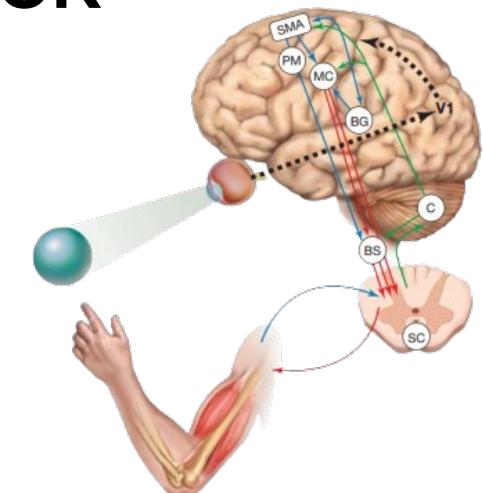


ORGANIZAÇÃO DO SISTEMA MOTOR

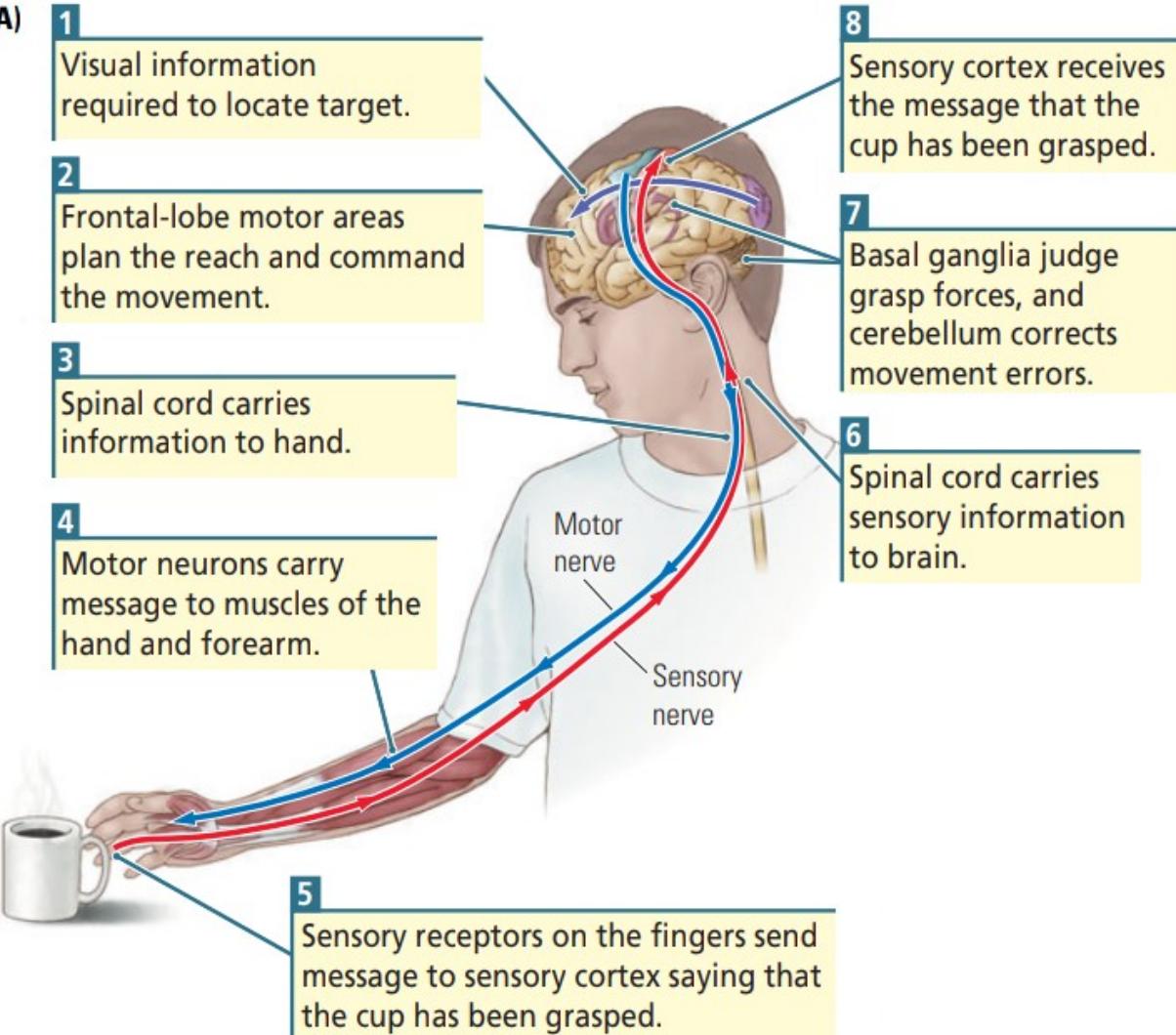
Prof. Tércio Apolinário-Souza

01/2025





(A)





3

Premotor cortex organizes movement sequences.

4

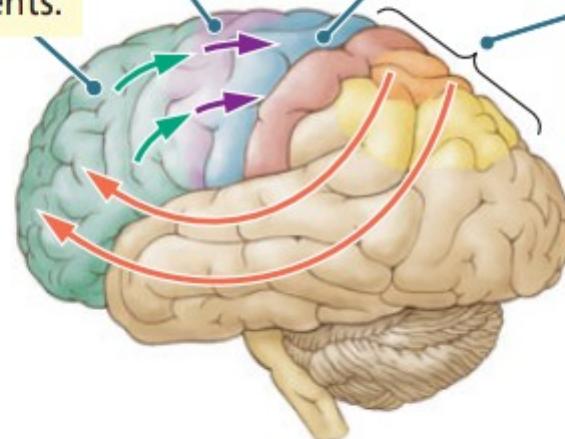
Motor cortex produces specific movements.

2

Prefrontal cortex plans movements.

1

Posterior cortex provides sensory information to the frontal cortex.

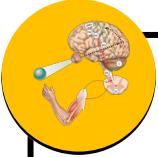


Posterior sensory cortex sends goals.

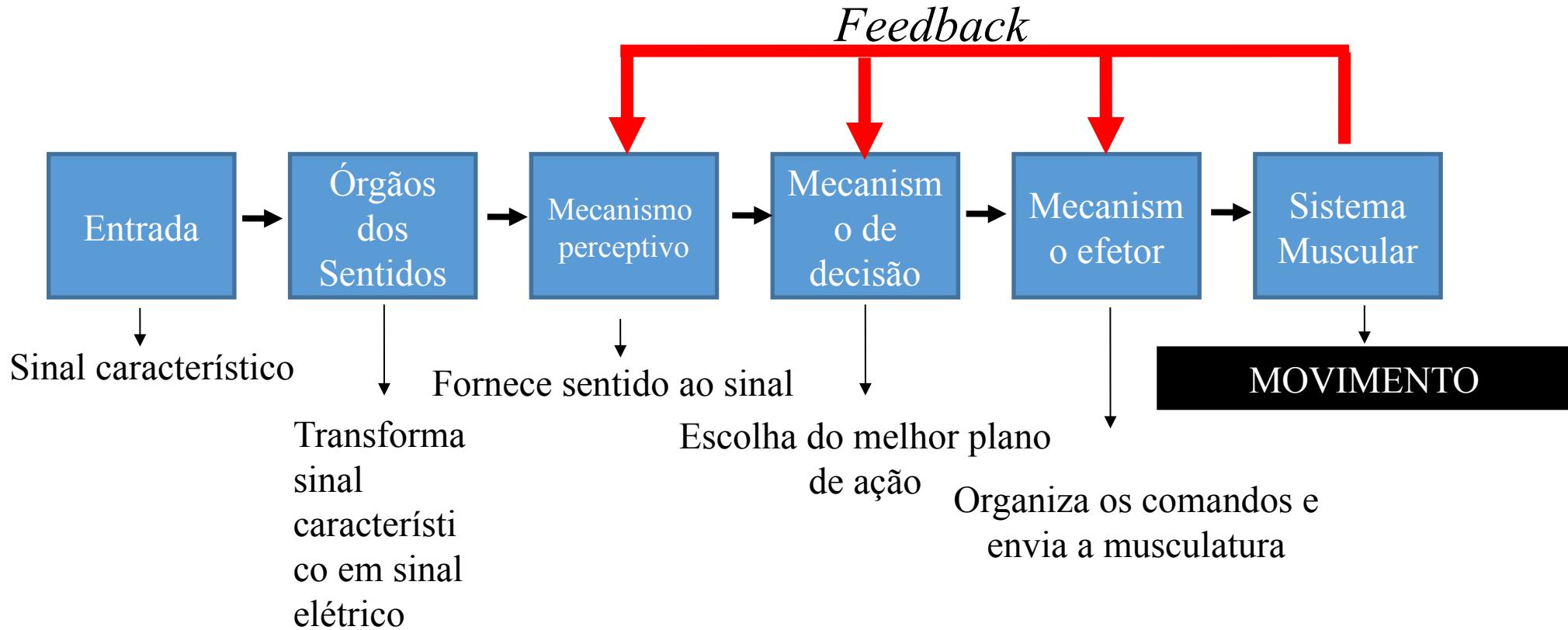
Prefrontal cortex plans.

Premotor cortex sequences.

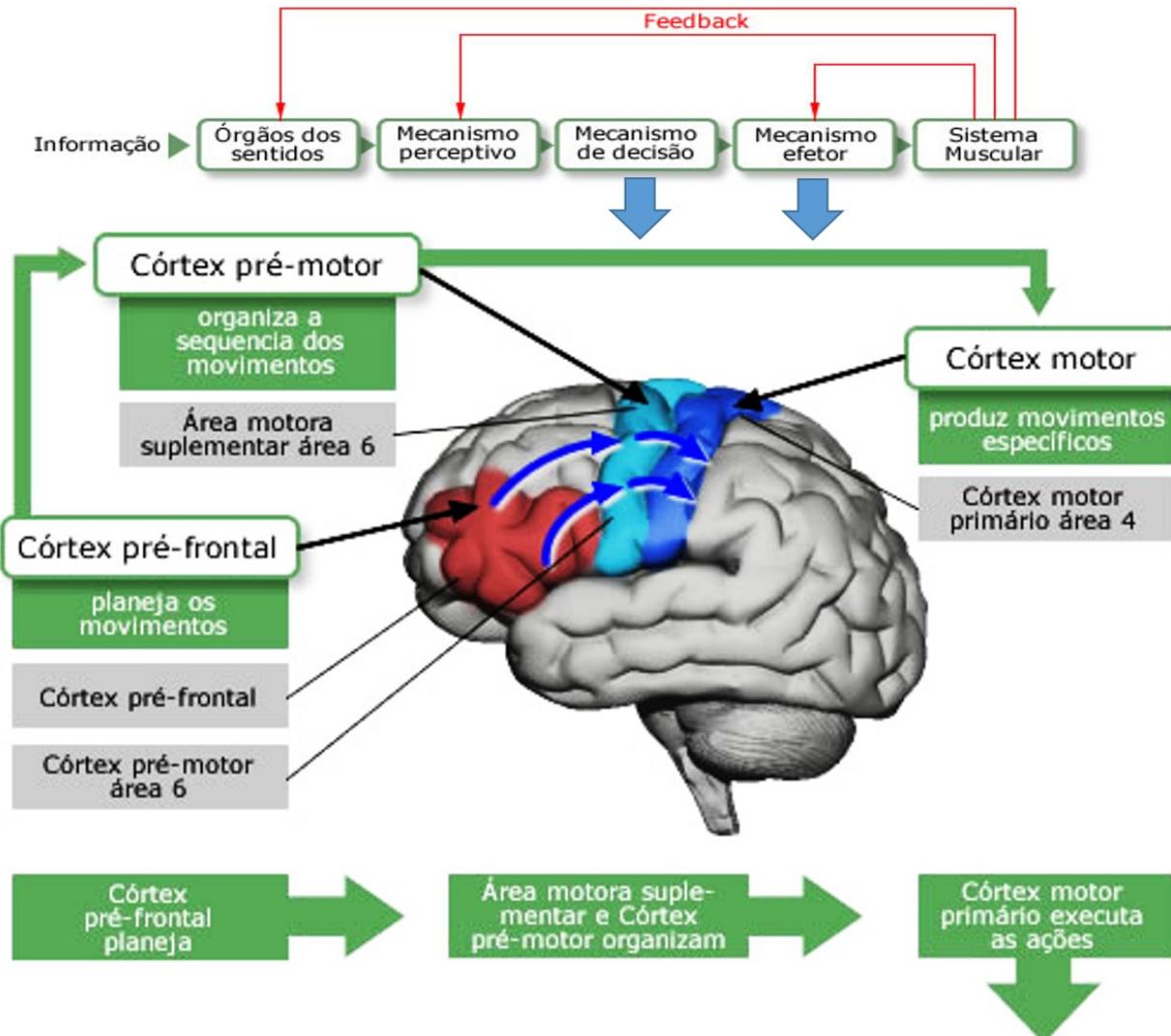
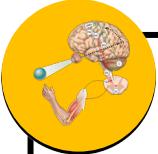
Motor cortex executes actions.

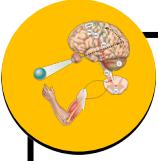


Modelo de Marteniuk



(Adaptado de Marteniuk, 1976; Tani 1989)





Seleção do programa motor córtex pré-motor e AMS

Estriado

Outras áreas (ex. cerebelo)

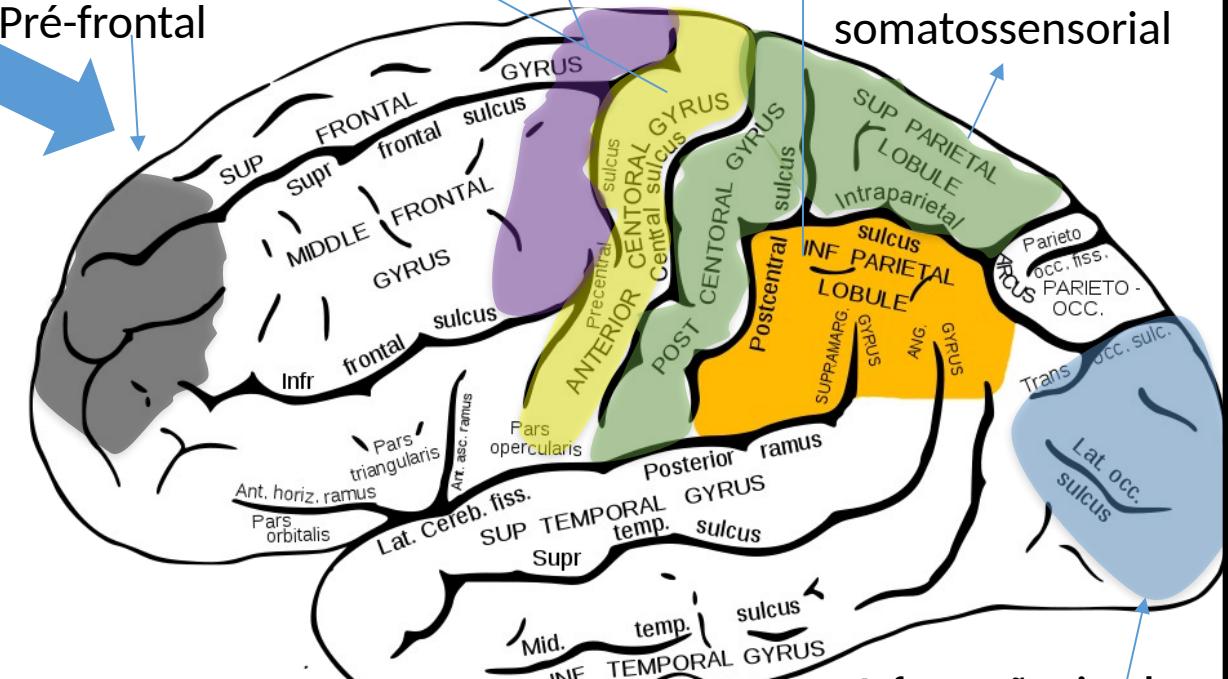
Decisão o movimento
Pré-frontal

Output motor M1

Integra as informações das regiões
córtex associativo terciário

Proprioceptiva
somatossensorial

Informação visual
córtex visual
(primário e secundário)





