativa de correntes iônicas do axônio da lula (figura 2).

# Hodgkin-Huxley



**Figure 1 :** A primeira gravação intracelular de um potencial de ação do axônio da lula. Calibração de tempo: 2 ms [18, 16].

# Hodgkin-Huxley



Copyright © 2009 Pearson Education, Inc.

Figure 2 : O axônio gigante da lula [3].

# Hodgkin-Huxley

- A lula é um invertebrado marinho que usa propulsão a jato para o movimento [33].
- Seu axônio mais comprido também é o mais grosso (axônio gigante).
- Trata-se de uma fibra não-mielinizada com um diâmetro  $\sim 0.5$  mm e vários cm de comprimento<sup>1</sup>.
- É uma das maiores células conhecidas.
- Portanto, constitui um sistema ideal para a realização de experimentos.

---

<sup>1</sup>As células dos vertebrados possuem diâmetros de poucos  $\mu m$ .

# Hodgkin-Huxley

- Hodgkin e Huxley mostraram que as despolarizações do axônio da lula engatilha uma corrente de entrada seguida de uma corrente de saída.
- Usando substituição iônica, eles demonstraram que esta corrente de rede poderia ser separada em dois componentes distintos: uma corrente de entrada rápida conduzida por íons  $Na^+$  e uma corrente de saída de ativação mais lenta conduzida por íons  $K^+$ .
- A partir de experimentos usando protocolos geniais de grampo de voltagem, eles concluíram que essas duas correntes resultam de mecanismos de permeabilidade independentes para  $Na^+$  e  $K^+$  com condutâncias que mudam como uma função do tempo e do potencial da membrana.
- Trata-se de uma descoberta conceitual fascinante, chamada depois de “hipótese iônica” [16].



# Hodgkin-Huxley

- No entanto, sua contribuição mais memorável foi a representação empírica de dados experimentais em um modelo quantitativo [20], a primeira descrição completa da excitabilidade de uma única célula.
- Eles modelaram as mudanças suaves de corrente observadas em termos de poros ou canais que ou estavam abertos ou fechados, e usando previsões geradas por uma abordagem estatística para a probabilidade dos canais estarem abertos [16].

# Hodgkin-Huxley

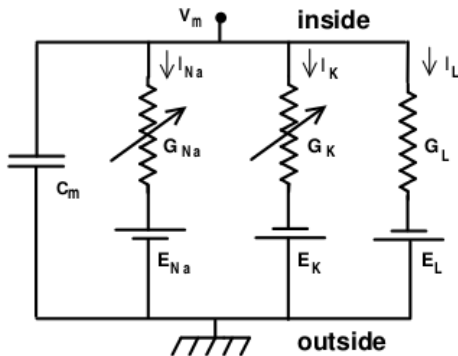
- Representaram a corrente iônica total como a soma de correntes  $Na^+$ ,  $K^+$  e de vazamento ( $L$ ):

$$I = \bar{g}_{Na} m^3 h (V_m - E_{Na}) + \bar{g}_K n^4 (V_m - E_K) + \bar{g}_L (V_m - E_L) \quad (1)$$

onde equações separadas para as variáveis acopladas  $m$  e  $h$  (para ativação e desativação de  $g_{Na}$ ) ou  $n$  (para ativação de  $g_K$ ) descrevem todas as variações suaves dependentes de voltagem e tempo da cinética.

- Portanto, o modelo H-H liga o nível microscópico dos canais de íon com o nível macroscópico das correntes e potenciais de ação [16].
- Veja figura 3.

# Hodgkin-Huxley



**Figure 3 :** Circuito elétrico equivalente proposto por Hodgkin e Huxley para um segmento curto do axônio gigante da lula. As resistências variáveis representam condutâncias dependentes de voltagem [20, 29].

# Hodgkin-Huxley

- O modelo poderia reproduzir e explicar vários dados do axônio da lula, incluindo a forma e propagação do potencial de ação, seu limiar, período refratório, acomodação e oscilações de sub-limiar.
- Com poucas mudanças de parâmetros, o modelo poderia descrever muitos tipos de canais, enfatizando a generalidade da abordagem.
- Mesmo hoje, muitos modelos pulsantes biofísicos são baseados nas equações H-H [16].
- Hodgkin e Huxley receberam em 1963 o Prêmio Nobel em Fisiologia ou Medicina [3].

