



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Atuadores biológicos. O músculo

Arturo Forner-Cordero

(aforner@usp.br)

Laboratório de Biomecatrônica

Departamento de Engenharia Mecatrônica e
Sistemas Mecânicos



Conteúdo

1. Introdução: Justificação e objetivos
2. Atuadores biológicos humanos
 - Organização e Estrutura
 - Princípios de funcionamento
 - Modelos do músculo
 - Hill
 - Cross-bridge
3. Atuadores artificiais robóticos- biomiméticos
 - Atuadores artificiais
 - Comparação atuadores biológicos-artificiais
 - Atuação do sistema de atuadores fisiológicos

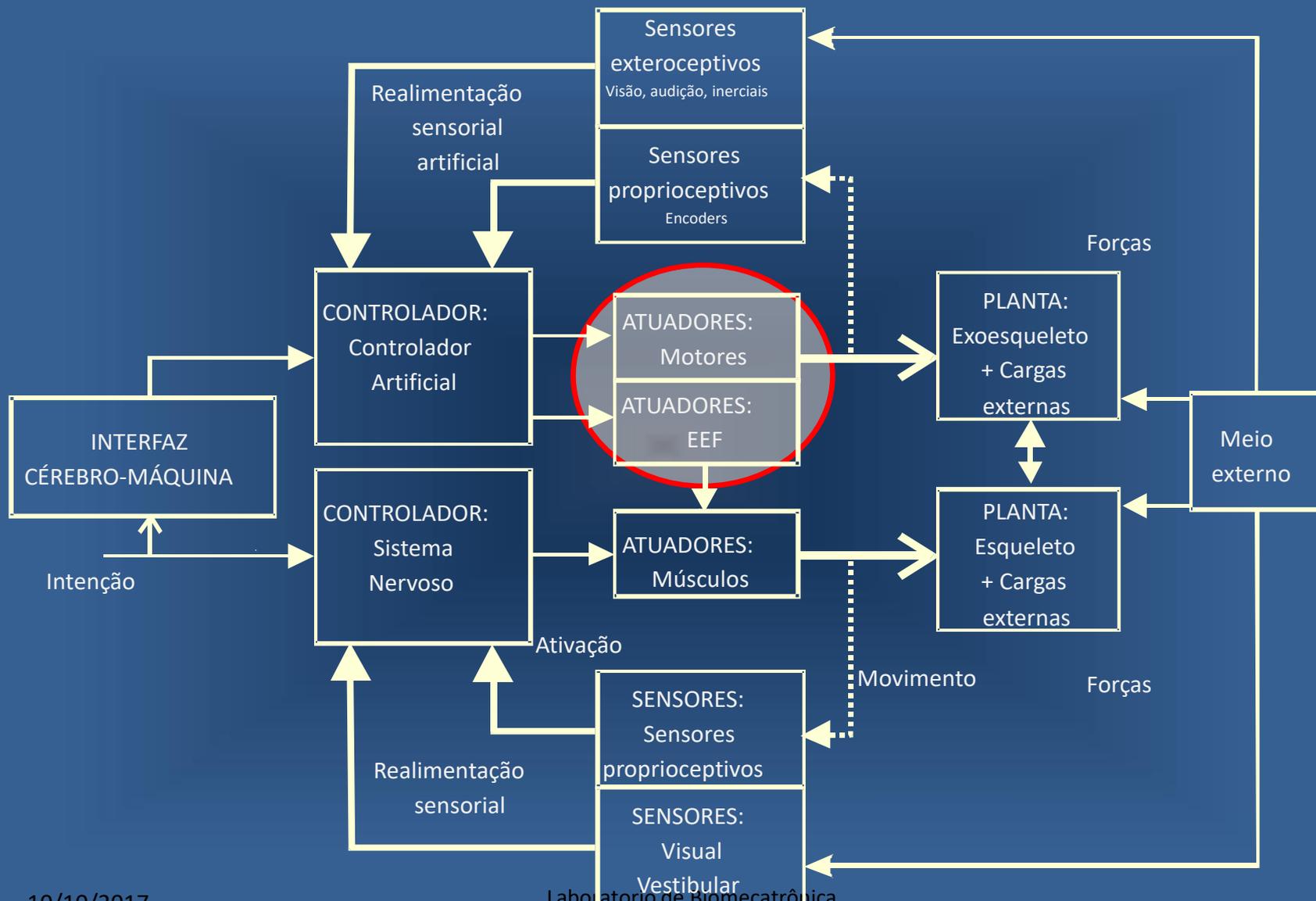


Introdução

- **Justificação**
 - Compreensão do sistema
 - Intervenção:
 - Reabilitação
 - Treinamento
 - Compensação funcional
 - Atuação sobre o musculo
 - Desenvolvimento de sistemas de atuação bioinspirados



Compensação motora





Objetivos

- Atuadores biológicos:
 - Fisiologia do musculo
 - Função e propriedades do musculo
 - Modelado do musculo
- Atuadores artificiais:
 - Visão geral de atuadores:
 - Compensação funcional
 - Biorrobótica e robótica biomimética
 - Atuação artificial dos atuadores naturais



Conteúdo

1. Introdução: Justificação e objetivos

2. Atuadores biológicos humanos

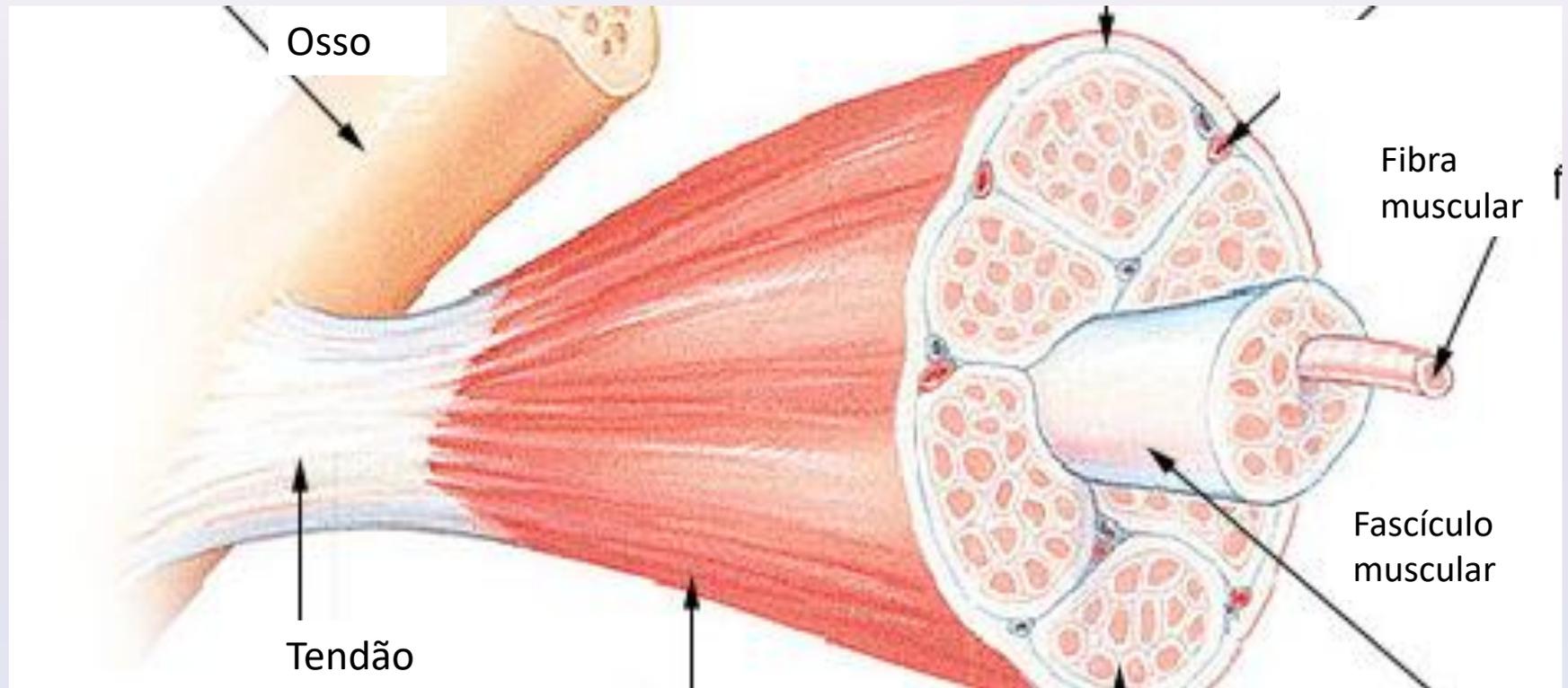
- Organização e Estrutura
- Princípios de funcionamento
- Modelos do músculo
 - Hill
 - Cross-bridge