Objetivo do P1



Visão geral

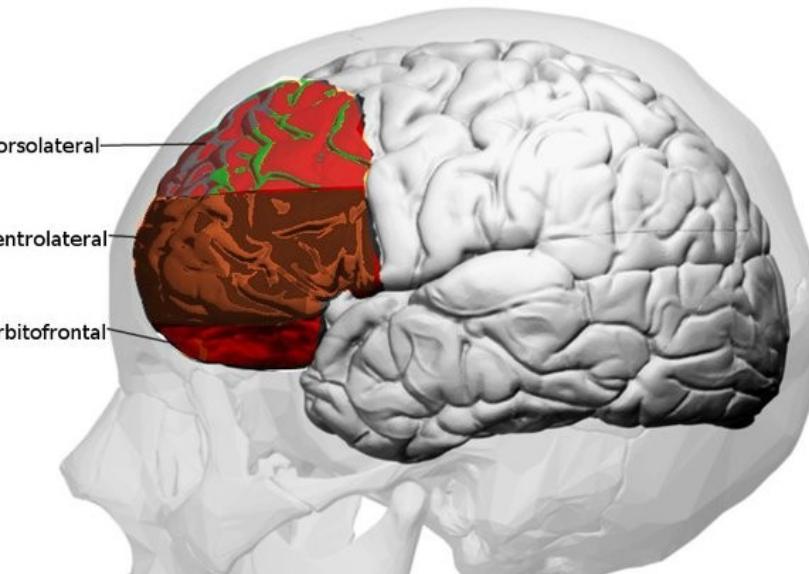
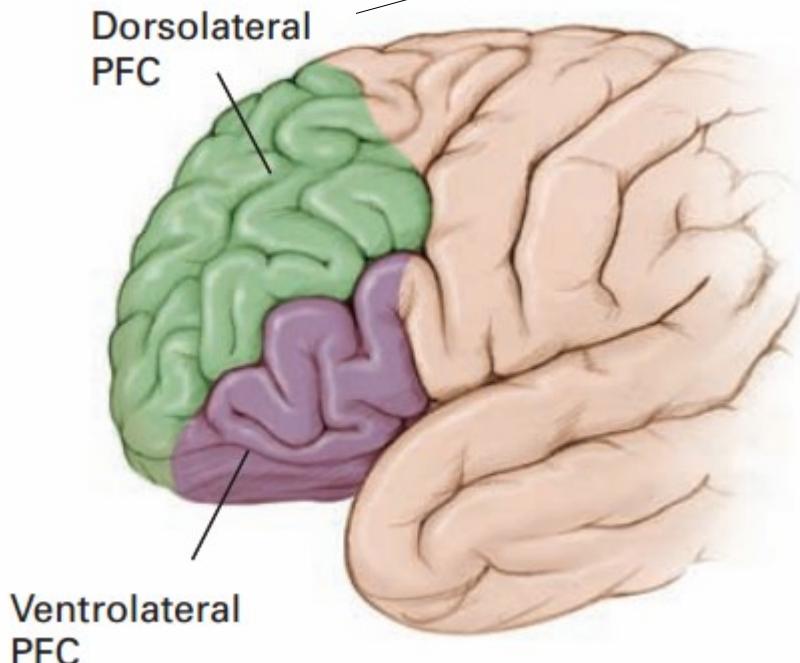
Ao final você deverá ser capaz de:

- | 1 compreender a anatomia do CPF
- | 2 descrever um modelo para CPF



A anatomia

+ envolvido na MT





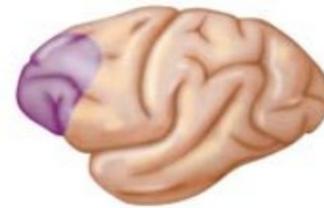
Comparação do Córtex Pré-frontal em Diferentes Espécies



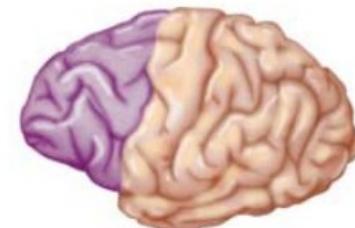
Squirrel monkey



Cat



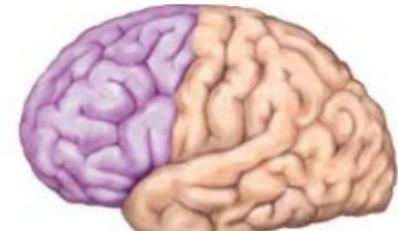
Rhesus monkey



Chimpanzee



Dog



Human

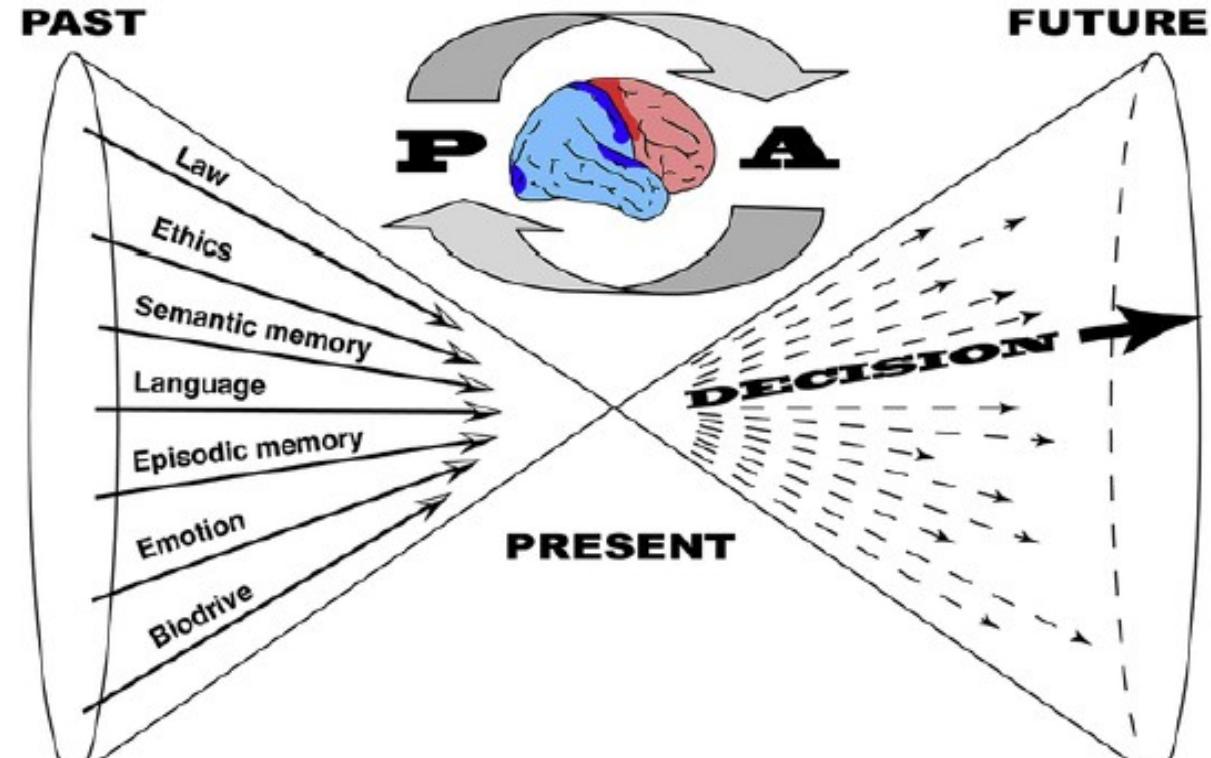
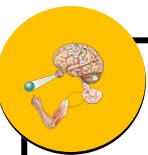
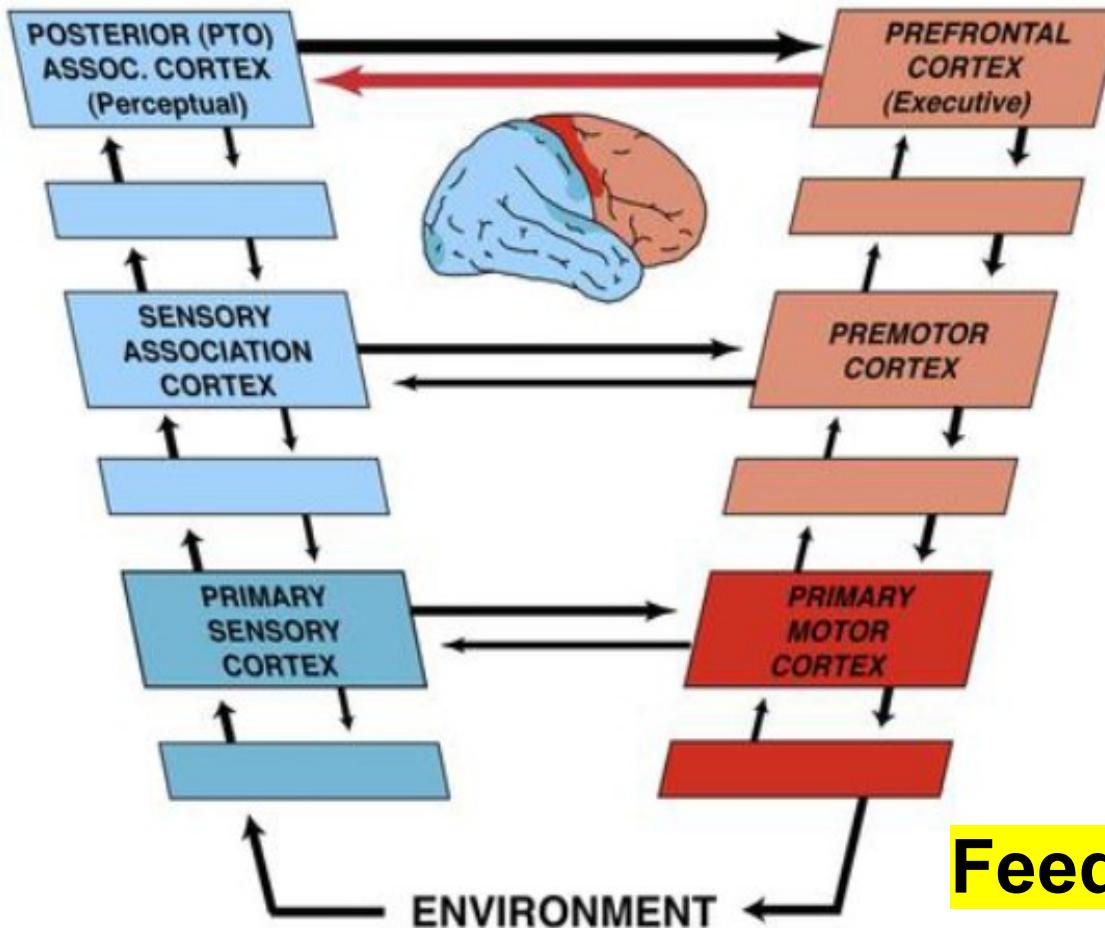
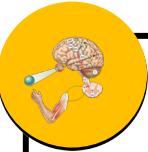
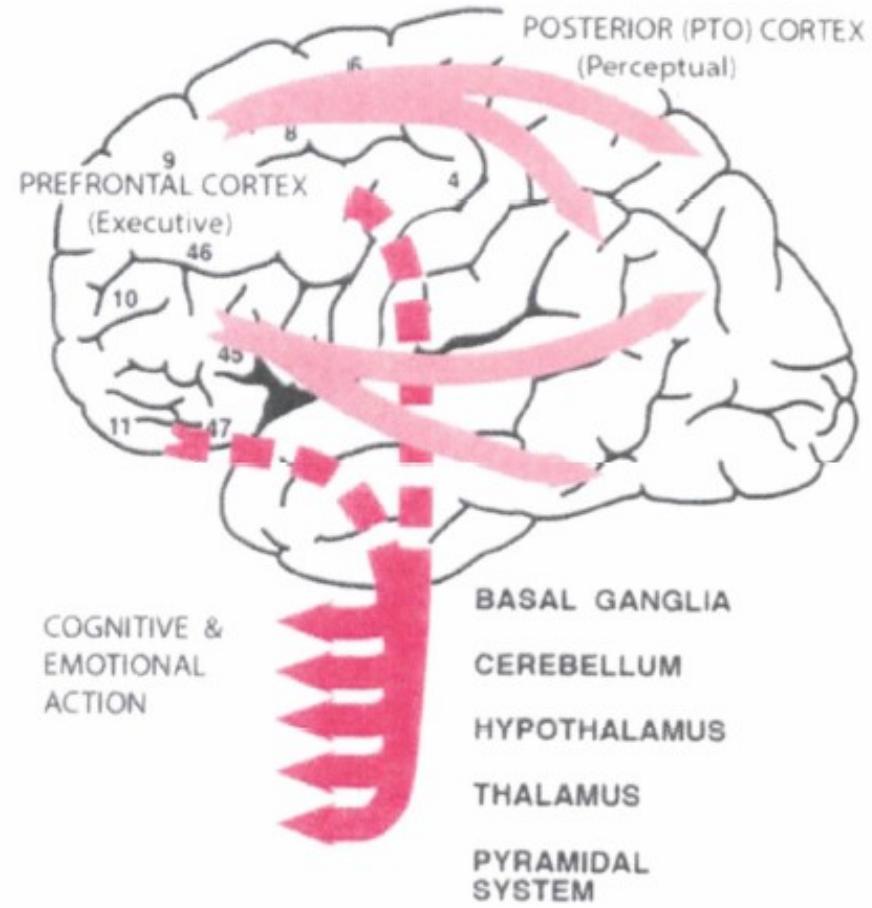
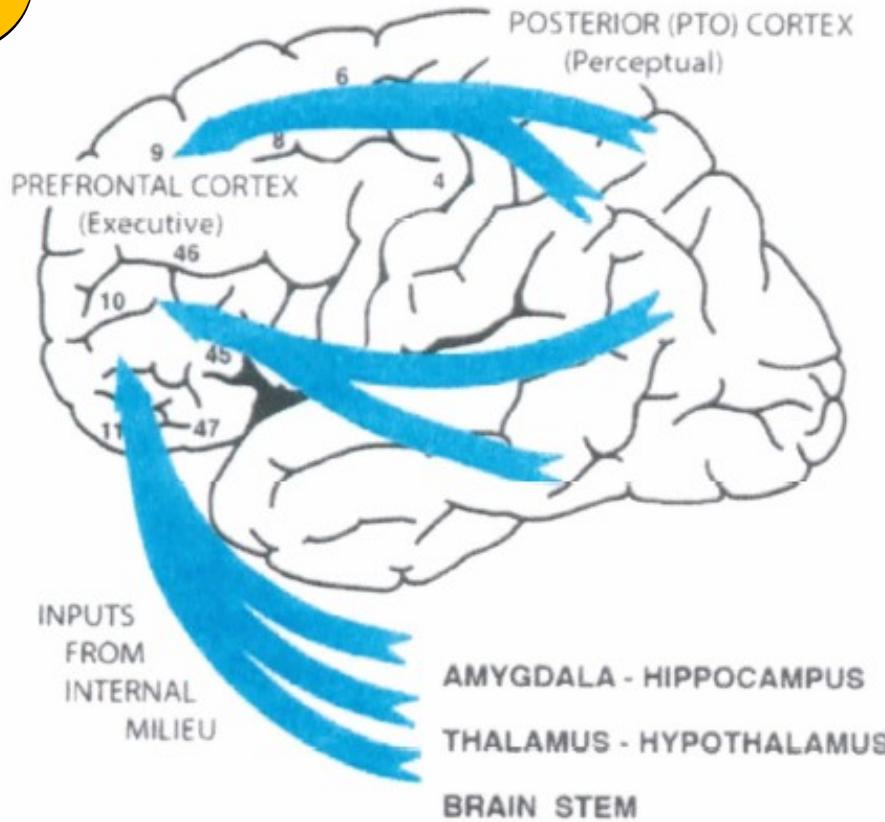


Figure 1.6

(Fuster, 2017)



(Foster, 2017)



(Foster, 2017)



O córtex pré-frontal está associado a uma ação prospectiva (que se relaciona com o futuro) da ação.



PARA FIXAR

1. O CPF é dividido em três grande áreas.
2. Feedback antecipatório prepara o sistema para ação.
3. CPF está associado a uma ação no futuro.