# Sumário

1

## Modelos de Cérebro

- Neurodinâmica
- Hodgkin-Huxley
- **Sistemas Dinâmicos**

2

## Neurodinâmica de Freeman

- Modelo
- EEG
- Conjuntos-K
- Ação em massa
- Percolação

3

## BCI

- Interface Cérebro-Computador

# Sistemas Dinâmicos

- Tratar-se-á aqui os neurônios como *sistemas dinâmicos*, como resultado principal do modelo de Hodgkin-Huxley [20].
- Um sistema dinâmico consiste de um conjunto de variáveis que descrevem seu estado e uma lei que descreve a evolução das variáveis de estado com o tempo [22].
- O modelo de Hodgkin-Huxley é um sistema dinâmico de quatro dimensões, pois seu estado é determinado unicamente pelo potencial da membrana  $V_m$ , e as variáveis de abertura (ativação) e fechamento (desativação) dos canais de íon  $n$ ,  $m$  e  $h$  para correntes  $K^+$  persistente e  $Na^+$  transiente [1, 23, 24].
- A lei da evolução é dada por um sistema quadridimensional de *equações diferenciais ordinárias* (EDO).

# Sistemas Dinâmicos

- Todas as variáveis que descrevem a dinâmica neural podem ser classificadas em quatro classes, de acordo com sua função e com a escala de tempo [22]:
  - 1 *Potencial da membrana.*
  - 2 *Variáveis de excitação*, tal como a ativação de uma corrente  $Na^+$ . São responsáveis pela elevação do potencial de ação.
  - 3 *Variáveis de recuperação*, tal como a inativação de uma corrente  $Na^+$  e a ativação de uma corrente rápida  $K^+$ . São responsáveis pela repolarização (rebaixamento) do potencial de ação.
  - 4 *Variáveis de adaptação*, como a ativação de correntes de baixa voltagem ou dependentes de  $Ca^{2+}$ . Constroem potenciais de ação prolongados e podem afetar a excitabilidade com o tempo.

# Representações de Fase

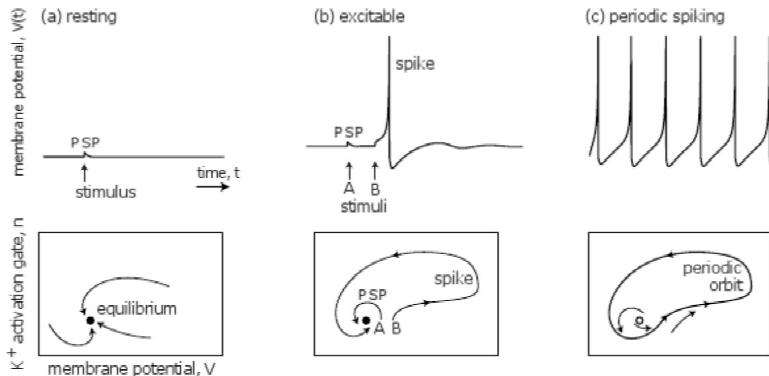
- O poder da abordagem dos sistemas dinâmicos para a neurociência é que se pode dizer muitas coisas sobre um sistema sem conhecer todos os detalhes que governam sua evolução.
- Considere um neurônio quiescente, cujo potencial de membrana está em repouso.
- Como não há mudanças em suas variáveis de estado, ele está em um ponto de equilíbrio.
- Todas as correntes que chegam para despolarizar o neurônio são balanceadas ou equilibradas pelas correntes de saída de hiperpolarização: equilíbrio estável (figura 4(a) - cima).



# Representações de Fase

- Dependendo do ponto inicial, o sistema pode ter muitas trajetórias, como aquelas mostradas na parte de baixo da figura 4(a).
- Pode-se imaginar o tempo ao longo de cada trajetória.
- Todas são atraídas para o estado de equilíbrio denotado pelo ponto preto, chamado de *atrator*.
- É possível prever o comportamento itinerante dos neurônios através da observação [8].

# Representações de Fase



**Figure 4 :** Os estados do neurônio: repouso (a), excitável (b), e atividade de *spiking* periódico (c). Abaixo, vemos as trajetórias do sistema, dependendo do ponto de início. Figura obtida de [22], disponível em <http://www.izhikevich.org/publications/dsn.pdf>.

# Representações de Fase

- Considerando a dinâmica de Freeman (veja seção 3), as variáveis de estado mais úteis são derivadas de potenciais elétricos gerados por um neurônio.
- Sua gravação permite a definição de uma variável de estado para os axônios e outra para os dendritos, que são muito diferentes.
- O axônio expressa seu estado em frequência dos potenciais de ação (taxa de pulso) e o dendrito expressa em intensidade de sua corrente sináptica (amplitude de onda) [8].

# Representações de Fase

- A descrição da dinâmica pode ser obtida a partir do estudo das representações de fase do sistema, que mostra certas trajetórias especiais (equilíbrios, separatrizes, ciclos limite) que determinam o comportamento topológico de todas as outras trajetórias no espaço de fases.
- A excitabilidade é ilustrada na figura 4(b).
- Quando o neurônio está em repouso (representação de fase = equilíbrio estável), pequenas perturbações, como *A*, resultam em pequenas excursões do equilíbrio, denotado pelo potencial pós-sináptico PSP. Grandes perturbações, como *B*, são amplificadas pela dinâmica intrínseca do neurônio e resultam no potencial de ação.