3. Atuadores artificiais robóticos- biomiméticos

- Atuadores artificiais
- Comparação atuadores biológicos-artificiais
- Atuação do sistema de atuadores fisiológicos



ATUADORES: Musculos





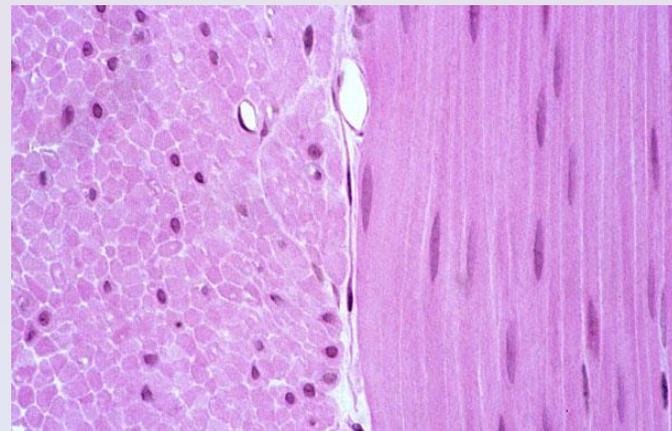
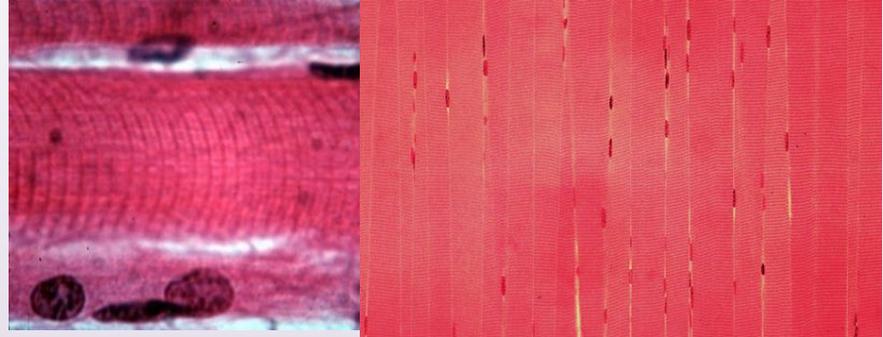
Músculos

- O corpo humano tem mais de 400 músculos esqueléticos
 - 40-50% do peso corporal total
- Funções do músculo esquelético
 - Produção de força:
 - Locomoção
 - Suporte postural
 - Respiração
 - Produção de calor
- Microestrutura do músculo:
 - Sarcolema: Membrana célula muscular
 - Miofibrilhas
 - Actina
 - Miosina