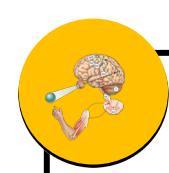
Objetivo do P2



MT no mecanismo decisional

Ao final você deverá ser capaz de:

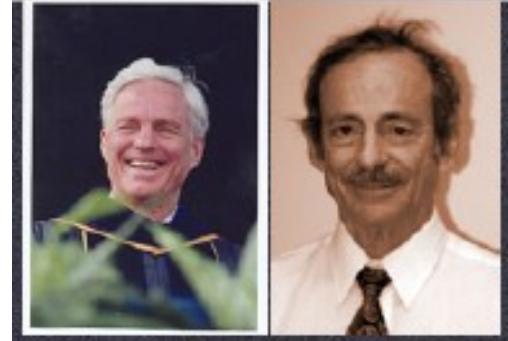
- | 1 compreender o modelo de Atkinson e Shiffrin's (1968)
- | 2 relacionar MT e CPF
- | 3 descrever os mecanismos de MT no CPF



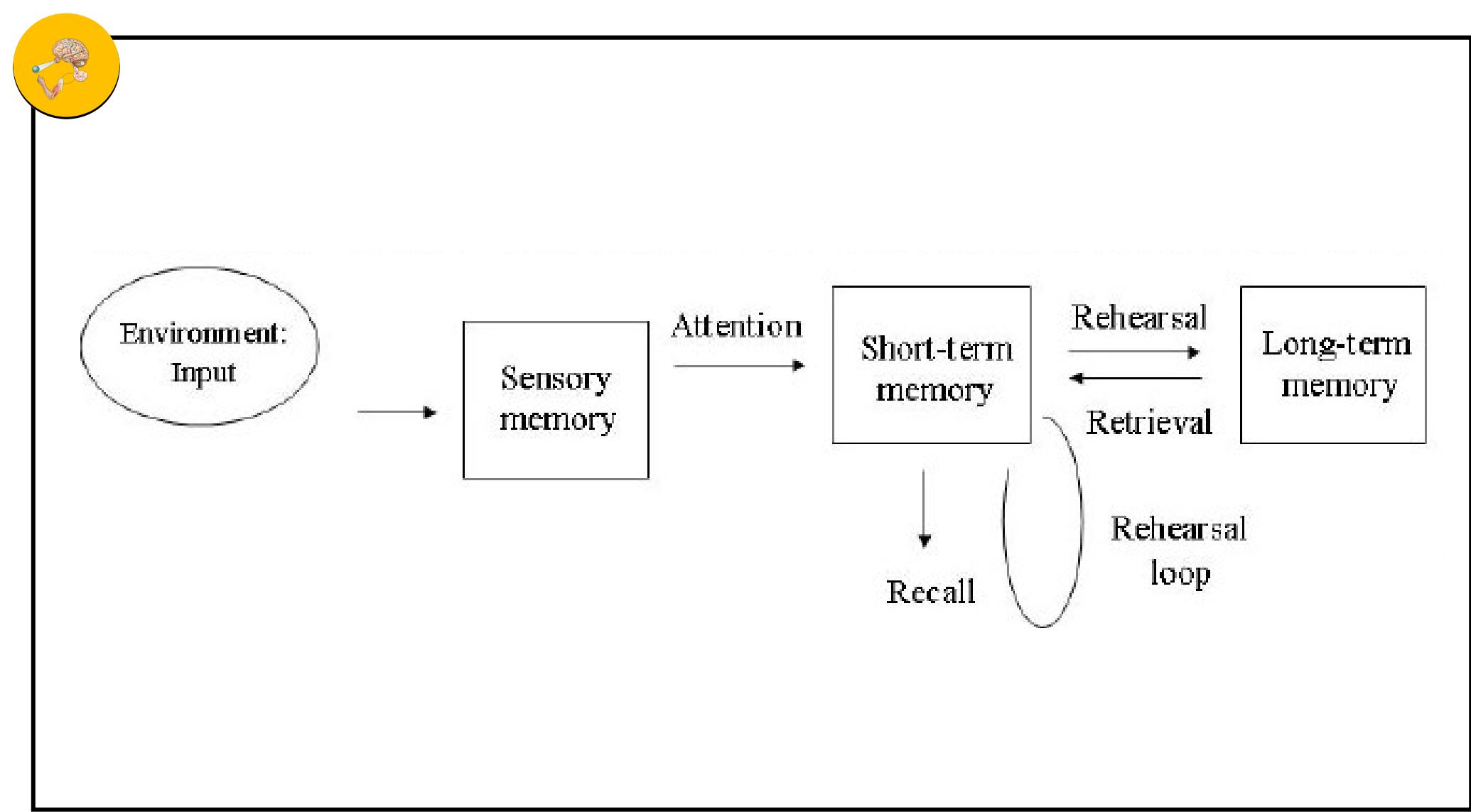
SISTEMA DE MEMÓRIAS

Modelo Atkinson e Shiffrin's (1968)

- Modelo clássico para explicar memória: **MODELO MODAL**
- Sugerem que a memória é armazenada num sistema de multi estocagem
- 1) Memória sensorial (1/4 a 1/2 s): detecção de informações pelos órgão do sentido
- 2) Memória de curta-duração (0-18s): armazenamento temporário de informações sensoriais cuja atenção foi direcionada
- 3) Memória de longa-duração: é a memória de curta duração que foi repetida e “ensaiada”

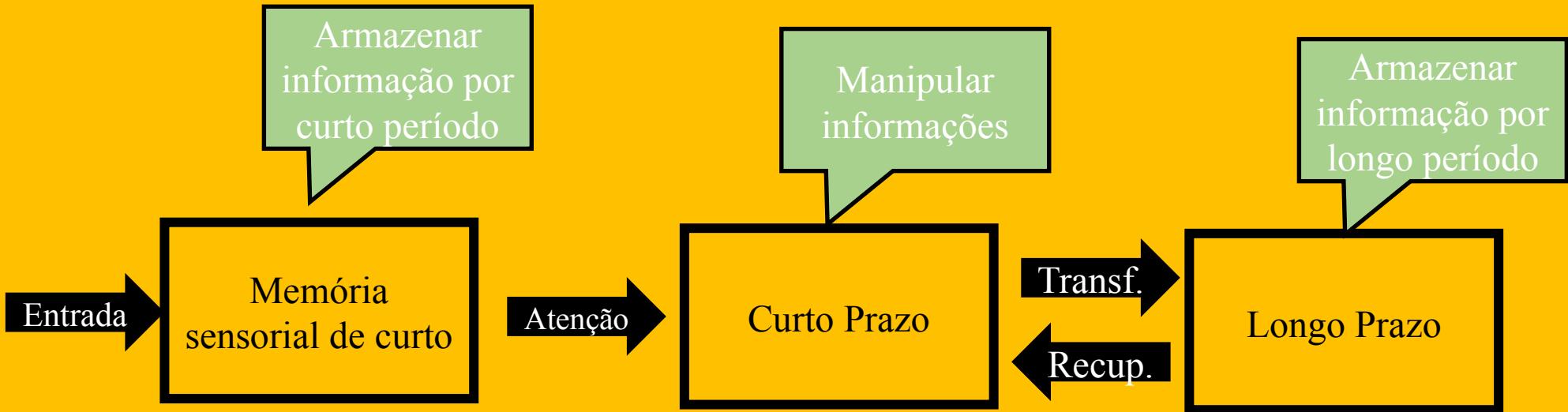


Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). "Chapter: Human memory: A proposed system and its control processes". In Spence, K. W., & Spence, J. T. *The psychology of learning and motivation* (Volume 2). New York: Academic Press. pp. 89– 195.





SISTEMA DE MEMÓRIAS EM AÇÕES MOTORAS



(Schmidt e Lee, 1999)



Observações

Esse modelo foi testado exaustivamente e alguns de seus pressupostos refutados.

Verificou-se que a informação não precisa necessariamente passar por uma **via linear**, mas poderia seguir “em paralelo”.

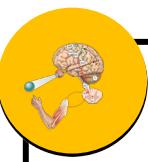
O sistema de curto prazo **não é único**, mas subdividido em subsistemas específicos, como a alça fonológica e a visoespacial do modelo de memória operacional.

O sistemas que funcionam de forma **paralela** e **distribuída**.



Memória de trabalho

Memória de trabalho depende de uma atividade persistente do córtex pré-frontal

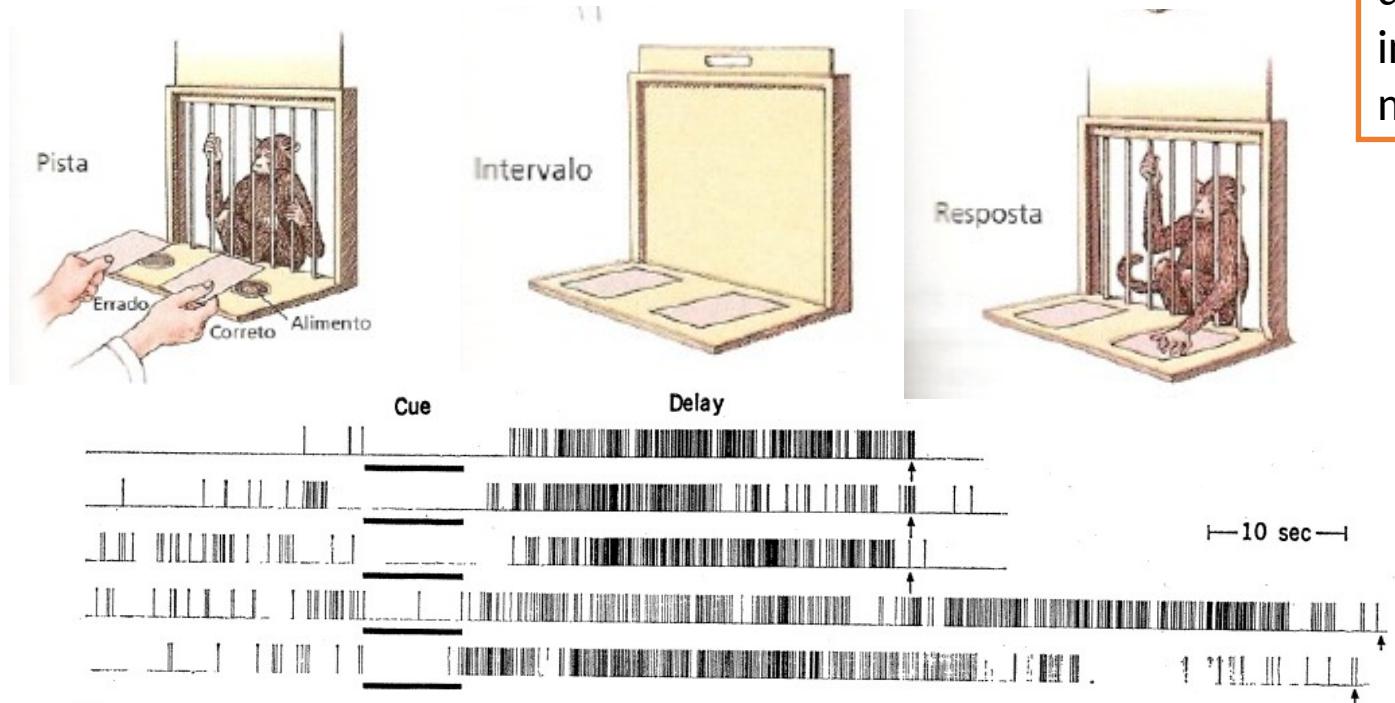


Neuron Activity Related to Short-Term Memory

Neuron Activity Related to Short-Term Memory

Author(s): Joaquin M. Fuster and Garrett E. Alexander

Source: *Science*, New Series, Vol. 173, No. 3997 (Aug. 13, 1971), pp. 652-654



OS Neurônios do CPF disparam durante o intervalo, indicando a manutenção da informação

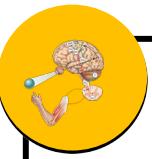
Fig. 3. Firing of a prefrontal cortex unit in five consecutive trials with delays of 32, 32, 32, 67, and 65 seconds, respectively, from top to bottom. Spikes are represented by standard vertical lines in a graphic display obtained by a computer method. Event indicators as in Fig. 2.



Os dois principais mecanismos que para
atividade persistente do córtex pré-frontal

**Propriedade
intrínseca da
membrana**

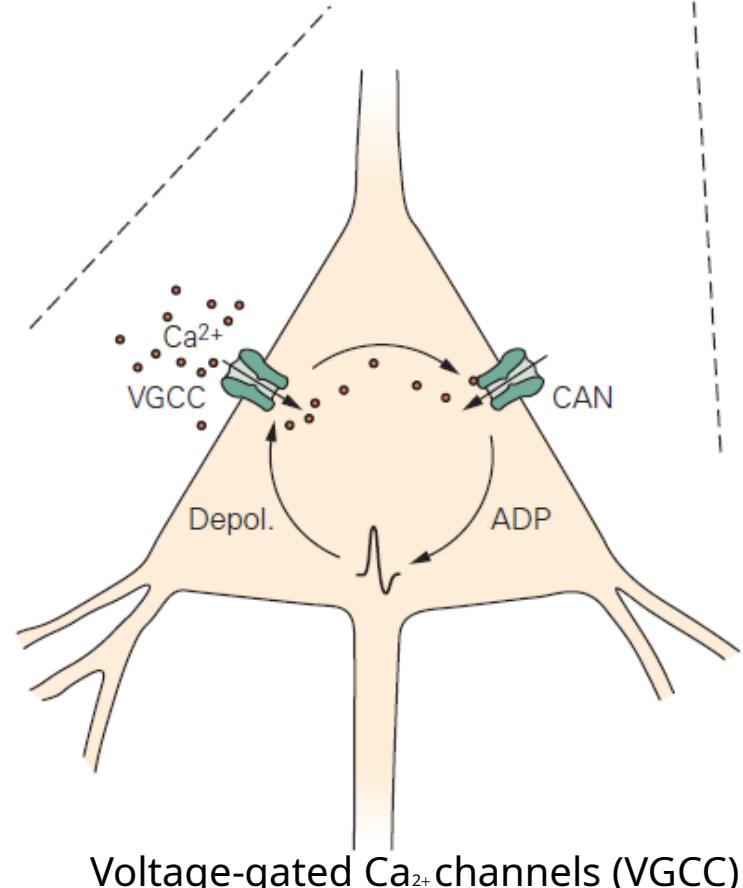
**Conectividade
sináptica
recorrente**

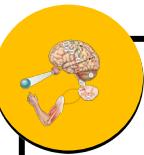


Propriedade intrínseca da membrana

Canal de cátions
não seletivos
ativado por Ca^{2+}
(CAN)

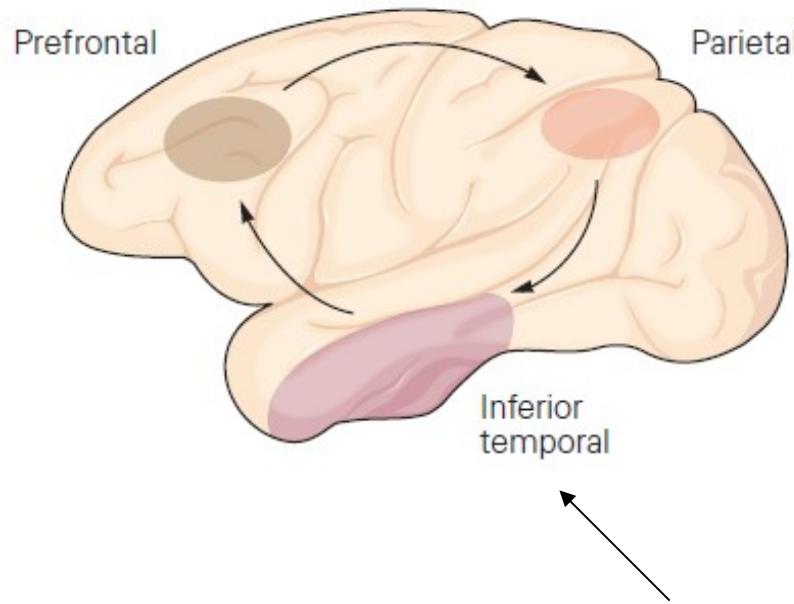
- 1 - Um receptor muscarínio é ativado por acetilcolina;
- 2 - Aumento de Ca^{2+} intracelular;
- 3 - Estimula o CAN que mantém a despolarização da membrana