# Representações de Fase

- Se uma corrente forte o suficiente for injetada no neurônio, o mesmo será levado a um modo de marcador de passo, tal que exhibe atividade de *spiking* periódica (figura 4(c)): este estado é chamado de ciclo limite estável, ou órbita periódica estável.
- Os detalhes eletrofisiológicos do neurônio determinam apenas a posição, a forma e o período do ciclo limite.

# Sumário

- 1 Modelos de Cérebro
  - Neurodinâmica
  - Hodgkin-Huxley
  - Sistemas Dinâmicos
- 2 Neurodinâmica de Freeman
  - Modelo
  - EEG
  - Conjuntos-K
  - Ação em massa
  - Percolação
- 3 BCI
  - Interface Cérebro-Computador

# Modelo de Freeman

- Hoje em dia, dois conceitos muito diferentes em relação à forma como o cérebro funciona como um todo co-existem em neurociência [36]:
  - 1 modelo clássico, onde o cérebro é descrito como sendo composto de uma série de cadeias causais formadas por redes nervosas que funcionam em paralelo (as convencionais redes neurais artificiais [17]);
  - 2 modelo neurodinâmico, onde o cérebro é operado por um caos dinâmico não-linear, que se parece com ruído, mas que apresenta uma espécie de ordem oculta [8].
- De acordo com Freeman [8], a fim de compreender o funcionamento do cérebro, uma base fundamental deve ser estabelecida, incluindo imagens e dinâmica não-linear do cérebro, áreas que os computadores digitais tornaram possíveis.

# Modelo de Freeman

- Imagens cerebrais são realizadas durante a atividade de comportamento normal, sendo que a dinâmica não-linear modela estes dados.
- Em uma visão dinamicista, ações e escolhas feitas são responsáveis pela criação de significados no cérebro, e estes são diferentes das representações.
- As representações só existem no mundo e não têm significado.
- A relação dos neurônios com o significado não é ainda bem compreendida.
- Na opinião de Freeman, embora as representações possam ser transferidas entre as máquinas, o significado não pode ser transferido entre os cérebros [8].



# Modelo de Freeman

- A atividade cerebral é direcionada para os objetos externos, levando à criação do significado através da aprendizagem.
- Populações de neurônios são a chave para compreender a biologia da intencionalidade.

# Modelo de Freeman

- Freeman argumenta que existem duas unidades básicas de organização do cérebro: o *neurônio* e a *população de neurônios*.
- Embora o neurônio tem sido a base para a neurobiologia, massas de neurônios que interagem formando populações de neurônios são consideradas para uma visão macroscópica do cérebro.
- Como os neurônios, as populações de neurônios também têm estados e padrões de atividade, mas elas fazem (diferentes) coisas macroscópicas.
- Entre o neurônio microscópico e essas coisas macroscópicas, há populações *mesoscópicas* [8].

# Modelo de Freeman

- Neurobiólogos geralmente afirmam que os cérebros processam a informação em uma forma causa e efeito: estímulos levam a informação que é veiculada na informação transformada.
- E se os estímulos são selecionados antes da aparição?
- Este ponto de vista falha no presente caso.
- Esta visão tradicional permitiu o desenvolvimento das máquinas de processamento de informação.
- Esta visão simplificada, ou até mesmo confusa, do funcionamento neural, levou ao desenvolvimento de computadores digitais.
- Artefatos de Inteligência Artificial representam um desafio: como dar significado às representações simbólicas em máquinas?

# Modelo de Freeman

- Os pragmatistas concebem as mentes como sistemas dinâmicos, resultados de ações no mundo.
- Como essas ações foram geradas?
- De acordo com uma visão cognitivista, uma ação é determinada pela forma de um estímulo.
- Ação intencional é composta por processos espaço-temporais, chamada de memória de curto prazo ou mapas cognitivos, para os materialistas e cognitivistas.
- Na visão do pragmatismo, não há armazenamento temporário de imagens e nenhum mapa representacional.
- Os neurônios no cérebro formam redes densas.
- O equilíbrio de excitação e inibição permite-lhes ter atividade oscilatória intrínseca e modulação de amplitude (AM) completa [8, 36].

# Modelo de Freeman

- Estes padrões de AM são expressões de caos não-linear, não apenas um somatório de potenciais dendríticos lineares e de ação.
- Os padrões AM criam regiões de atratores.
- No modelo neurodinâmico, cada neurônio participa, em certa medida, de cada experiência e de cada comportamento, através de mecanismos caóticos não-lineares [8].
- Os conceitos de neurodinâmica caótica não-linear são de fundamental importância para a investigação do sistema nervoso.
- Eles são relevantes para nossa compreensão do funcionamento do cérebro normal [36].