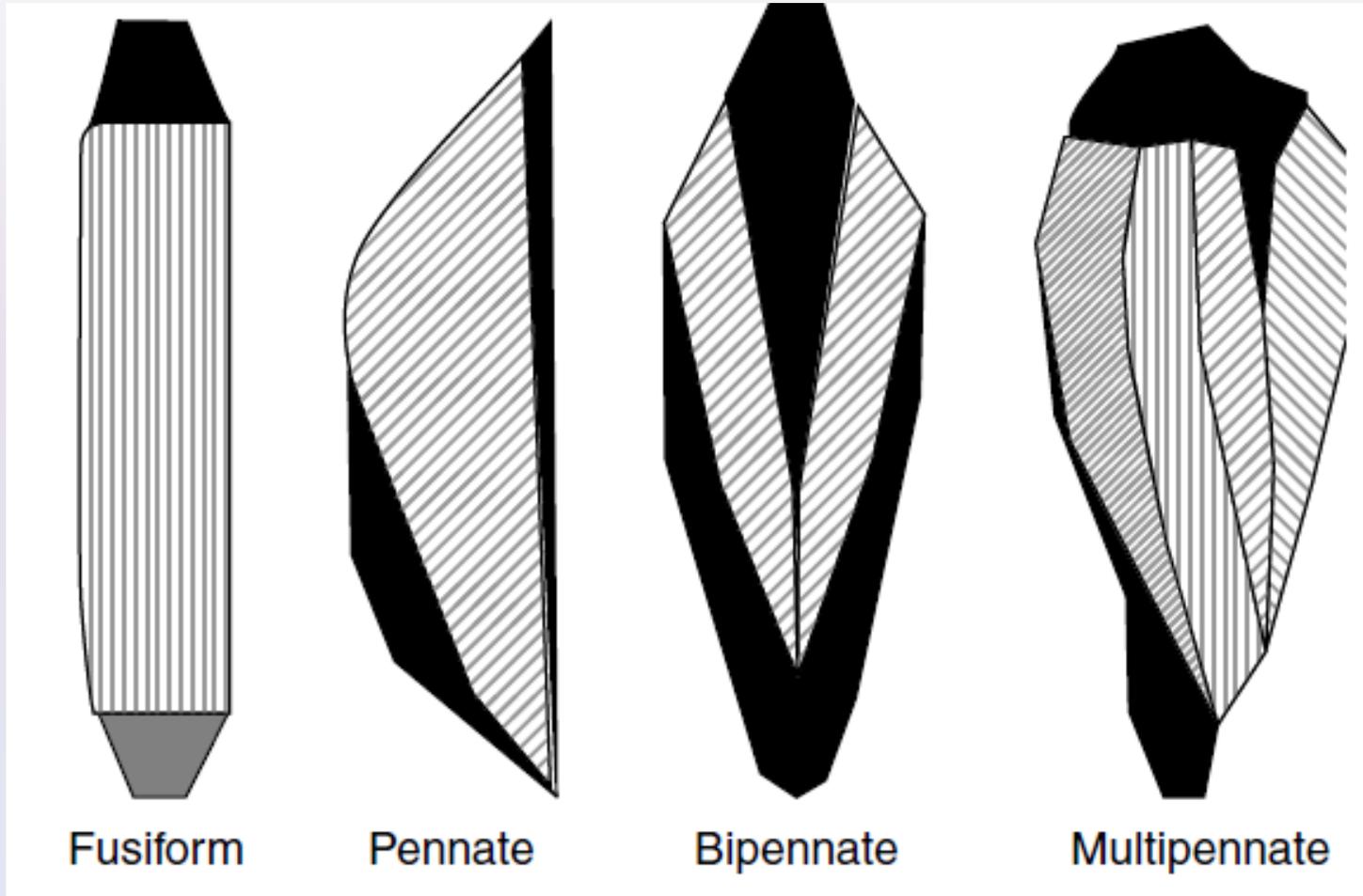
Músculos

- Tipos:
 - Esquelético:
 - Estriado
 - Voluntario
 - Cardíaco:
 - Estriado
 - Involuntario
 - Liso:
 - Involuntario
 - Lento



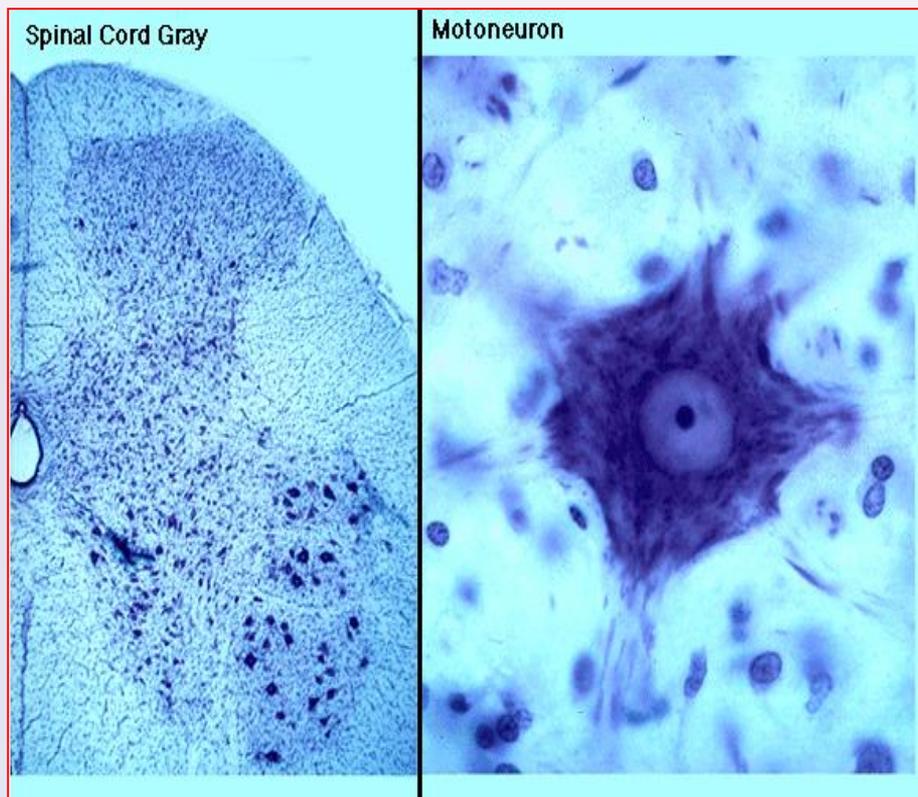


Disposição das fibras





Neurônios Motores



- Moto-neuronios alpha e gamma

- Alpha:

- Extrafusais

- 60-80 m/s

- Gamma:

- Intrafusais

- 25-60 m/s

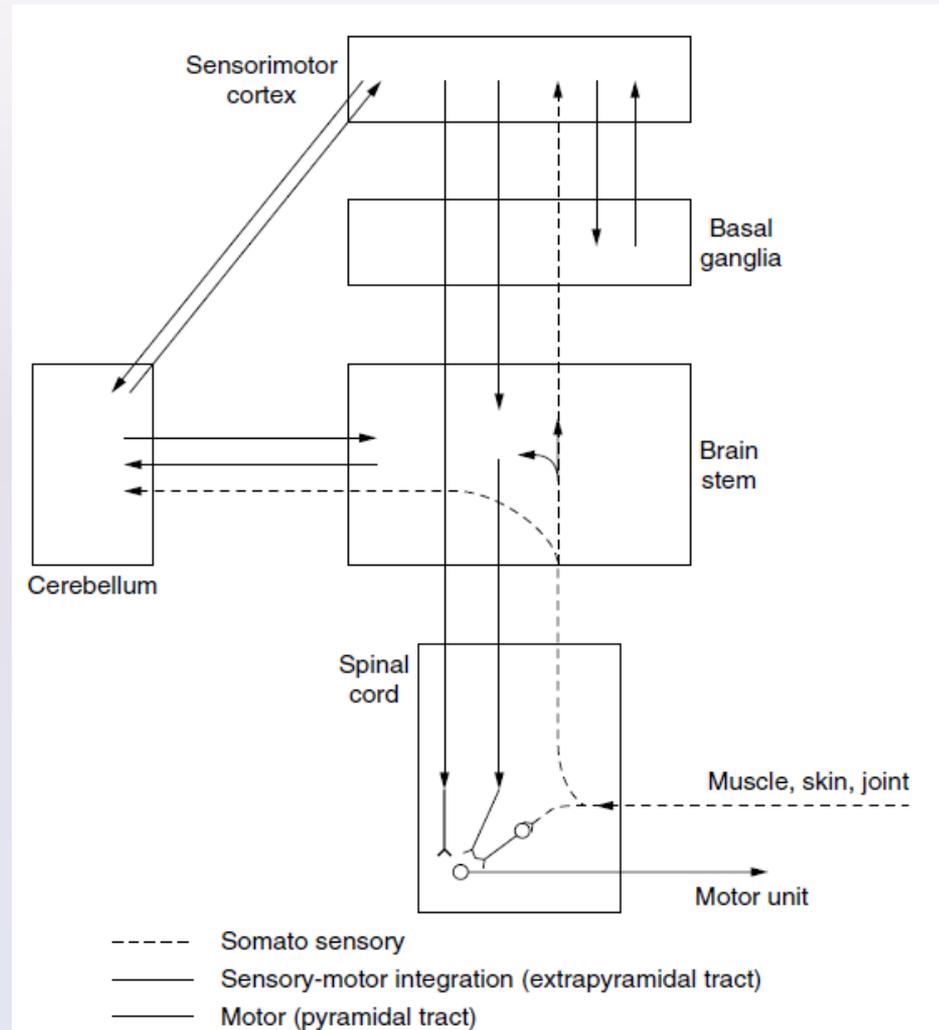
- Unidade motora:

Motoneurona +

fibras musculares inervadas



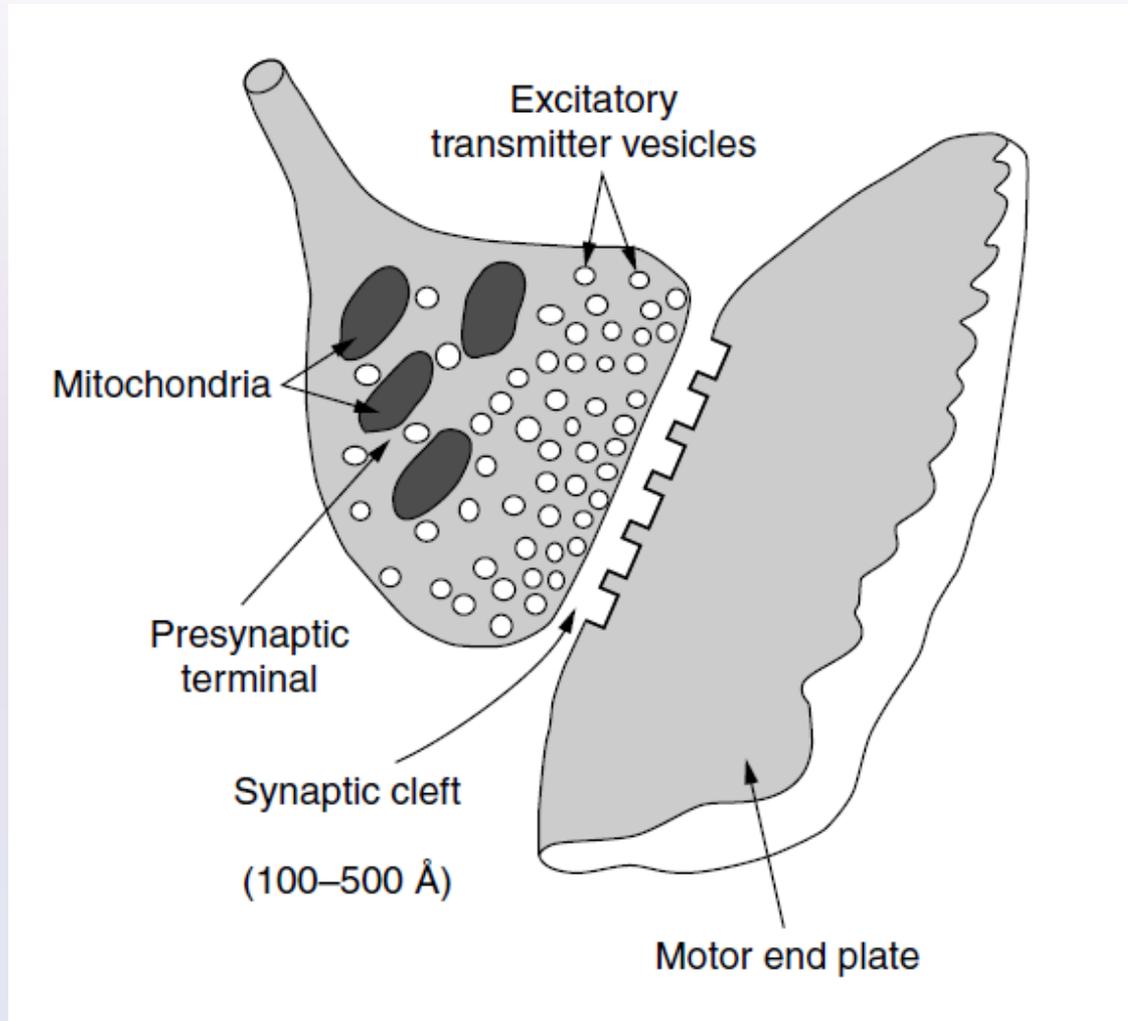
Arquitetura de controle do musculo



Adaptado de
McMahon, 1984.
Muscles, Reflexes and
Locomotion.



Placa motora



Guyton, A.C., 1971.
*Textbook of Medical
Physiology*, Philadelphia:
W.B. Saunders

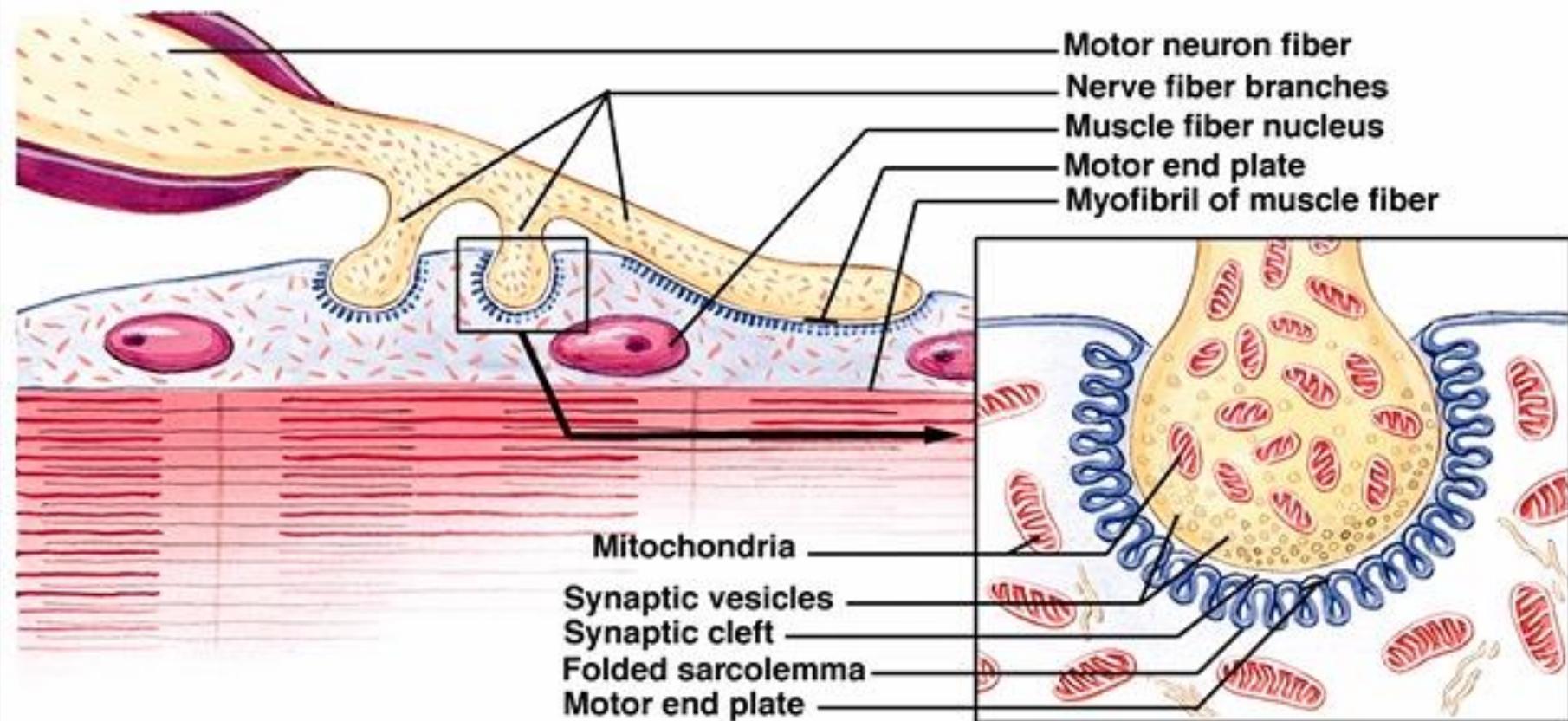


Junção neuromuscular

- Encontro neurônio-fibra muscular
 - Fenda neuromuscular
- Placa motora
 - Bolso ao redor do neurônio motor formado pelo sarcolema
- Acetilcolina é liberada pelo neurônio:
 - Potencial de placa motora (EPP)
 - Depolarização da fibra muscular