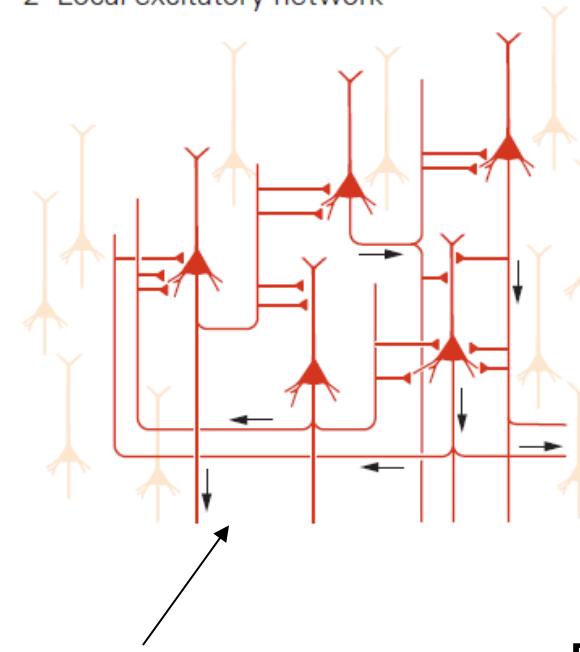


Conectividade sináptica recorrente

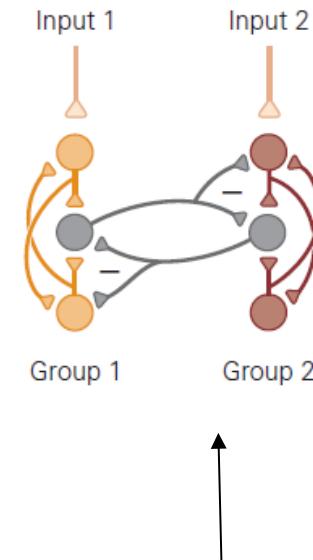
1 Long-range synaptic interactions



2 Local excitatory network



3 Mutual inhibition network



Atividade reverberante

Desinibir o inibitório



MEMÓRIA DE TRABALHO E OUTRAS REGIÕES CEREBRAIS

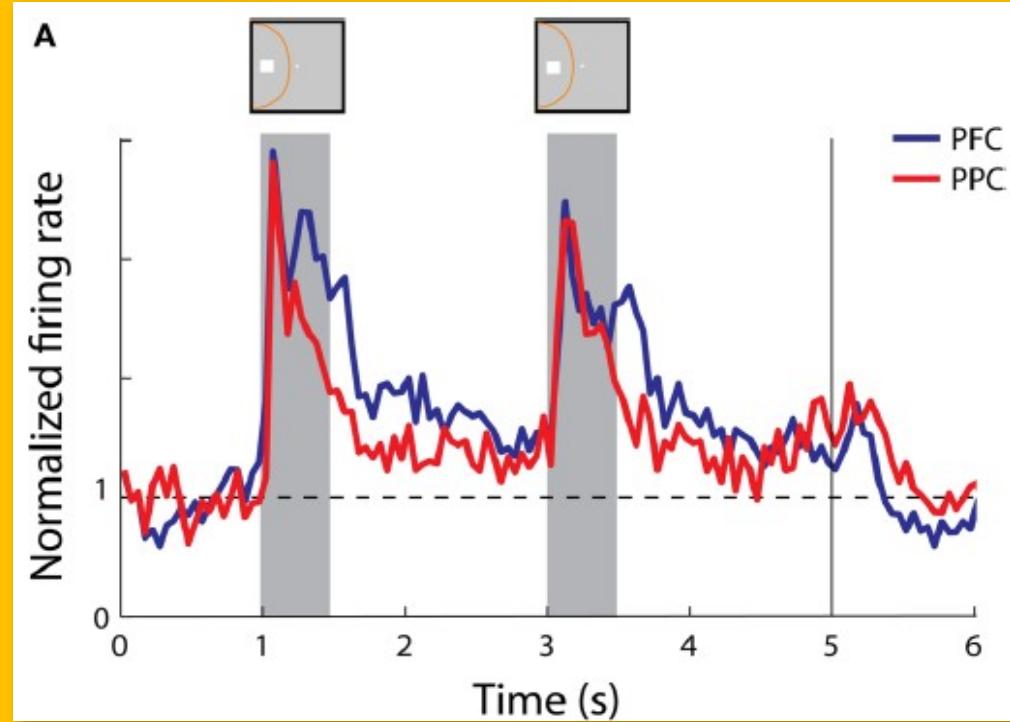
frontiers in
SYSTEMS NEUROSCIENCE

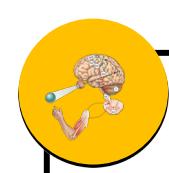
ORIGINAL RESEARCH ARTICLE
published: 14 May 2010
doi: 10.3389/fnins.2010.00012



Comparison of neural activity related to working memory in primate dorsolateral prefrontal and posterior parietal cortex

Xue-Lian Qi, Fumi Katsuki, Travis Meyer, Justin B. Rawley, Xin Zhou, Kristy L. Douglas and Christos Constantinidis*





RESEARCH ARTICLE

Cathodal tDCS of the Left Posterior Parietal Cortex Increases Proprioceptive Drift

João Roberto Ventura de Oliveira¹, Marco Aurélio Romano-Silva², Herbert Ugrinowitsch¹,
Tércio Apolinário-Souza¹, Lidiane Aparecida Fernandes¹, Juliana Otoni Parma¹,
Guilherme Menezes Lage¹

¹School of Physiotherapy, Occupational Physiotherapy and Physical Education, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil. ²School of Medicine, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil.

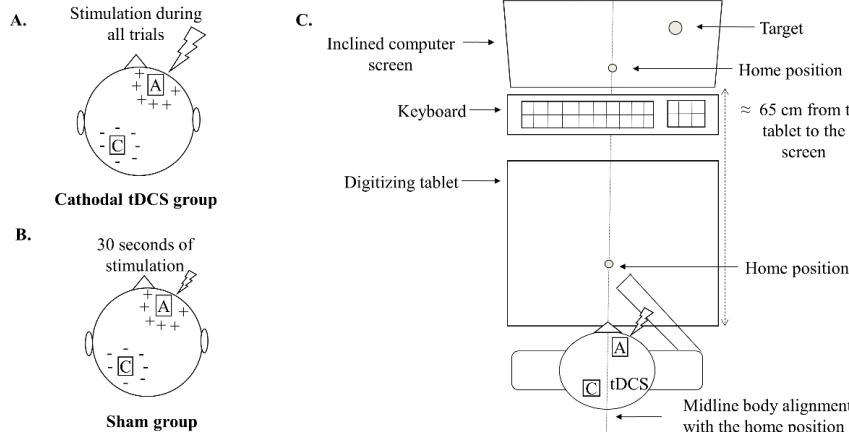
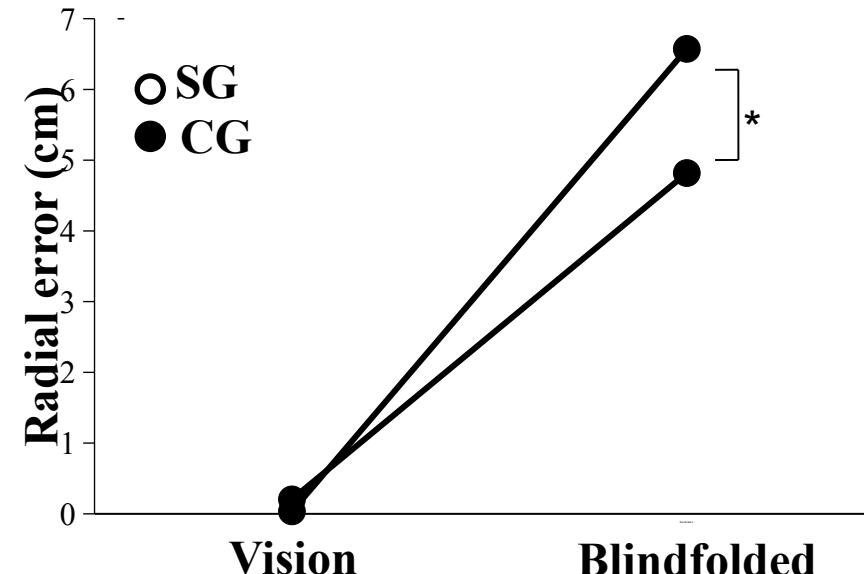


FIGURE 1. Experimental tDCS settings: A. Cathodal tDCS group; B. Sham group; C. Motor task setup.

Legend: A = anodal electrode over right supraorbital; C = cathodal electrode over posterior parietal cortex; ⚡ = Direct current from anodal to cathodal electrode.





PARA FIXAR

1. Memória sensorial, curta e longa duração são sistemas de memória relacionados.
2. MT está associada à escolha do plano de ação mais adequado.
3. Propriedades intrínsecas e conectividade recorrente são mecanismo da MT.



P1 Papel do estágio motor na ação motora

P2 Áreas motoras secundárias e o estágio motor

P3 Córtex motor primário e o estágio motor

P4 Programa motor como um cell-assembly



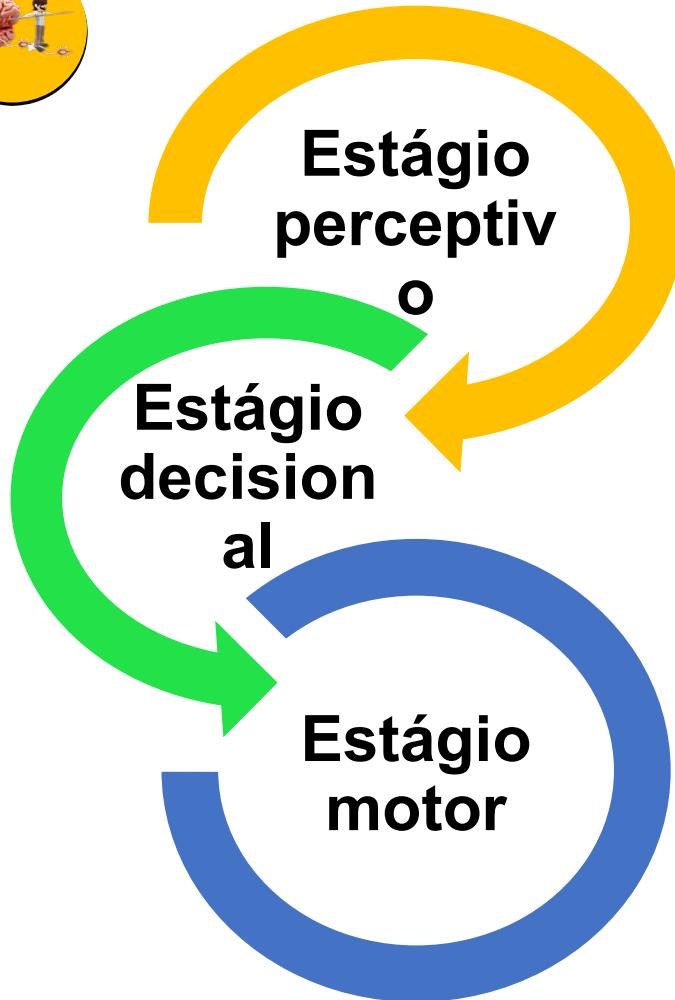
Objetivo do P1

Papel do estágio motor na ação motora

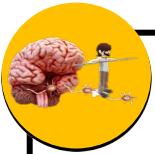


Ao final você deverá ser capaz de:

| 1 compreender a natureza do estágio motor no planejamento da ação motora.



- 1. Organização hierárquica e sequencial dos componentes da ação**
- 2. Inserção de elementos específicos do movimento**
- 3. Geração e envio dos comandos motores**

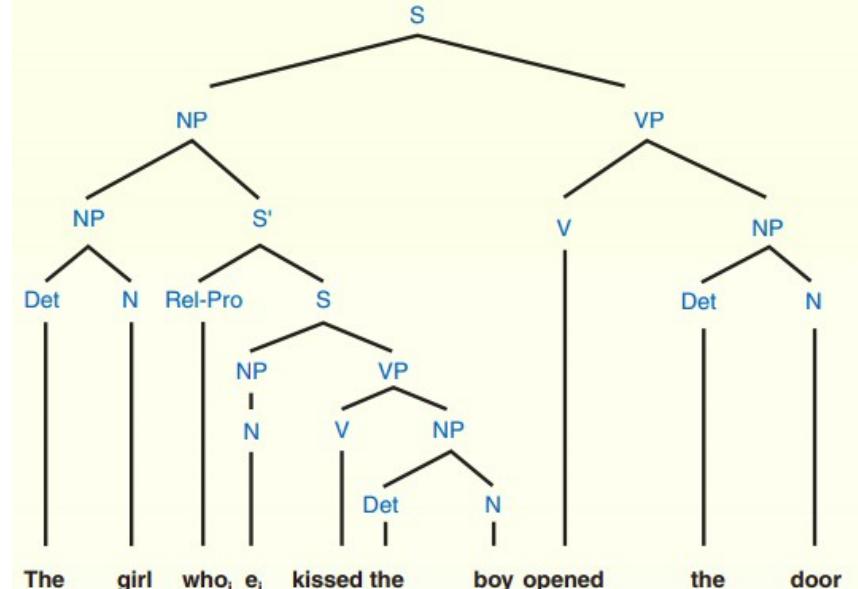


1. Organização hierárquica e sequen componentes da ação



Christus, der ist mein Leben 1st phrase (J.S. Bach)

F. Lerdahl, *Tonal Pitch Space* (2001, OUP)



(Patel. *Nature Neuroscience*, 2003)



1. Organização hierárquica e sequencial dos componentes da ação



**Teoria de
Esquema** Schmidt
1975

**Aspectos
Invariantes**

**Aspectos
Variantes**



- Feijão preto
- Carne seca
- Orelha de porco
- Rabo de porco
- Pé de porco
- Costelinha de porco
- Lombo de porco



1. Organização hierárquica e sequen componentes da ação

T. Apolinário-Souza et al. / Physiology & Behavior 160 (2016) 18–25

**Aspectos
Invariantes**

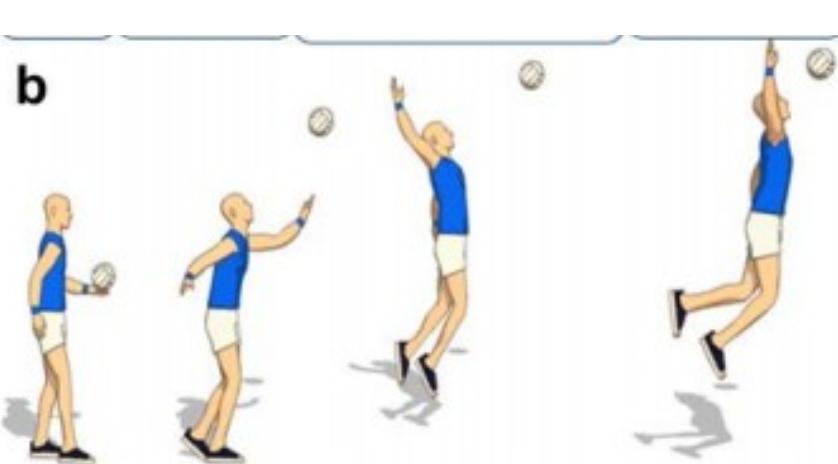
**Aspectos
Variantes**





1. Organização hierárquica e sequencial dos componentes da ação

Programa Motor Generalizado (invariante) + parâmetros (variante)



Exemplo, força total

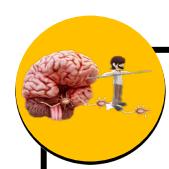


2. Inserção de elementos específicos do movimento

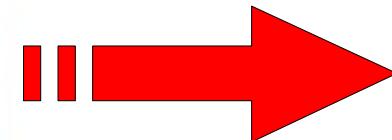
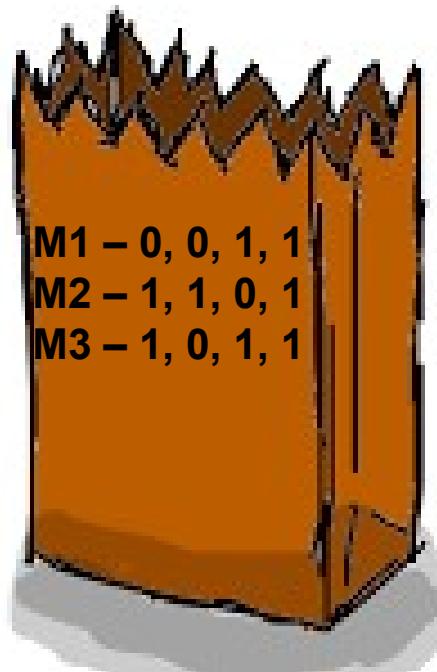


_Tudo que os músculos fazem com o sistema ósseo é aplicar uma **força de tração**.

_A aplicação dessa força é ajustável em termos em níveis, início temporal e duração.