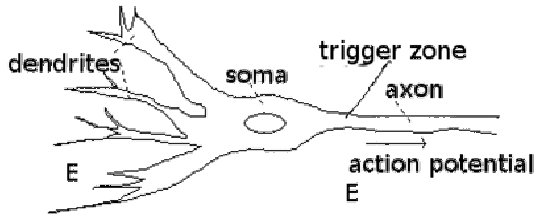
# Sumário

- 1 Modelos de Cérebro
  - Neurodinâmica
  - Hodgkin-Huxley
  - Sistemas Dinâmicos
- 2 Neurodinâmica de Freeman
  - Modelo
  - EEG
  - Conjuntos-K
  - Ação em massa
  - Percolação
- 3 BCI
  - Interface Cérebro-Computador

# EEG

- O neurônio típico tem muitos dendritos (entrada) e um axônio (saída).
- O axônio transmite informação através de trens de pulso *microscópicos*.
- Os dendritos integram informação através de ondas contínuas de corrente iônica.
- Os neurônios estão ligados por sinapses.
- Cada sinapse conduz corrente elétrica.
- A corrente microscópica de cada neurônio soma com as correntes de outros neurônios, o que provoca uma diferença de potencial *macroscópica*, medida com um par de eletrodos extracelulares (E) como o electroencefalograma (EEG) [8, 14]. Veja a figura 5.

# EEG e Populações de Neurônios



**Figure 5 :** Neurônio típico mostrando os dendritos (entrada), o soma (corpo celular), o axônio (saída), a zona de gatilho e a direção do potencial de ação. Note que as letras 'E' representam o par de eletrodos extracelulares. Adaptado de [31] e [8].



# EEG e Populações de Neurônios

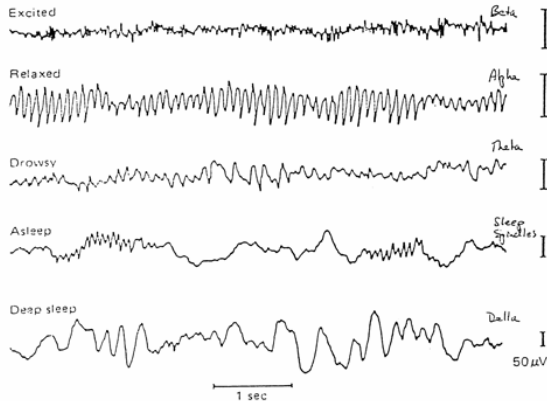
- O EEG registra os padrões de atividade de populações de neurônios *mesoscópicas* (figuras 6 e 7).
- A soma das correntes que um neurônio gera em resposta a estímulos elétricos produz o potencial pós-sináptico.
- A força do potencial pós-sináptico diminui com a distância entre a sinapse e o corpo da célula.
- A atenuação é compensada pela maior área de superfície e por mais sinapses sobre dendritos distais.
- Dendritos fazem ondas e axônios fazem pulsos.
- Sinapses convertem pulsos em ondas.
- Zonas de gatilho convertem ondas em pulsos.
- Os pesquisadores, que baseiam seus estudos nos neurônios individuais, pensam que os eventos de população, como o EEG, são ruído irrelevante, porque eles não têm a compreensão de um estado mesoscópico [8].

# EEG e Populações de Neurônios



**Figure 6 :** “Capacete” para o couro cabeludo (crânio) para medida de EEG não invasiva.

# EEG e Populações de Neurônios



**Figure 7 :** Formas de ondas do EEG. Note as diferentes frequências.

# EEG e Populações de Neurônios

- Nos neurônios, as frequências de pulsos e amplitudes de ondas microscópicas são medidas, enquanto que em populações, densidades de pulsos e ondas macroscópicas são medidas.
- O neurônio é microscópico e o grupo é mesoscópico.
- O fluxo da corrente no interior do neurônio é revelado por uma alteração no potencial de membrana, medido com um eletrodo no interior do corpo da célula, avaliando a variável de estado de onda dendrítica do único neurônio.

# EEG e Populações de Neurônios

- Lembre-se que eletrodos extracelulares são colocados fora do neurônio (veja os Es na figura 5), de tal forma que o potencial cortical resultante da soma das correntes dendríticas na vizinhança é medido.
- As mesmas correntes produzem os potenciais da membrana (intracelular) e corticais (extracelular), dados dois pontos de vista da atividade neural: o primeiro, microscópico e o segundo, mesoscópico [8].

# EEG e Populações de Neurônios

- Os neurônios corticais, por causa de suas interações sinápticas, formam populações de neurônios.
- Variáveis de estado de pulso e onda microscópicas são utilizadas para descrever a atividade dos neurônios individuais que contribuem para a população, e as variáveis de estado mesoscópicas (também de pulso e de onda) são utilizadas para descrever as atividades coletivas que os neurônios originam.

# EEG e Populações de Neurônios

- Atividade de massa no cérebro é descrita por uma densidade de pulsos, em vez da frequência do pulso.
- Isto é feito através da gravação a partir do exterior da célula do disparo de pulsos de muitos neurônios simultaneamente.
- A mesma corrente que controla os disparos de neurônios é medida pelo EEG, que não permite distinguir contribuições individuais.
- Felizmente, isso não é necessário.