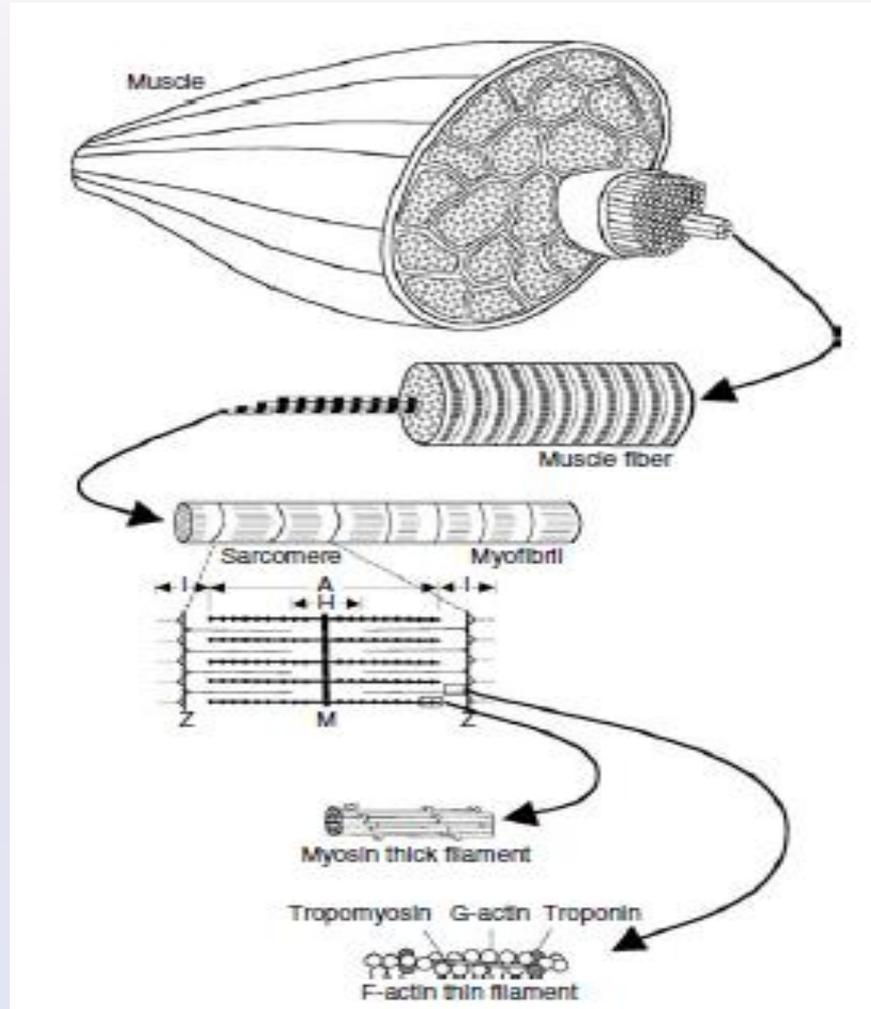


Junção neuromuscular





Estrutura do musculo



Adaptado de McMahon, 1984. *Muscles, Reflexes and Locomotion*.



Estrutura do músculo

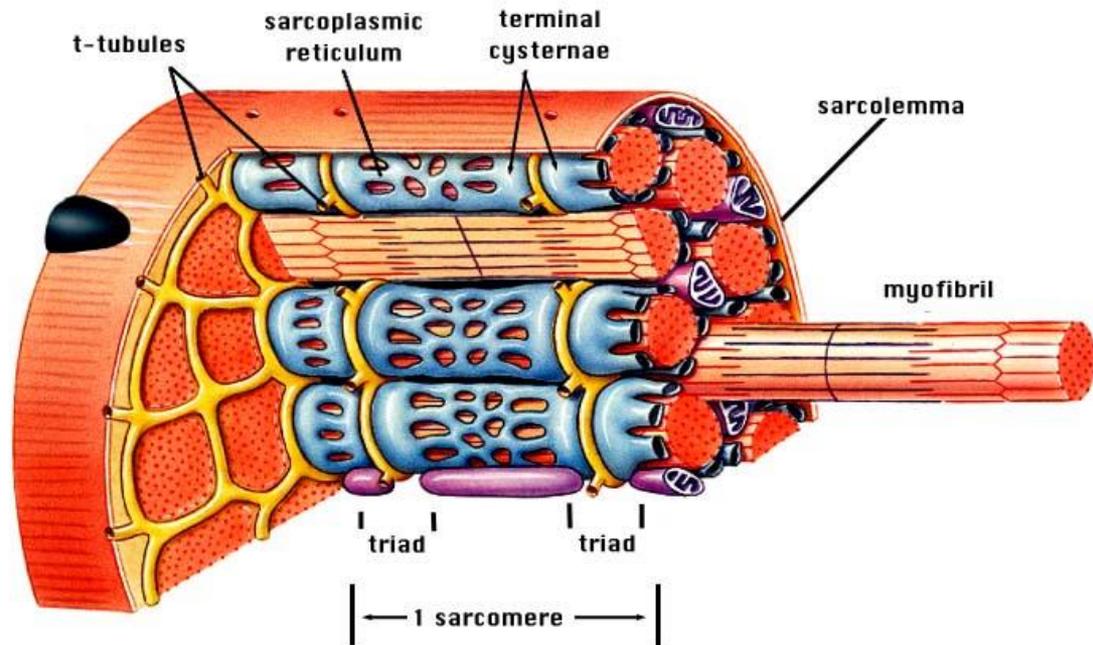
- Fibras musculares: Células com vários núcleos:
 - Diâmetro: 10 - 60 μm
 - Comprimento: 5 - 140 mm
- Miofibrilhas 1000 - 8000 por fibra.
 - Diâmetro: 1 μm
 - Mecanismo contrátil : Filamentos de proteínas:
Miofilamentos
- Miofilamentos
 - Grossos: Miosina (proteínas longas)
 - Finos: Actina (proteínas globulares)



Musculo

- Sarcómero
- Actina
- Miosina
- Pontes *cross-bridges*

Structure of a Skeletal Muscle Cell (Fiber)