3. Geração e envio dos comandos motores



**Sistema
Muscular**



PARA FIXAR

- 1. Organização hierárquica e
sequencial dos componentes da ação**
- 2. Inserção de elementos específicos
do movimento**
- 3. Envio dos comandos motores**



Objetivo do P2



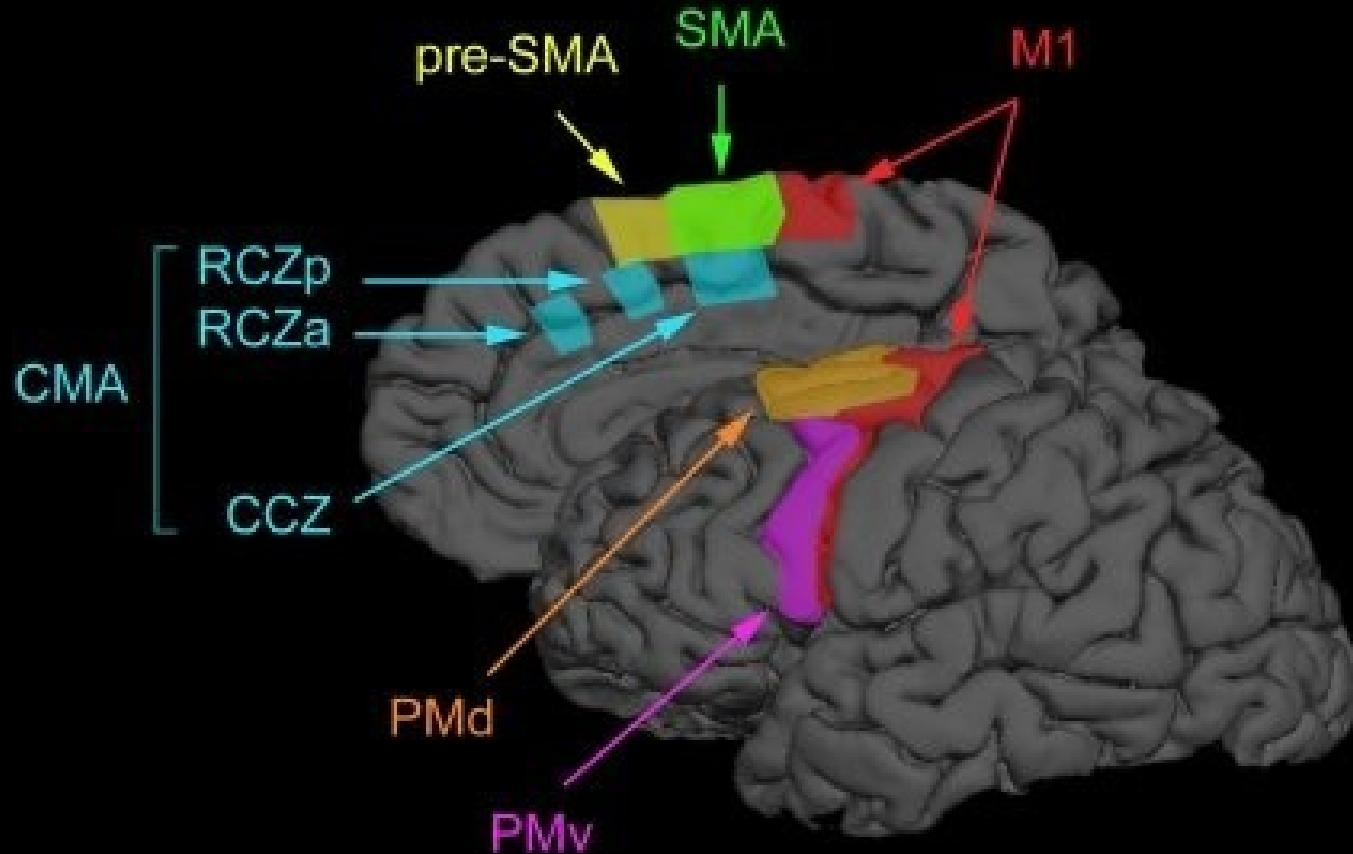
Áreas motoras secundárias e o estágio motor

**Ao final você deverá ser
capaz de:**

- | 1 Conhecer a anatomia das áreas motoras secundárias
- | 2 Compreender a relação funcional entre as áreas motoras secundárias e o estágio motor



Áreas motoras



(Picard and Strick. Cerebral Cortex, 1996 & Picard and Strick. Curr. Opin. Neurobiol., 2001)



Complexo motor suplementar

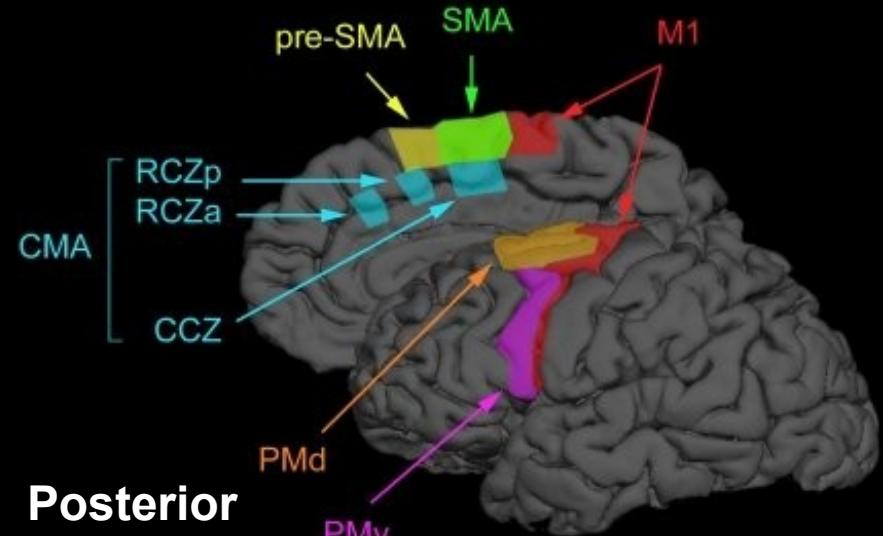
Pré-área motora
suplementar (pre-SMA)
Área motora suplementar
(SMA)

Córtex pré-
motor

Área motora
cingulada
(CMA)

Campo ocular
suplementar
(SEF)

(Picard and Strick. Cerebral Cortex, 1996 & Picard and Strick. Curr. Opin. Neurobiol., 2001)





Áreas motoras secundárias e o estágio motor

1. Organização hierárquica e sequencial dos componentes da ação ✓

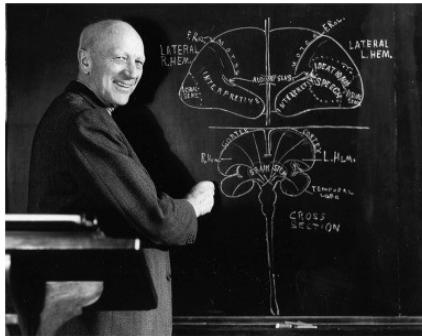
2. Inserção de elementos específicos do movimento X

3. Geração e envio dos comandos motores X

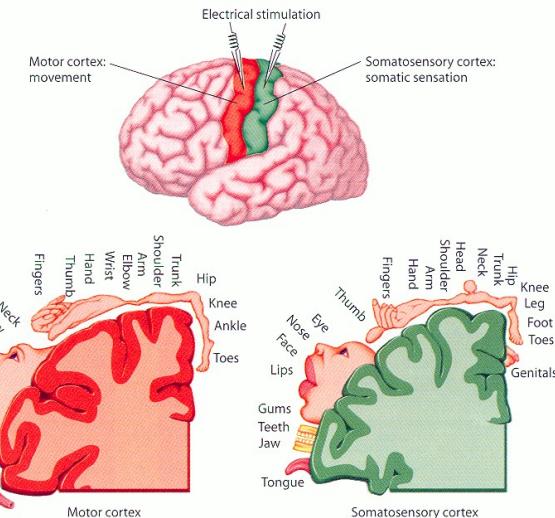


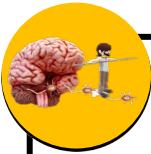
Áreas motoras secundárias são menos associadas a ações específicas de uma parte específica do corpo. Em vez disso, estão mais associados a ações complexas.

Penfield, M1 e homúnculo

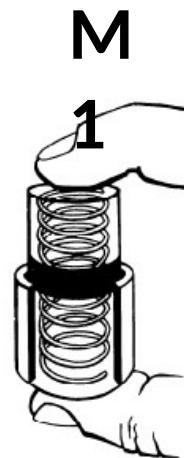


Penfield W, Boldrev E. Brain, 1937.





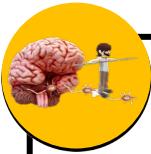
Áreas motoras secundárias são menos associadas a ações de uma parte específica do corpo. Em vez disso, estão mais associadas a ações complexas.



Áreas motoras
secundárias



(Roland et al. Journal of Neurophysiology, 1980)



Áreas motoras secundárias são mais dependentes do contexto

Diferentes contextos e mesma ação

Contexto A



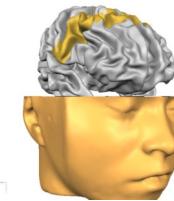
Contexto B



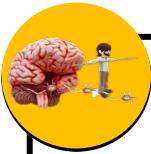
M1



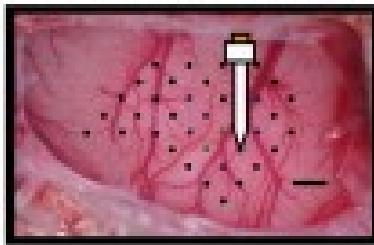
Áreas motoras secundárias



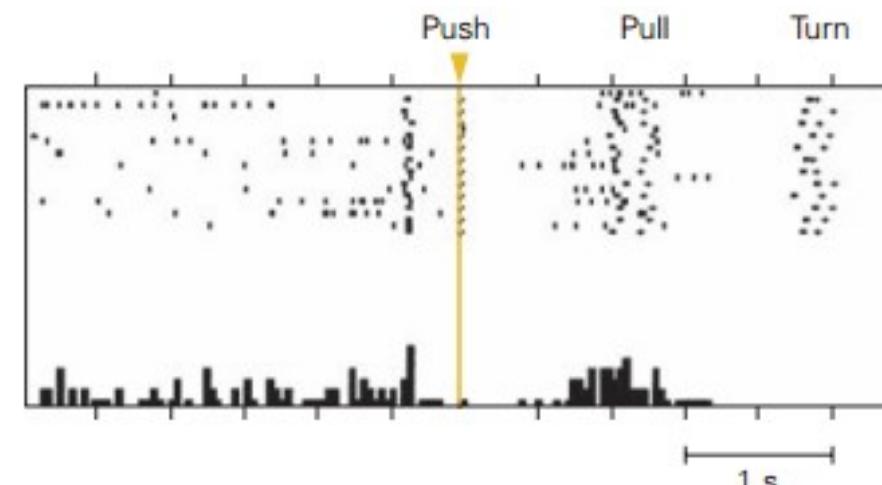
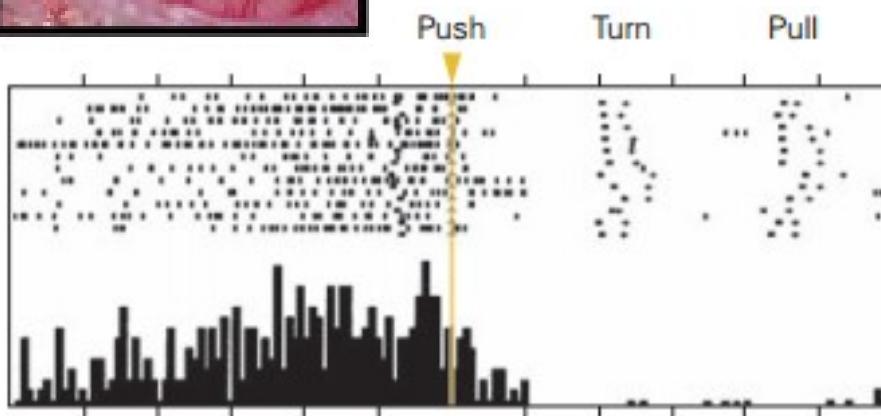
(Lacoboni et al. PLoS Biology, 2005)



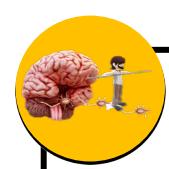
Áreas motoras secundárias são mais dependentes do contexto



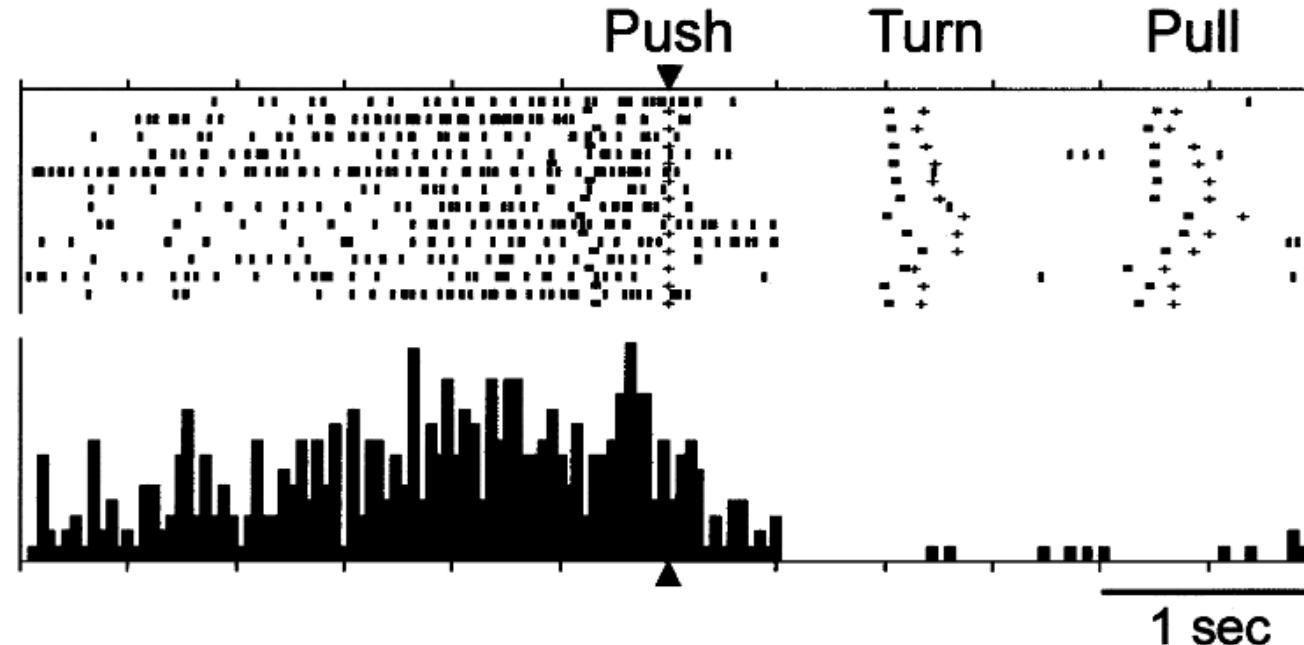
Mudança da sequência impacta no disparo daquele grupo de neurônios



(Tanji. Annual Review of Neuroscience, 2001)



Áreas motoras secundárias também participam do planejamento da ação.