# EEG e Populações de Neurônios

- Uma população é uma coleção de neurônios em uma vizinhança, correspondendo a uma coluna cortical, que representa padrões de atividade dinâmicos.
- A densidade de pulso média em uma população nunca pode se aproximar das frequências de pico de pulso de neurônios individuais.
- A atividade das vizinhanças no centro da curva sigmóide dendrítica é muito próxima da linear.
- Isto simplifica a descrição das populações.
- Populações de neurônios são semelhantes aos conjuntos mesoscópicos em muitos sistemas complexos [8].
- O comportamento dos elementos microscópicos é limitado pelo conjunto, e não pode ser compreendido fora de uma visão mesoscópica e macroscópica.



# EEG e Populações de Neurônios

- A ação coletiva dos neurônios forma padrões de atividade que vão além do nível celular e se aproximam do nível do organismo.
- A formação de estados mesoscópicos é o primeiro passo para isso.
- Desta forma, o nível de atividade é decidido pela população, não por indivíduos [8].
- A população é semi-autônoma.
- Tem um ponto atrator, retornando para o mesmo nível após a sua liberação.
- O espaço de estados da população neural é definido pelo intervalo de amplitudes que suas densidades de pulso e de onda podem tomar.

# Sumário

- 1 Modelos de Cérebro
  - Neurodinâmica
  - Hodgkin-Huxley
  - Sistemas Dinâmicos
- 2 Neurodinâmica de Freeman
  - Modelo
  - EEG
  - **Conjuntos-K**
  - Ação em massa
  - Percolação
- 3 BCI
  - Interface Cérebro-Computador

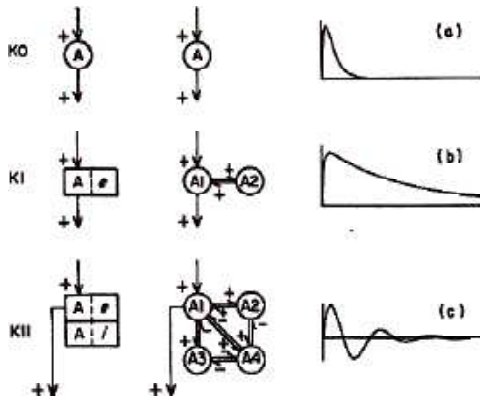
# Conjuntos-K de Freeman

- Em relação à neurociência no nível mesoscópico [8, 9], a conexão teórica entre a atividade dos neurônios no nível microscópico em pequenas redes neurais e a atividade de grupos de células na escala mesoscópica ainda não é bem entendida [12].
- Katzir-Katchalsky sugere tratar os grupos de células usando termodinâmica formando uma hierarquia [25] (conjuntos-K de Freeman): K0, KI, KII, KIII, KIV e KV.
- Katzir-Katchalsky é a razão do K dos conjuntos-K de Freeman.

# Conjuntos-K

- O conjunto KO representa uma coleção de neurônios não-interagentes.
- Conjuntos KI representam uma coleção de conjuntos KO, que podem ser excitatórios ( $KI_e$ ) ou inibitórios ( $KI_i$ ).
- Um conjunto KII representa uma coleção de  $KI_e$  e  $KI_i$ .
- O modelo KIII consiste de muitos conjuntos KII interconectados, descrevendo um determinado sistema sensorial nos cérebros.
- Um conjunto KIV é formado pela interação de três conjuntos KIII [26].
- Conjuntos KV são propostos para modelar a dinâmica livre de escala do neocórtex operando nos conjuntos KIV [12].
- Veja a representação dos conjuntos KI e KII por redes de conjuntos KO na figura 8 [7].

# Conjuntos-K



**Figure 8 :** Representação de conjuntos (b) KI e (c) KII por redes de conjuntos (a) KO. Disponível em [7].

# Conjuntos-K

- As vantagens dos classificadores do padrão KIII sobre as redes neurais artificiais são o pequeno número de exemplos de treinamento necessário, a convergência para um atrator num único passo e o aumento geométrico (ao invés de linear) no número de classes com o número de nós.
- A desvantagem é o aumento do tempo computacional necessário para resolver as equações diferenciais ordinárias (EDO) numericamente.

# Conjuntos-K

- Os modelos K usam um conjunto de EDO com parâmetros distribuídos para descrever a hierarquia de populações neurais começando das micro-colunas até os hemisférios [27].
- Em relação ao padrão KV, os conjuntos-K oferecem uma plataforma para conduzir análises de ações unificadas do neocórtex na criação e controle de comportamentos intencionais e cognitivos [11].