Prentice hall, Silverthorn 2001



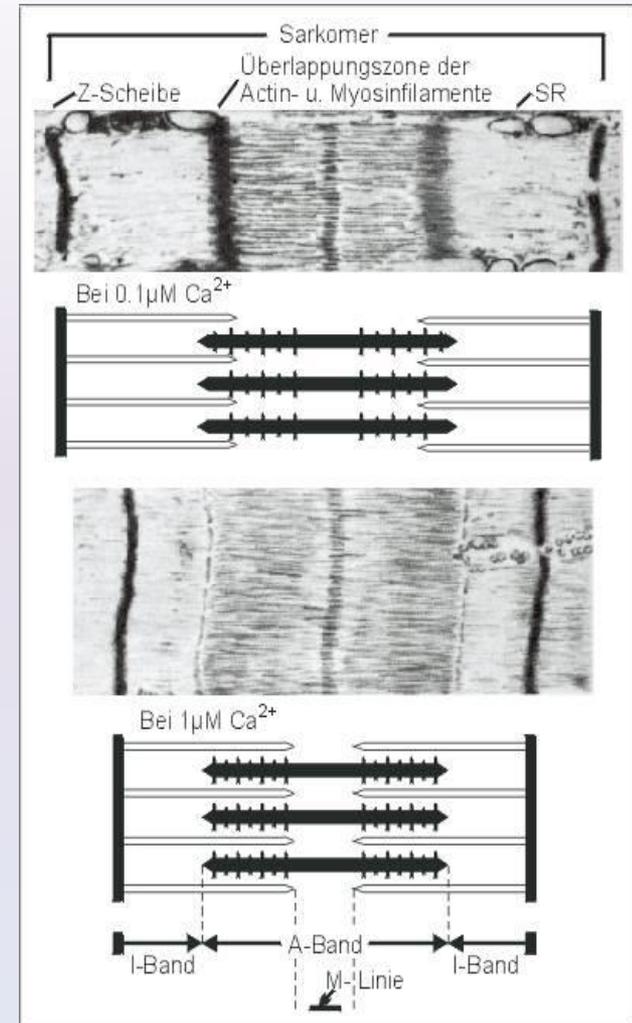
Músculos

- Fibra muscular:
 - Célula cilíndrica
 - Desde mm até varios cm
 - Miofibrilhas Actina y Miosina
 - Conversão energia química => mecânica
 - Ca⁺⁺
 - Características funcionais
 - Força-velocidade e Força-comprimento



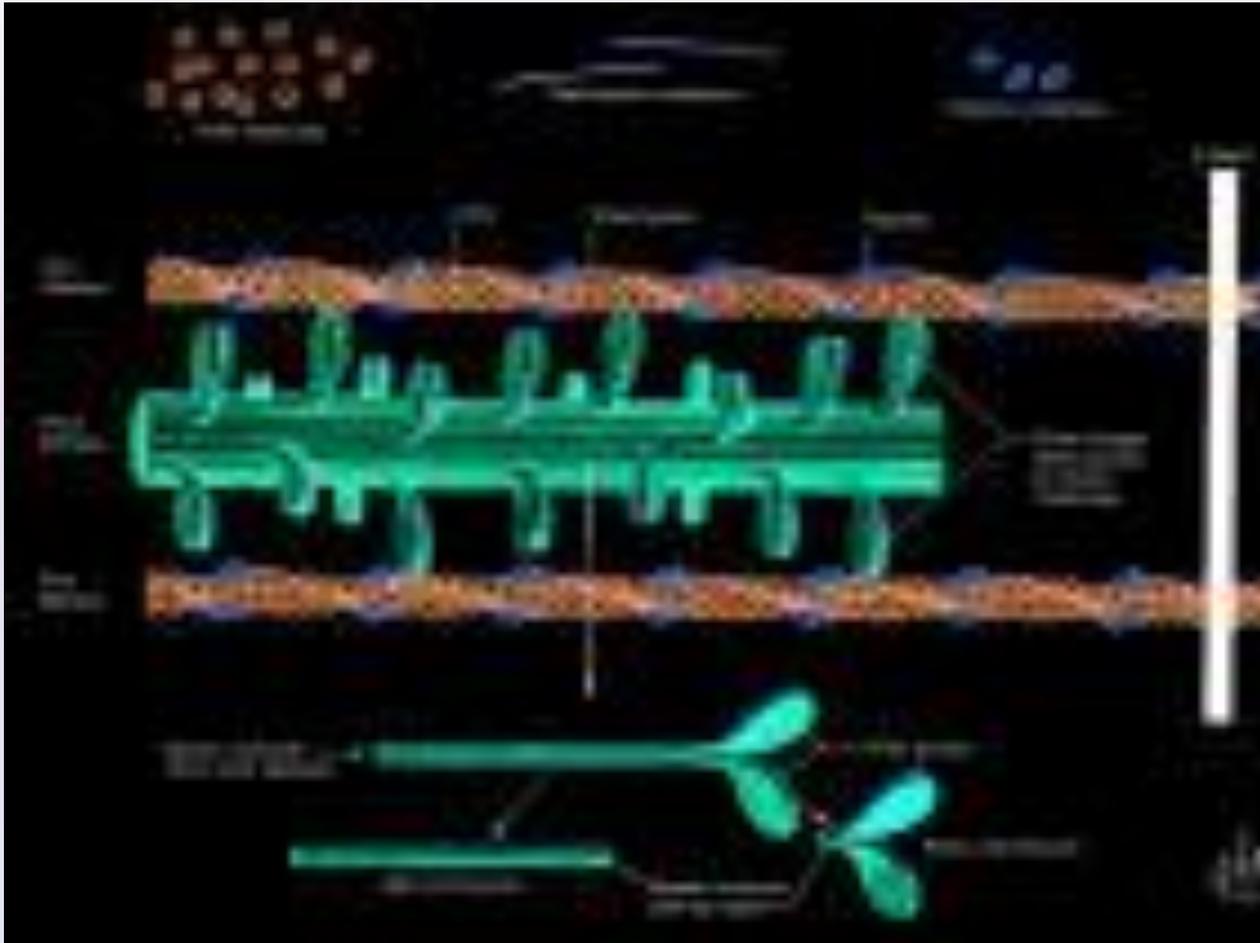
Mecanismo contráctil

- Transductor:
 - Converte impulso elétrico na placa motora
 - Difusão química Ca^{++}
 - Desplazamiento lineal