(Tanji. Annual Review of Neuroscience, 2001)



RACIOCÍNIO

Áreas motoras secundárias são menos associadas a ações de uma parte específica do corpo. Em vez disso, estão mais associadas a ações complexas

Áreas motoras secundárias são mais dependentes do contexto

Áreas motoras secundárias também participam do planejamento da ação





RACIOCÍNIO

Organização

+

Menor
especificidade
dos músculos

+

Áreas motoras
secundárias também
participam do
planejamento da
ação

**Codificação da forma espaço-temporal
do movimento sem considerar elementos
específicos da contração muscular**



Codificação da forma espaço-temporal do movimento sem considerar elementos específicos da contração muscular

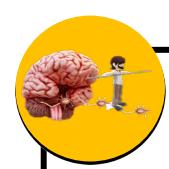
Matriz do

Espaço

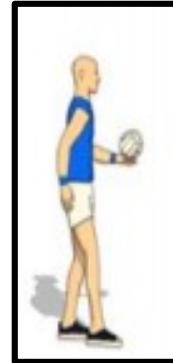
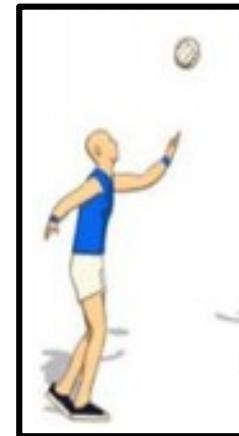
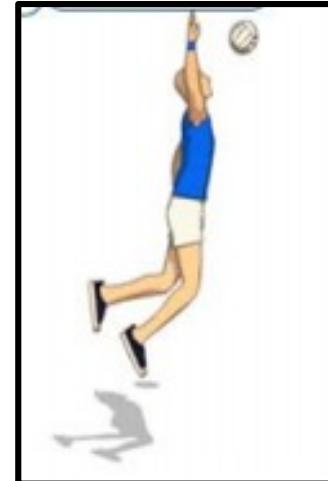
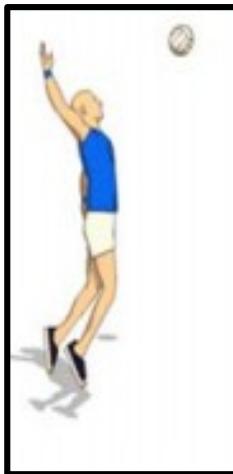
movimento

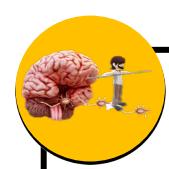
Tempo

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & a_{m,3} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{m,n} \end{bmatrix}$$

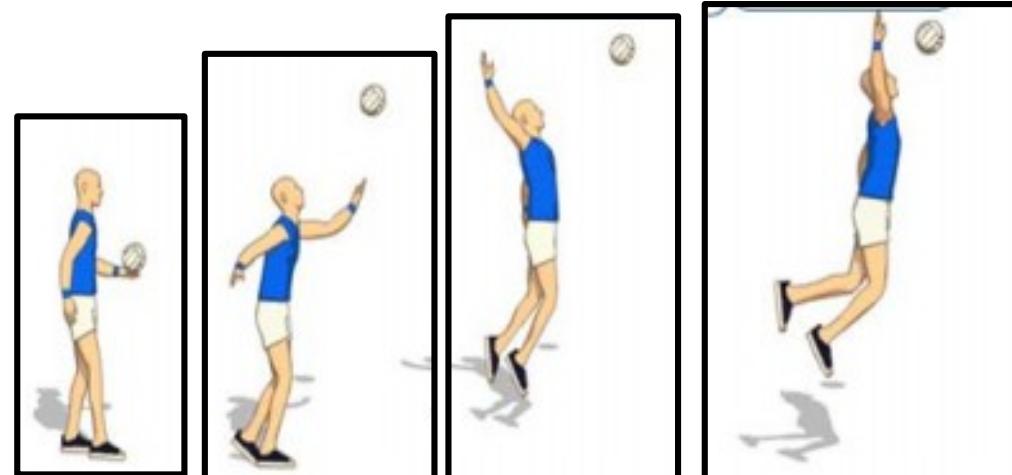


Espaço





Espaço



p1

p2

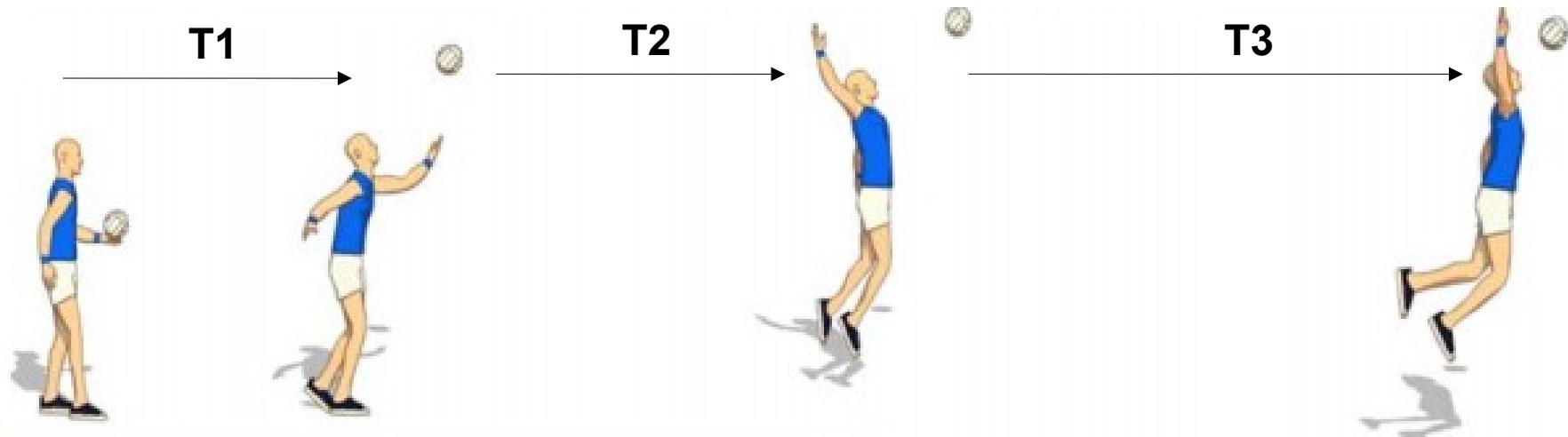
p3

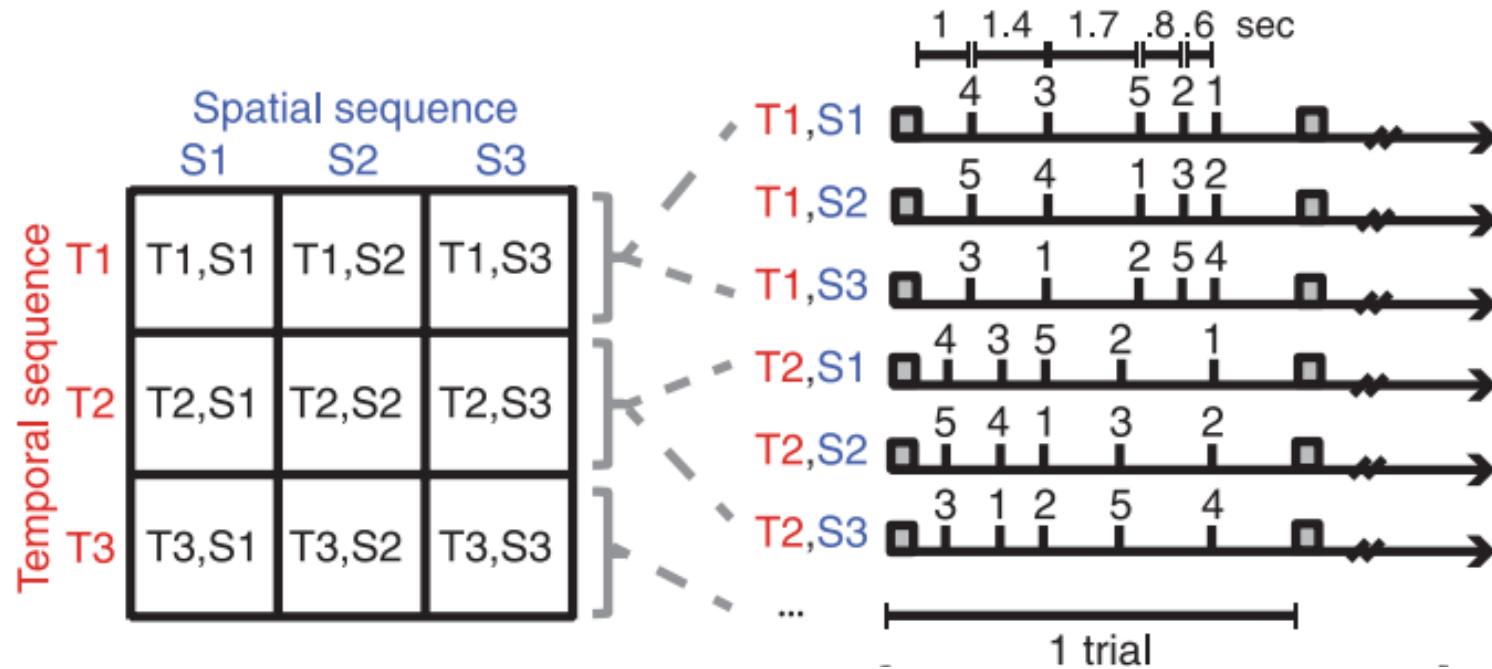
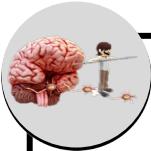
p4

Ordem sequencial

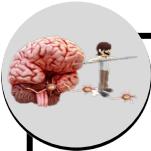


Tempo

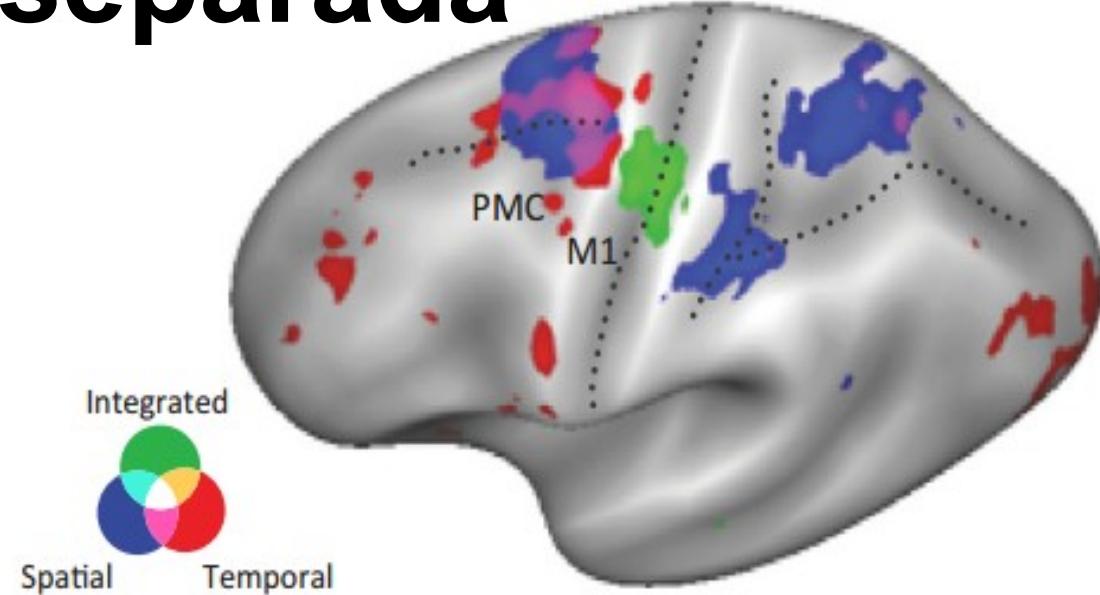




(Kornysheva and Diedrichsen. eLife 2014)



As áreas motoras secundárias codificam o espaço e o tempo de forma separada



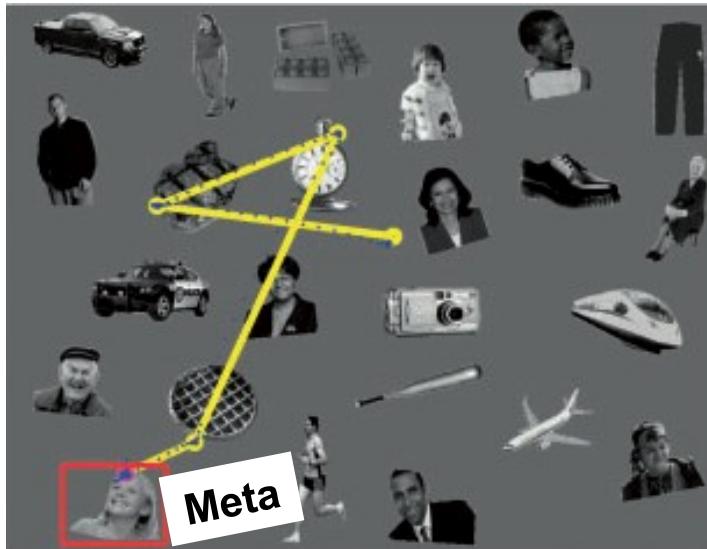
(Kornysheva and Diedrichsen. eLife 2014)



**As áreas motoras secundárias
podem participar de formas
diferentes, mas seguem o mesmo
princípio.**



A pré-AMS codifica a série de movimentos oculares que são realizados na busca e captura do alvo/meta.



(Wang et al. Brain, 2019)



Associação entre os modelos

Psicologia

Organização
hierárquica e
sequencial dos
componentes da
ação

Neurociências

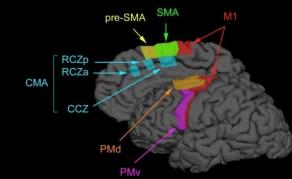
Codificação da
forma espaço-
temporal do
movimento



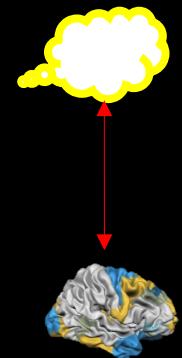


PARA FIXAR

1. As áreas motoras secundárias compreendem um complexo



2. As áreas motoras secundárias estão relacionadas a organização hierárquica e sequencial dos componentes do estágio motor.





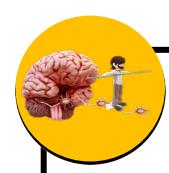
Objetivo do P3

Córtex motor primário e o estágio motor



Ao final você deverá ser capaz de:

- |1 Compreender a relação entre cinética, cinemática e o córtex motor primário
- |2 Compreender a relação funcional entre o córtex motor primário e o estágio motor



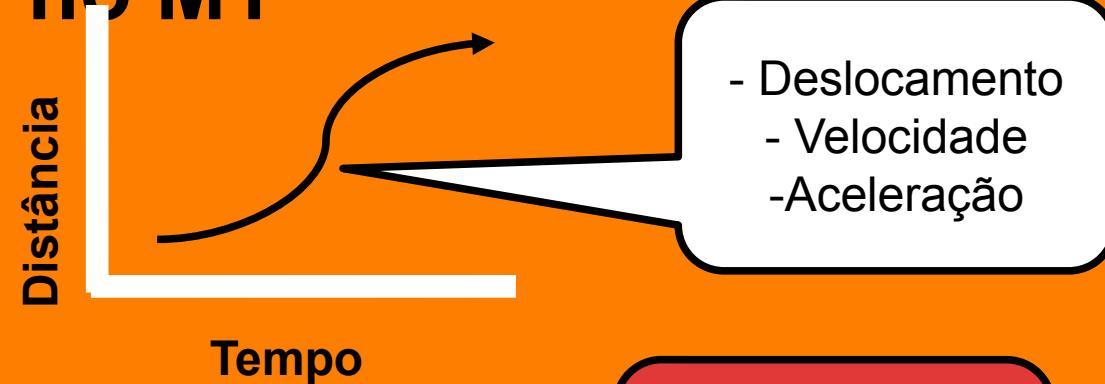
Córtex motor primário e o estágio motor

1. Organização hierárquica e sequencial dos componentes da ação X
2. Inserção de elementos específicos do movimento ✓
3. Geração e envio dos comandos motores ✓

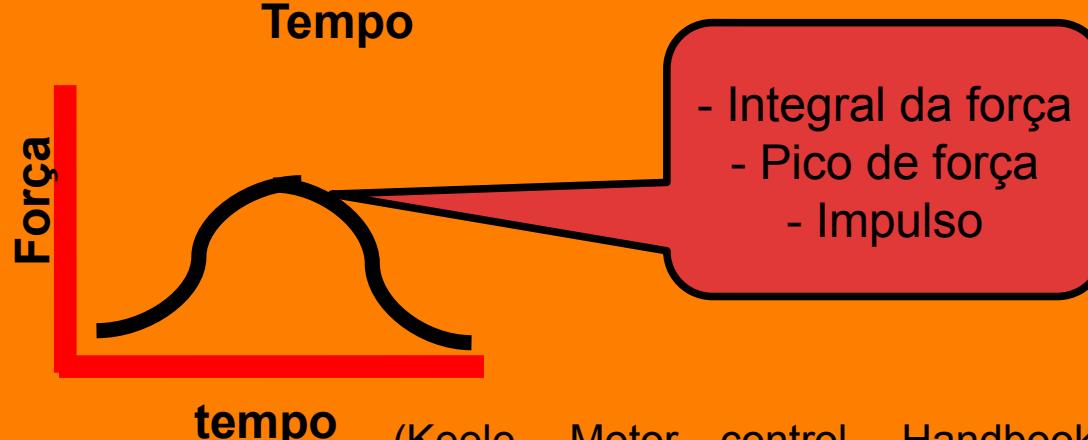


A inserção de parâmetros cinemáticos e cinéticos no M1

Cinemáti
ca



Cinética

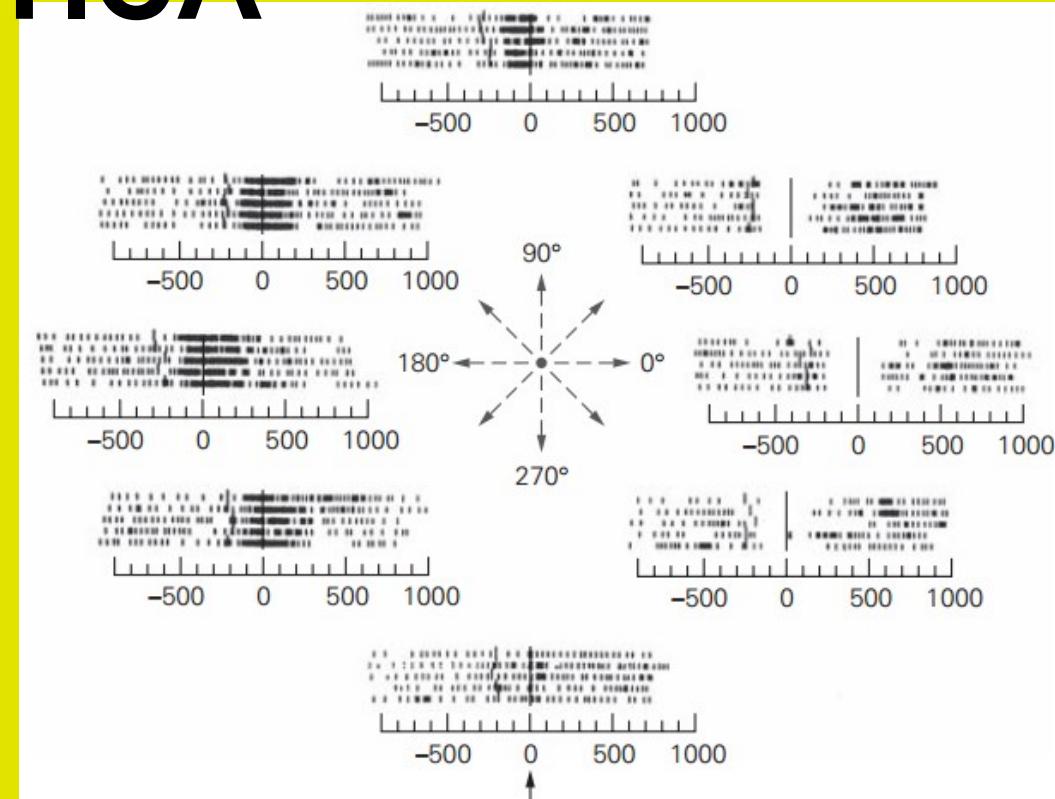


(Keele. Motor control. Handbook of perception and Performance. 1986)