# Sumário

- 1 Modelos de Cérebro
  - Neurodinâmica
  - Hodgkin-Huxley
  - Sistemas Dinâmicos
- 2 Neurodinâmica de Freeman
  - Modelo
  - EEG
  - Conjuntos-K
  - **Ação em massa**
  - Percolação
- 3 BCI
  - Interface Cérebro-Computador



# FMA

- A ação em massa de Freeman (FMA) [7] refere-se às ações sinápticas coletivas que os neurônios no córtex exercem nos outros neurônios, sincronizando seus disparos de potenciais de ação [13].
- FMA expressa e transmite o significado de informação sensorial em padrões espaciais de atividade cortical que lembra os quadros em um filme [10, 11].

# FMA

- Os conceitos prevalecentes em neurodinâmica são baseados em redes neurais, que são modelos newtonianos pois tratam pulsos neurais microscópicos como processos pontuais nas zonas de disparo e sinapses.
- A teoria FMA é maxwelliana porque trata a atividade neural mesoscópica como uma distribuição contínua.
- A neurodinâmica da FMA inclui as operações neurais microscópicas que trazem informação sensorial aos córtices sensoriais e carregam os primeiros perceptos do córtex sensorial para outras partes do cérebro.

# FMA

- A dinâmica newtoniana pode modelar as funções de entrada e saída corticais, mas não a formação de perceptos.
- A FMA precisa de uma mudança de paradigma, porque a teoria é baseada em novas técnicas e experimentos e novas regras de evidência [13].

# Sumário

- 1 Modelos de Cérebro
  - Neurodinâmica
  - Hodgkin-Huxley
  - Sistemas Dinâmicos
- 2 Neurodinâmica de Freeman
  - Modelo
  - EEG
  - Conjuntos-K
  - Ação em massa
  - Percolação
- 3 BCI
  - Interface Cérebro-Computador

# Neuropercolação

- *Neuropercolação* é uma família de modelos estocásticos baseados na teoria matemática dos autômatos celulares probabilísticos nos reticulados e grafos aleatórios e motivada pelas propriedades estruturais e dinâmicas de populações neurais.
- A existência de transições de fases foi demonstrada tanto em modelos de espaço de estados contínuos quanto em discretos, ou seja, em autômatos celulares probabilísticos específicos e modelos de percolação.
- Neuropercolação estende o conceito de transições de fase para grandes populações interativas de células nervosas [27].

# Neuropercolação

- A percolação *bootstrap* básica [34] tem as seguintes propriedades:
  - 1 é um processo determinístico, a partir de iniciação aleatória;
  - 2 o modelo sempre progride em uma direção: dos estados inativos aos ativos e nunca o contrário.
- Sob essas condições, esses modelos matemáticos exibem transições de fase com respeito à probabilidade de iniciação  $p$ .
- Os modelos de neuropercolação desenvolvem generalizações neurobiologicamente motivadas de percolações *bootstrap* [27].

# Neuropercolação e neurodinâmica

- Trata-se de uma proposta alternativa à computação baseada em padrões, proposta por Walter Freeman e Robert Kozma [14].
- A informação é armazenada na forma de padrões espaciais de conexões modificadas em redes de escala muito grande.
- Memórias são recuperadas por transições de fase, que habilitam os córtices cerebrais a construir padrões espaciais de modulação de amplitude de uma onda oscilatória de banda estreita.
- Ou seja, a informação é codificada por padrões espaciais de pesos de conexões sinápticas que acoplam elementos de processamento não-lineares.

# Neuopercolação e neurodinâmica

- Cada categoria de entrada sensorial tem um grupo de células nervosas hebbianas.
- Quando acessado por um estímulo, o grupo guia o córtex aos atratores, um para cada categoria.



# Neuropercolação e neurodinâmica

- Os dispositivos de memória oscilantes são biologicamente motivados, pois são baseados em observações de que o processamento de informação sensorial no sistema nervoso central é realizado via oscilações coletivas de populações de neurônios globalmente interagentes.
- Essa abordagem provê uma nova proposta para as redes neurais.
- Do ponto de vista teórico, o modelo proposto ajuda a entender o papel das transições de fase em sistemas artificiais e biológicos.
- É introduzida uma família de autômatos celulares aleatórios, que exibem o comportamento dinâmico necessário para simular sensação, percepção e intenção [14].