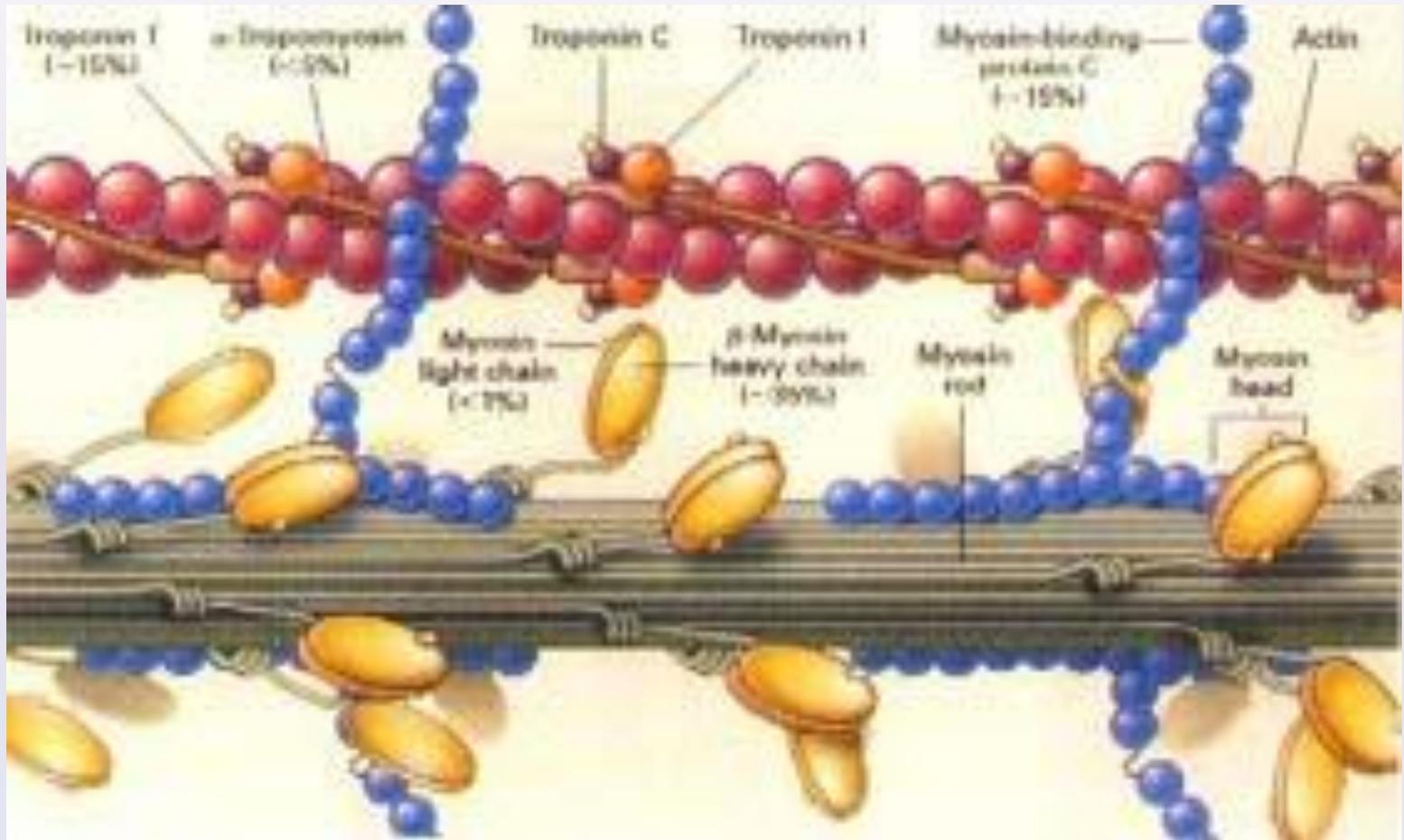


Deslocamento das fibrilhas actina e miosina





Miofibrilhas





Unidade motora

- Fibras inervadas pelo mesmo motoneurônio e distribuídas pelo músculo
- Três tipos de UM: Tipo I SO, IIB FG e IIA FOG
- Ratio de inervação: nº de fibras x motoneurônio
- Determina a precisão na geração de força:
 - Músculos do olho: 1:1 músculo/nervo
 - Isquiotibiales: 300:1 músculo/nervo



Tipos de fibras. Bioquímica

- Slow Oxidative (SO) ↔ Type I
 - Slow twitch oxidative
 - Aerobicas
 - Vermelhas (alta capilarização)
- Fast-twitch Oxidative (FOG) ↔ Type IIA
 - Anaeróbicas com certa resistencia
 - Capilarização intermedia (vermelhas)
- Fast-twitch Glycolitic (FG) ↔ Type IIB
 - Anaeróbicas
 - Brancas



Tipos de fibra+unidades motoras

- Slow-twitch (S)
 - Lentas
- Fast-twitch (F)
 - Fatigue-resistant (FR)
 - Fatigue-intermediate (Fint)
 - Fatigable (FF)



Unidade motora

- Contração muscular: iniciada pela depolarização do motoneurônio que inerva o musculo na placa motora (motor end-plate).
 - Musculo tecido excitável
 - Muda comprimento gerando força quando é excitado
- Contração deslocamento ativo (consumo energético) dos miofilamentos
- Cada fibra pode gerar por volta de 0.3 N.