CINEMÁTICA

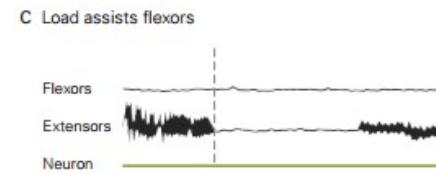
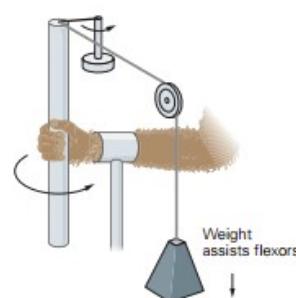
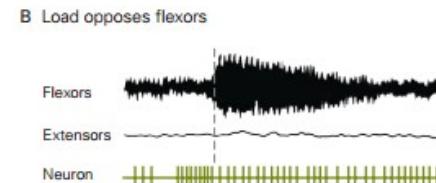
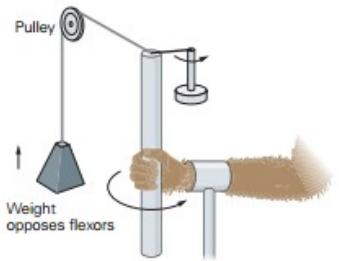
Georgopoulos
os



Georgopoulos et al. The Journal of
Neuroscience, 1982



CINÉTICA



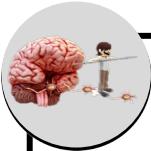
(Evarts. J Neurophysiol,
1968)

Cinemática a mesma
(deslocamento) e cinética
diferente

[Evarts 1968_partel](#)

[Evarts 1968_partell](#)

[Evarts 1968_partellIII](#)



Fato curioso!

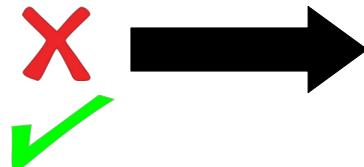
#1

**Princípios da variabilidade e precisão
da força**

Equilibrium-Point Theories

(Latash and Gutman. Variability and motor control, 1993)

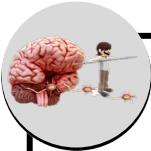
Cinemática
Cinética



Impulse-Variability Theory

(Schmidt et al. Psychological Review, 1979)

Propriedades musculares e
mecânicas

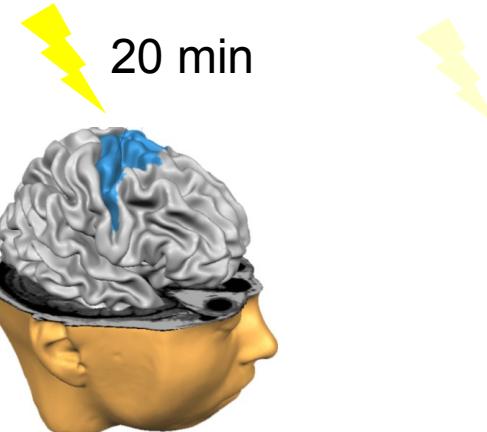


Fato curioso! #2

Cinemática

→ Tempo total → Variantes

ETCC



Aspectos
Invariantes



Aspectos
Variantes



(Apolinário-Souza et al. Physiology & Behavior, 2016)



Associação entre os modelos

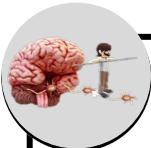
Psicologia

2. Inserção de
elementos
específicos do
movimento

Neurociências

A inserção de
parâmetros
cinemáticos
e cinéticos
no M1

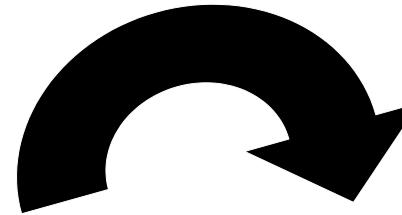
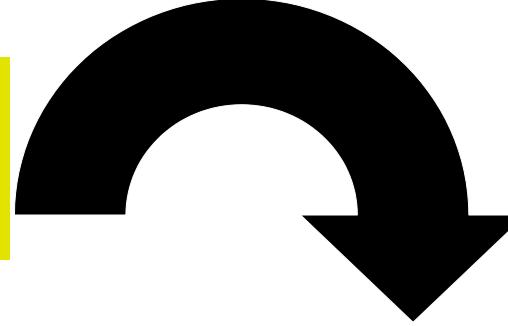




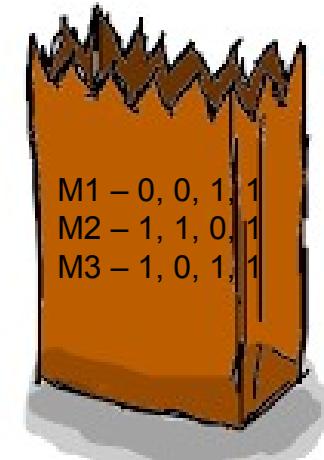
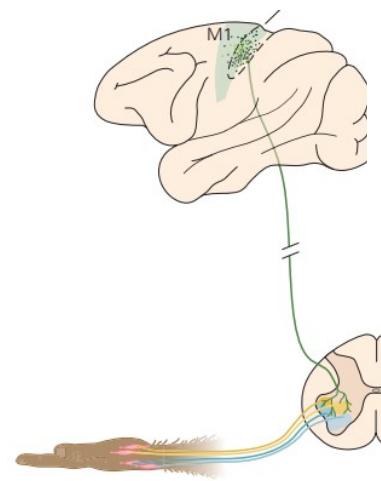
Tempo

Espaço

	a _{1,1}	a _{1,2}	a _{1,3}	...	a _{1,n}
a _{2,1}	a _{2,2}	a _{2,3}	...	a _{2,n}	
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
a _{m,1}	a _{m,2}	a _{m,3}	...	a _{m,n}	



Cinemática e Cinemática





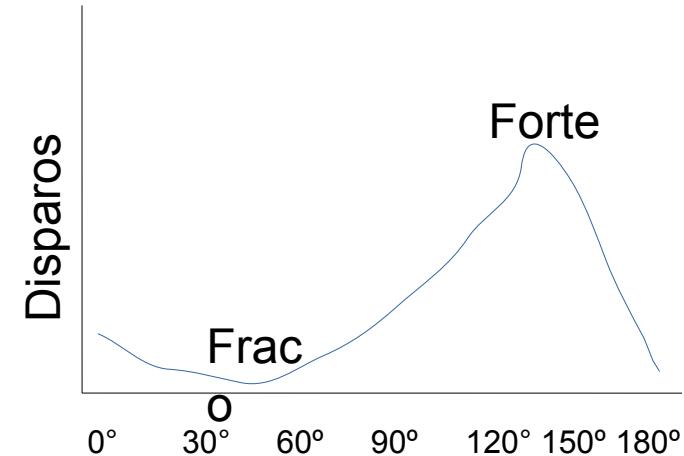
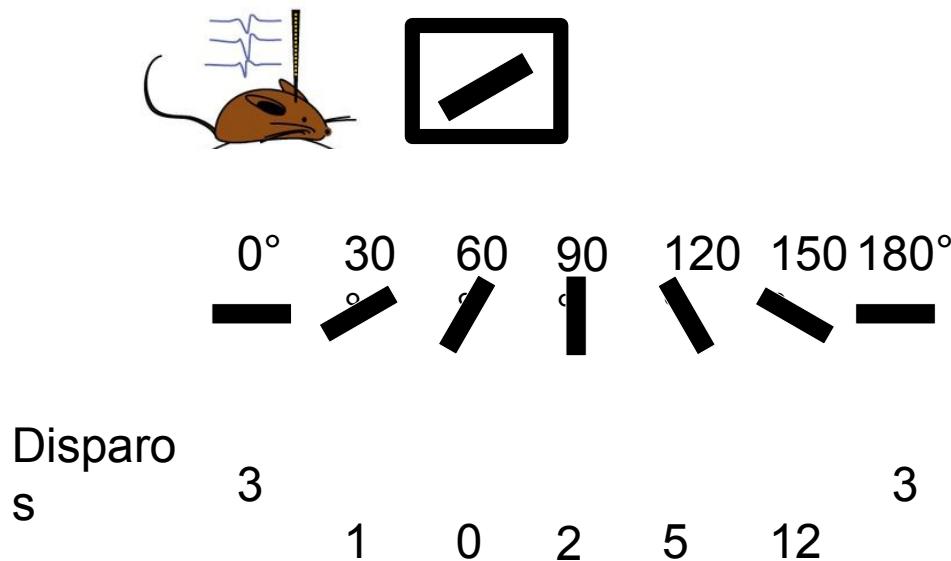
Como os comandos motores são gerados e enviado?

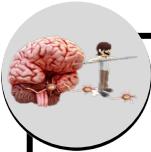
Duas maneiras do M1 gerar:

- Mapa funcional
- Tabela de pesquisa (*Look-up table*)



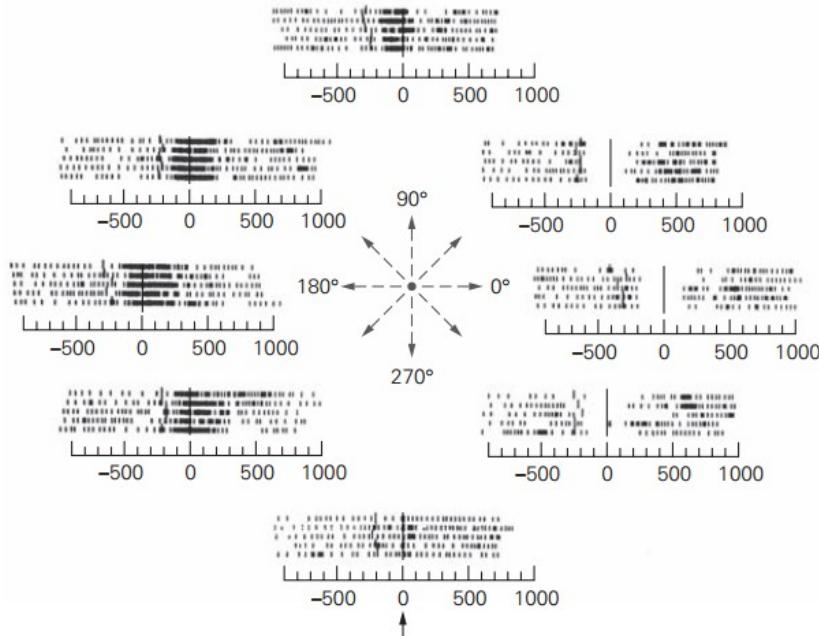
Mapa funcional





Mapa funcional

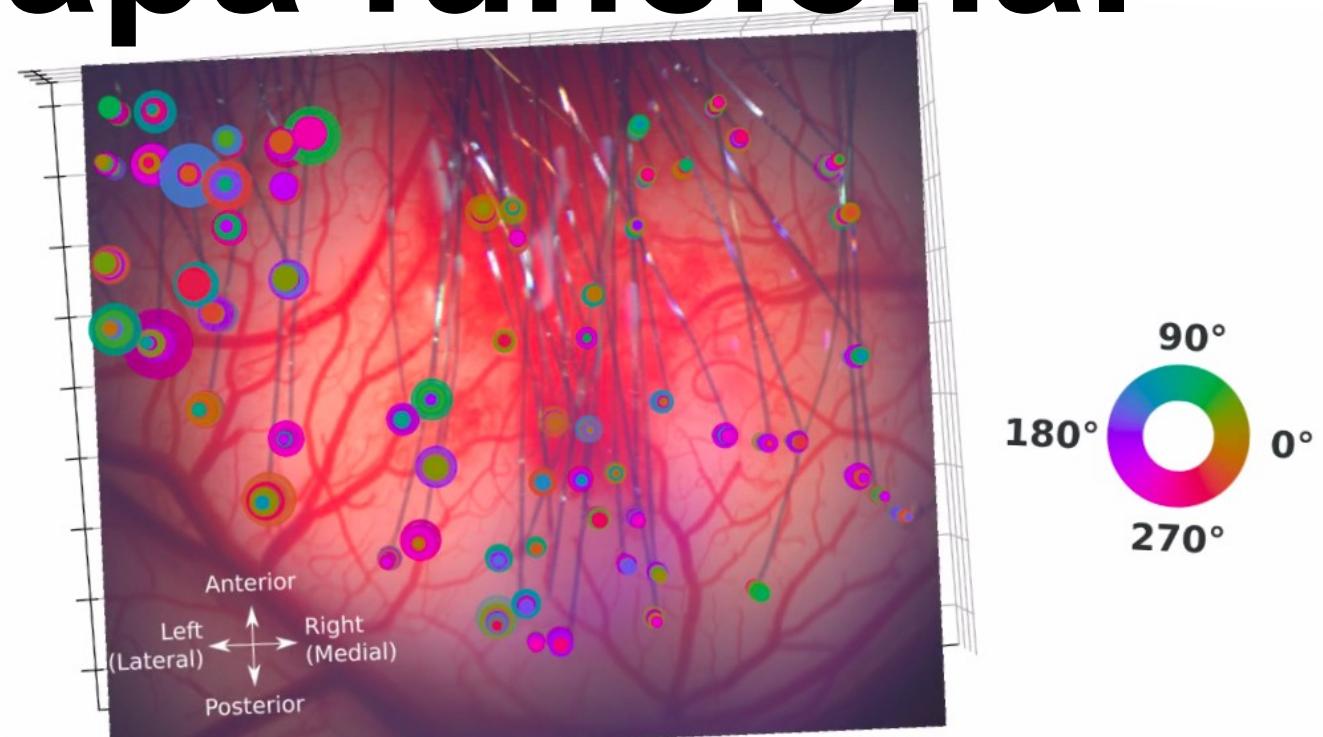
Georgopoulos



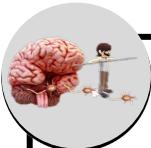
Georgopoulos et al. The Journal of
Neuroscience, 1982



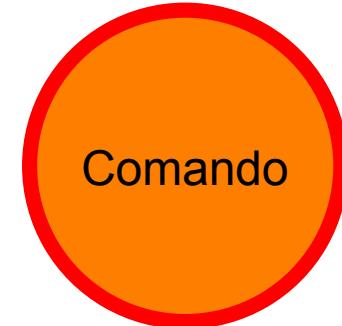
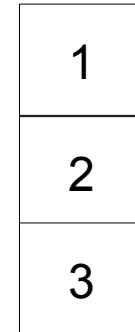
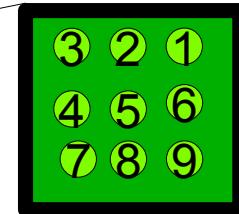
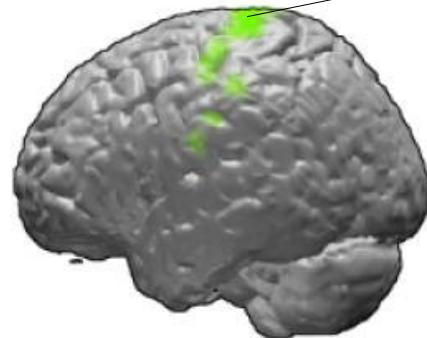
Mapa funcional



Monkey MindPong. Stanford, Neuralink, april, 2021.