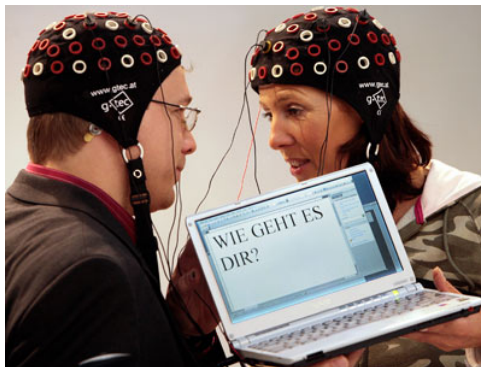
# Sumário

- 1 Modelos de Cérebro
  - Neurodinâmica
  - Hodgkin-Huxley
  - Sistemas Dinâmicos
- 2 Neurodinâmica de Freeman
  - Modelo
  - EEG
  - Conjuntos-K
  - Ação em massa
  - Percolação
- 3 BCI
  - Interface Cérebro-Computador

# BCI

- Uma técnica não-invasiva para permitir a *interface cérebro-computador* (BCI) direta pode ser um EEG de crânio - um conjunto de eletrodos colocados na cabeça como um chapéu, que permite monitorar o comportamento cognitivo de animais e seres humanos, usando ondas cerebrais para interagir com o computador.
- É um tipo de um computador sem teclado, que elimina a necessidade da interação pela mão ou voz (veja figura 9).

# BCI



**Figure 9 :** Duas pessoas na Alemanha usam BCI para escrever “Como vai você?”

# BCI

- O grupo de Neurodinâmica do Cérebro & Comportamento do Laboratório de Neurodinâmica Computacional (CND) do Instituto de Tecnologia FedEx da Universidade de Memphis é dedicado à pesquisa de comportamento cognitivo de animais e humanos, incluindo o uso de abordagens de genética molecular ou comportamental, para estudos que envolvem a utilização de técnicas de imagem cerebral, aplicando modelos matemáticos e computacionais dinâmicos, para estudos neuroetológicos.
- A pesquisa tem três usos para o BCI:
  - 1 jogos de video/computador;
  - 2 para dar suporte a pessoas com deficiências ou limitações físicas, tais como os idosos; e
  - 3 para melhorar o controle de máquinas complexas, tal como uma aeronave e outros usos militares e civis [21].

# BCI

- A interface cérebro-computador direto daria àqueles com limitações físicas ou àqueles máquinas operacionais complexas “braços extras” [4].
- O plano é usar os dados obtidos via BCI para analisar os movimentos pré-motores, as mudanças no cérebro que ocorrem antes que haja realmente um movimento, e aplicar isso para alguém que tem um dispositivo protético, que lhe permita melhor manipulá-lo.
- Como o cérebro é normalmente multitarefa, os pesquisadores terão que localizar o sinal para a tarefa desejada, dentro de todas as outras coisas acontecendo no cérebro.

# Bibliografia I

- [1] B. Aguera y Arcas, A. L. Fairhall, and W. Bialek  
“Computation in a Single Neuron: Hodgkin and Huxley Revisited”.  
*Neural Computation* 15, 1715–1749 (2003), MIT Press.
- [2] J. Bernstein  
“Untersuchungen zur Thermodynamik der bioelektrischen Ströme”.  
*J. Pflügers Arch. Ges. Physiol.* 92, 521–562 (1902).
- [3] Bryn Mawr College  
“Hodgkin-Huxley Model of Action Potentials”. Differential Equations. Math 210. slides.  
<http://www.brynmawr.edu/math/people/vandiver/documents/HodgkinHuxley.pdf>.

# Bibliografia II

- [4] CLION - Center for Large-Scale Integration and Optimization Networks  
Neurodynamics of Brain & Behavior, FedEx Institute of Technology, University of Memphis, Memphis, TN, USA.  
<http://clion.memphis.edu/laboratories/cnd/nbb/>.
- [5] K. S. Cole and H. J. Curtis  
“Electric Impedance of the Squid Giant Axon during Activity”.  
*Gen. Physiol.* 22, 649–670 (1939).
- [6] C. Eliasmith and C. H. Anderson  
*Neural Engineering - Computation, Representation, and Dynamics in Neurobiological Systems*.  
A Bradford Book, The MIT Press, 2003.



# Bibliografia III

[7] W. J. Freeman

*Mass action in the nervous system - Examination of the Neurophysiological Basis of Adaptive Behavior through the EEG.*

Academic Press, New York San Francisco London 1975.

[8] W. J. Freeman

*How Brains Make Up Their Minds.*

Columbia University Press, New York, 2000.

[9] W. J. Freeman

*Mesoscopic Brain Dynamics.*

Springer-Verlag London Limited 2000.

# Bibliografia IV

[10] W. J. Freeman

“How and Why Brains Create Meaning from Sensory Information”.

*International Journal of Bifurcation & Chaos* 14: 513–530, 2004.

[11] W. J. Freeman

“Proposed cortical ‘shutter’ in cinematographic perception”.

In L. Perlovsky and R. Kozma (Eds.), *Neurodynamics of Cognition and Consciousness*, New York: Springer, 2007, pp. 11–38.

[12] W. J. Freeman and H. Erwin

“Freeman K-set,” *Scholarpedia* 3(2):3238.

[http://www.scholarpedia.org/article/Freeman\\_K-set](http://www.scholarpedia.org/article/Freeman_K-set), 2008.

# Bibliografia V

[13] W. J. Freeman and R. Kozma

“Freeman’s mass action,” *Scholarpedia* 5(1):8040.