Existe um mapa funcional dos movimentos no M1 para gerar os movimentos



Comando

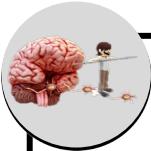
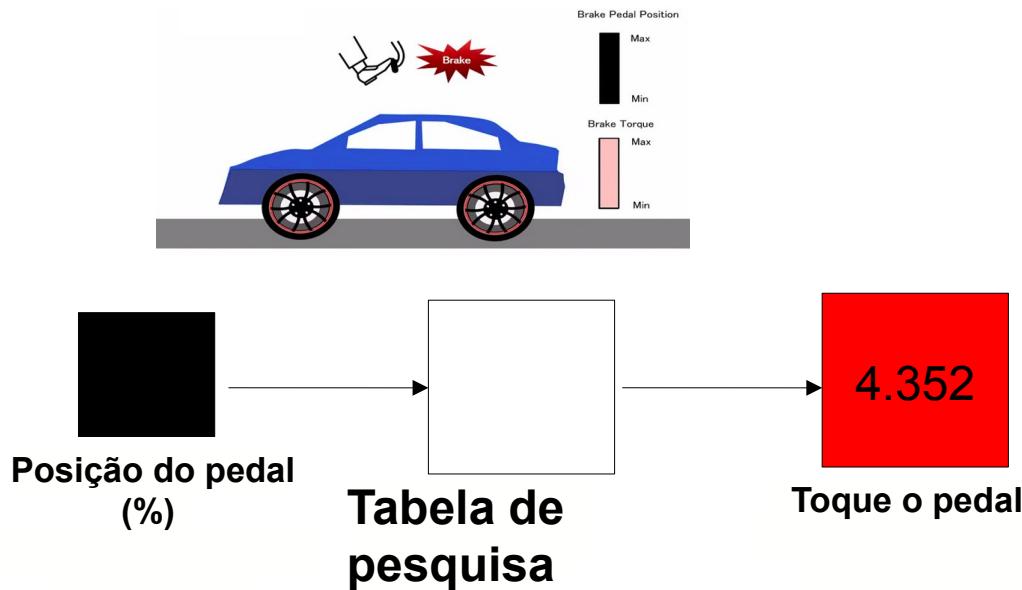


Tabela de pesquisa



Posição do pedal	Toque do pedal
0	0.000
1	0.526
2	1.081
3	1.665
4	2.282
5	2.934
6	3.623
7	4.352
8	5.124
9	5.942
10	6.811
11	7.733
12	8.712
13	9.755
14	10.865

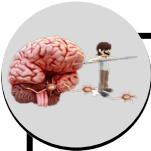
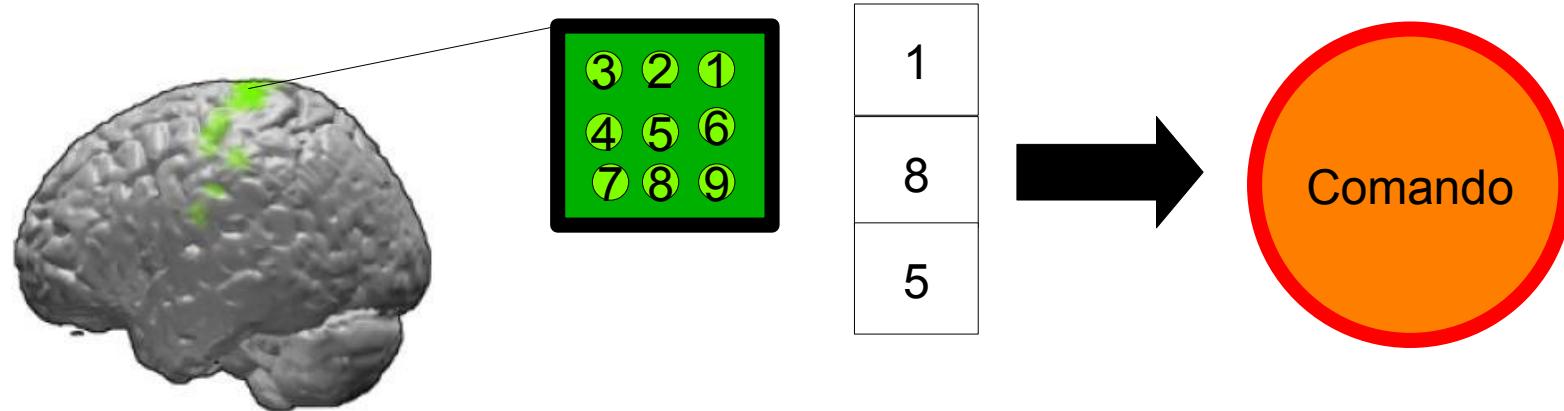


Tabela de pesquisa





PARA FIXAR

- 1. Os parâmetros cinemáticos e cinéticos estão relacionados ao M1.**
- 2. O M1 gera e envia os comados motores de duas formas: mapa funcional e tabela de pesquisa**



Objetivo do P4



Programa motor como um cell-assembly

**Ao final você deverá ser
capaz de:**

| 1 **Programa motor como um cell-assembly**



Conceitos de programa motor

(Keele, 1968)



Uma série de comandos musculares estruturados anterior ao movimento que permite executar a sequência motora sem a presença de feedback periférico.

(Keele. Psychological Bulletin, 1968)



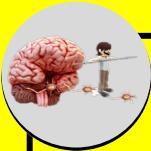
Conceitos de programa motor

(Keele, 1968) (Keele, 1981)



Representação interna de uma sequência de ações motoras pré-estruturada, que envolve a interação várias áreas do cérebro.

(Keele. Handbooks of physiology, 1981)



Conceitos de programa motor

(Keele, 1968) (Keele, 1981) (Wickens, 1994)



Um **cell assembly** representado nas áreas motoras do córtex por meio de conexões sinápticas entre neurônios piramidais.

(Wickens, Hyland and Anson. Journal of Motor Behavior, 1994)



Conceitos de programa motor

(Keele, 1968) (Keele, 1981) (Wickens, 1994) (Rosenbaum et al, 2007)



Programa motor como um **assembly hierárquico**.



Conceitos de programa motor

(Summers e Anson, 2009)

(Keele, 1968) (Keele, 1981) (Wickens, 1994) (Rosenbaum et al, 2007)



O **cell assembly** como um provável mecanismo do programa motor.

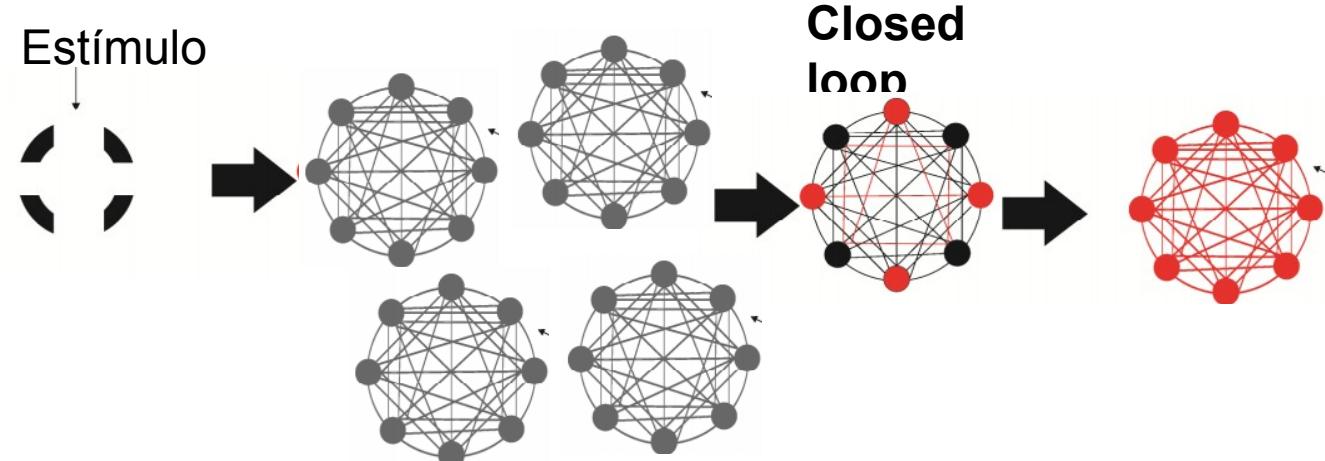
(Summers and Anson. Human Movement Science, 2009)



Programa motor como um cell-assembly

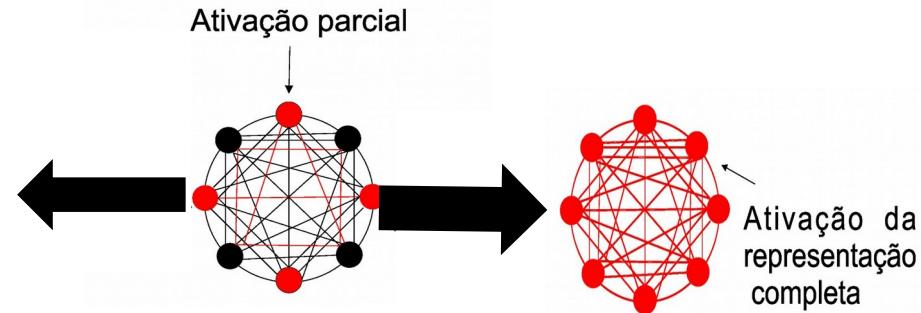
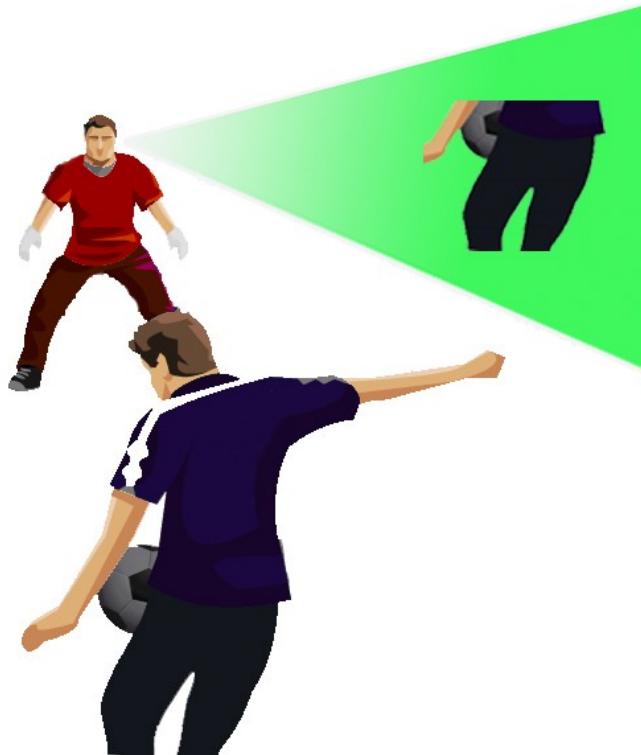


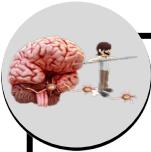
(Hebb, 1949)





Programa motor como um cell-assembly



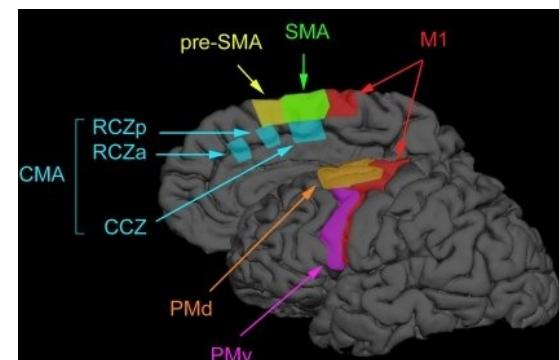


Possível substrato para armazenar o PM

Um **cell assembly** representado nas áreas motoras do córtex por meio de conexões sinápticas entre neurônios piramidais.

(Wickens, Hyland and Anson. Journal of Motor Behavior, 1994)

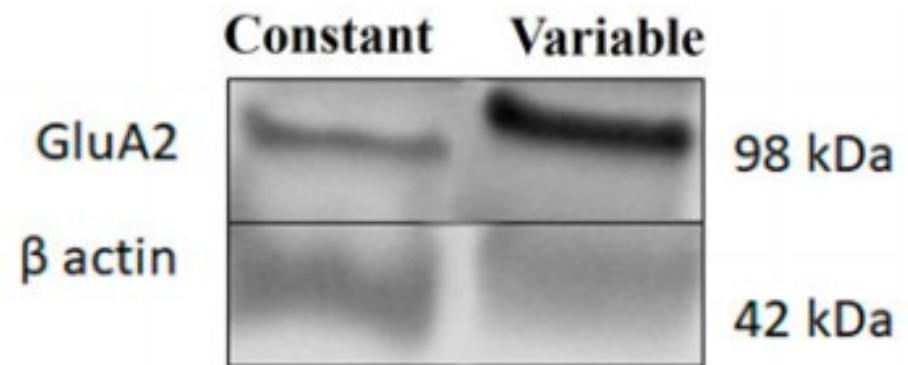
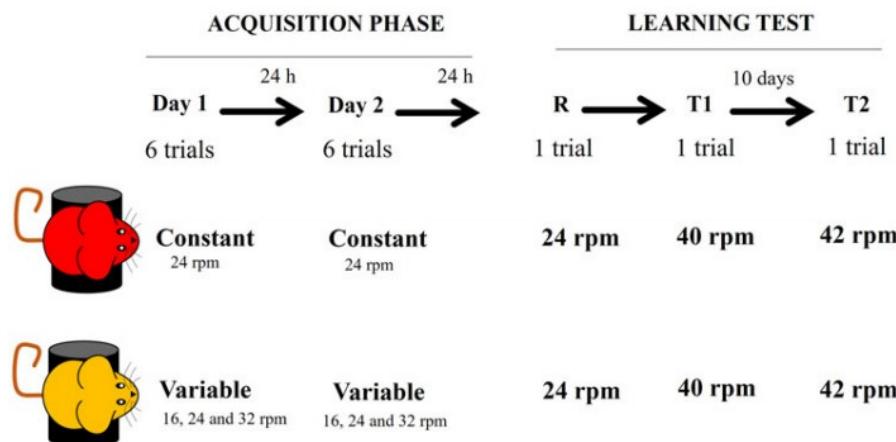
- (a) a existência de muitas conexões mutuamente excitatórias entre os neurônios
- (b) a capacidade de modificar a força dessas conexões de acordo com a regra para modificação sináptica proposta por Hebb (1949).





Possível substrato para armazenar o PM

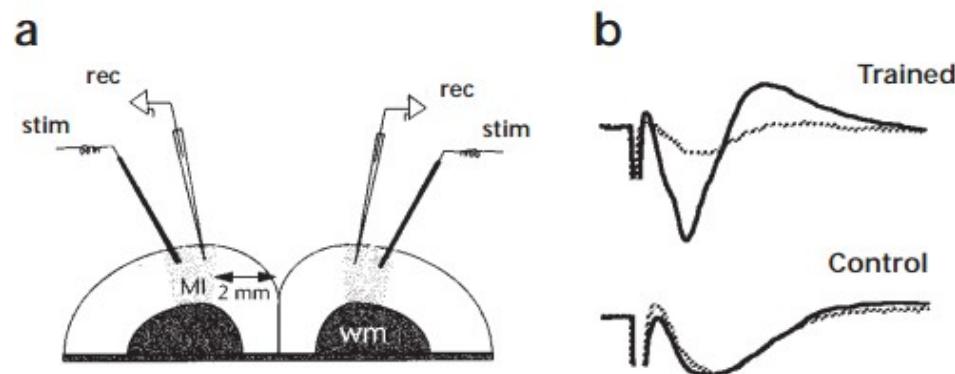
(a) a existência de muitas conexões mutuamente excitatórias entre os neurônio





Possível substrato para armazenar o PM

(b) a capacidade de modificar a força dessas conexões de acordo com a regra para modificação sináptica proposta por Hebb (1949).



Rioult-Pedotti et al. Nature, 1998



PARA FIXAR

1. Programa motor pode ser entendido como um cell-assembly
2. O córtex motor apresenta elementos para formação de um cell-assembly.