[http://www.scholarpedia.org/article/Freeman's\\_mass\\_action](http://www.scholarpedia.org/article/Freeman's_mass_action), 2010.

[14] W. J. Freeman and R. Kozma

“Neuropercolation + Neurodynamics: Dynamical Memory Neural Networks in Biological Systems and Computer Embodiments,”

IJCNN2011 Tutorial 6, *IJCNN 2011 - International Joint Conference on Neural Networks*, San Jose, California, July 31, 2011.

# Bibliografia VI

[15] J. Guckenheimer

“Bifurcation,” *Scholarpedia* 2(6):1517.

[http:](http://www.scholarpedia.org/article/Bifurcation)

[//www.scholarpedia.org/article/Bifurcation](http://www.scholarpedia.org/article/Bifurcation),  
2007.

[16] M. Häuser

“The Hodgkin-Huxley theory of the action potential.”

*Nature - neuroscience supplement*, volume 3, November  
2000, pp. 1165.

[17] S. Haykin

*Neural Networks - A Comprehensive Foundation. Second  
Edition.*

Prentice-Hall, 1999.

# Bibliografia VII

[18] A. L. Hodgkin and A. F. Huxley

“Action potentials recorded from inside a nerve fibre.”

*Nature* 144:710–11, 1939.

[19] A. L. Hodgkin and B. Katz

“The effect of sodium ions on the electrical activity of the giant axon of the squid.”

*J. Physiol. (Lond.)* 108, 37–77 (1949).

[20] A. L. Hodgkin and A. F. Huxley

“A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve,”

*J. Physiol.* (1952) 117, 500–544.

# Bibliografia VIII

[21] S. Hoover

“Kozma’s research is brain wave of the future,”

*Update - The newsletter for the University of Memphis,*

http:

//www.memphis.edu/update/sep09/kozma.php,  
2009.

[22] E. M. Izhikevich

*Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of  
Excitability and Bursting,*

The MIT Press, 2007.

[23] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. Jessell

*Essentials of Neural Science and Behavior,*

Appleton & Lange, Stamford, Connecticut, 1995.

# Bibliografia IX

- [24] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. Jessell  
*Principles of Neural Science*,  
Fourth Edition, McGraw-Hill, 2000.
- [25] A. K. Katchalsky, V. Rowland and R. Blumenthal  
*Dynamic patterns of brain cell assemblies*,  
MIT Press, 1974.
- [26] R. Kozma, H. Aghazarian, T. Huntsberger, E. Tunstel, and  
W. J. Freeman  
“Computational aspects of cognition and consciousness in  
intelligent devices,”  
*IEEE Computational Intelligence Magazine*, August 2007,  
pp. 53–64.

# Bibliografia X

[27] R. Kozma

“Neuropercolation,” *Scholarpedia* 2(8):1360.

<http://www.scholarpedia.org/article/Neuropercolation>, 2007.

[28] W. S. McCulloch and W. Pitts

“A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity.”

*Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, pp. 115-133, 1943.

[29] M. Nelson and J. Rinzel

“The Hodgkin-Huxley Model”.

In J. M. Bower and D. Beeman (Eds.), *The Book of GENESIS: Exploring Realistic Neural Models with the GEneral NEural Simulation System*, Second edition, Springer-Verlag, New York (1998), pp. 29–50 (chapter 4).



# Bibliografia XI

- [30] J. Rinzel and G. B. Ermentrout  
“Analysis of neuronal excitability and oscillations,”  
in C. Koch and I. Segev (Eds.), *Methods In Neuronal Modeling: From Synapses To Networks*, MIT Press, 1989.
- [31] J. L. G. Rosa  
*Fundamentos da Inteligência Artificial*,  
Editora LTC, Rio de Janeiro, 2011.
- [32] J. L. G. Rosa  
“Biologically Plausible Artificial Neural Networks” (chapter)  
in Kenji Suzuki (ed.), *Artificial Neural Networks*, ISBN  
980-953-307-567-4. Intech, 2012.

# Bibliografia XII

[33] A. Saa

“O Modelo de Hodgkin-Huxley”.

[vigo.ime.unicamp.br/~fismat/  
2004-I-NC-aula7.pdf](http://vigo.ime.unicamp.br/~fismat/2004-I-NC-aula7.pdf).

[34] R. H. Schonmann

“On the Behavior of Some Cellular Automata Related to Bootstrap Percolation,”

*The Annals of Probability*, Vol. 20, No. 1 (Jan., 1992), pp. 174–193.

[35] G. M. Shepherd

*The synaptic organization of the brain*,

fifth edition, Oxford University Press, USA, 2003.

# Bibliografia XIII

## [36] J. R. Smythies

Book review on “How Brains Make up Their Minds. By W. J. Freeman.”

*Psychological Medicine*, 2001, 31, 373–376. 2001  
Cambridge University Press.