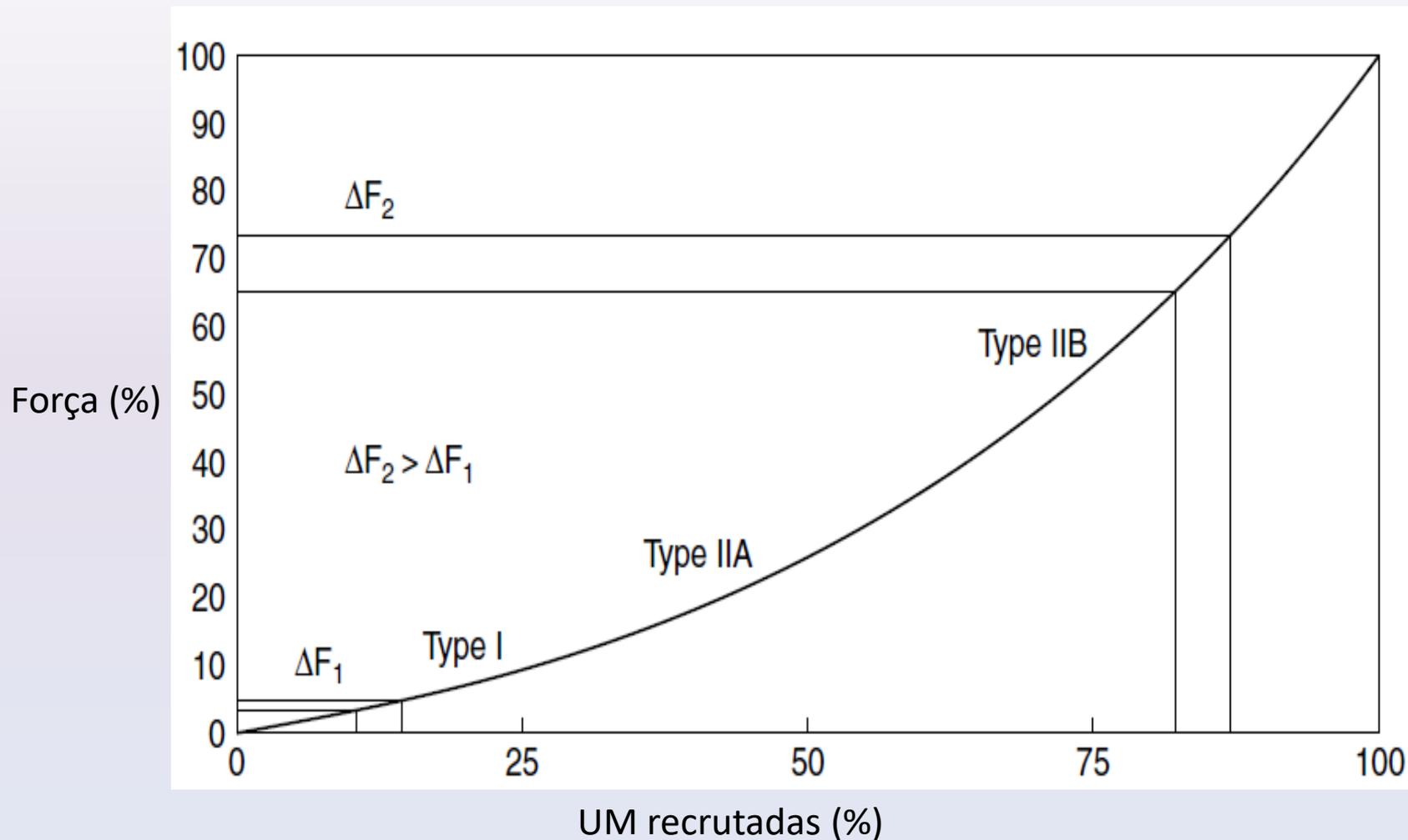


Unidade motora

- *Size contraction principle* (Henneman 1957).
 - Primeiro se recrutam as UM menores (SO) e aumentando a força recrutam-se UM maiores (FG, FOG)
- Rotação das UM ativas
 - Após um tempo de estimulação da UM ésta pasa estar inativa
 - Cómo se controla a rotação?
- Mecanismo para evitar fadiga...
- Mecanismo para aumentar a força:
 - Aumento da frecuencia de ativação
 - Aumento do nº de UM ativas



Size contraction principle





Conclusões “descriptivas”

- Contração: fenómeno eletroquímico
 - Pontes Actina-Miosina (*cross-bridges*)
 - Difusão de Ca^{++}
 - Atraso conexão sináptica
- Mecanismos de recrutamento
 - Ordem
 - Frequencia



Princípios de funcionamento

- Relação força-velocidade (Hill, 1938)
 - Força de saída sarcómero tetanizado depende da velocidade de contração v :
$$(v+b)(F+a)=b(F_0+a)$$
 - Constantes: a , b e F_0 : Força musculo tetanizado
 - Tasa de trabalho constante:
 - Tasa de conversão energia da reação química



Princípios de funcionamento

...OU:

$$F = F_0 (1 - (v/v_0)) / (1 + c(v/F_0))$$

$c = F_0/a$ e $v_0 = bc$ max velocidade de contração

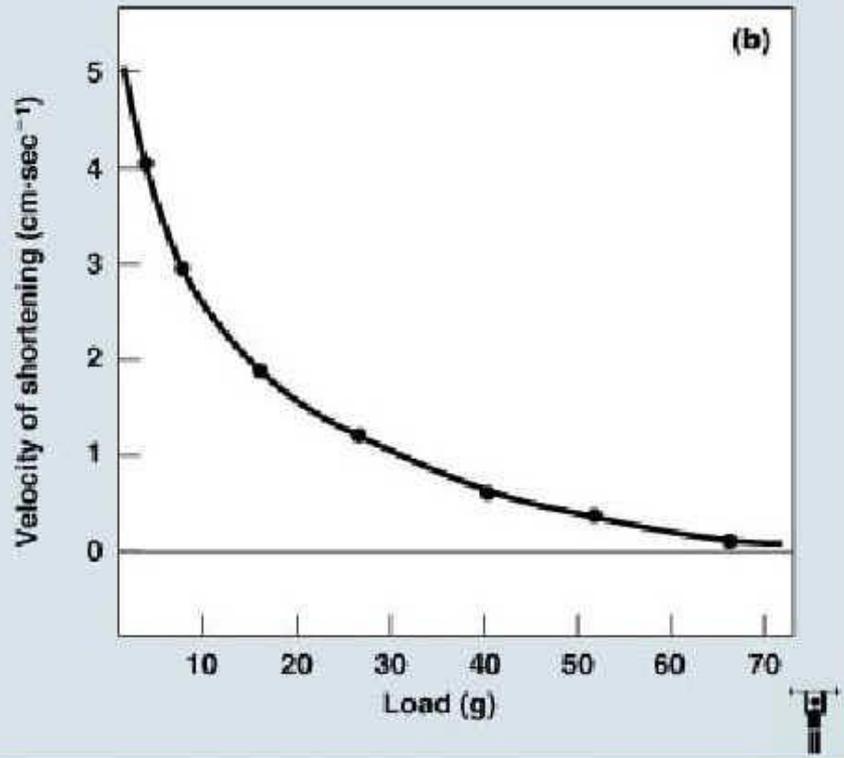
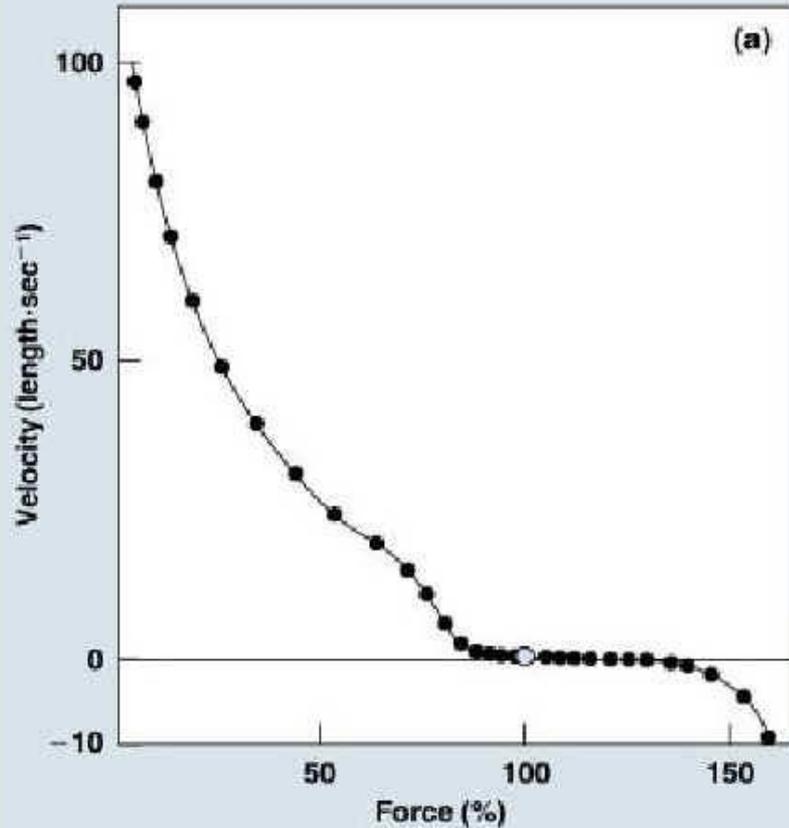
- Valores:

- Comprimento de repouso: l_r
- Fibras rápidas $c=0.1$ e $v_0=8 l_r$ pers second
- Fibras lentas $c=1$ e $v_0=2 l_r$ pers second
- Dependencia da F_0



Curva força-velocidade do músculo

Curva força-velocidade do músculo





Princípios de funcionamento

- Relação força-comprimento

- N^o pontes α solape actina-miosina:

- F_0 depende do comprimento do sarcómero:

$$F_0 = F_{\max} f(l)$$

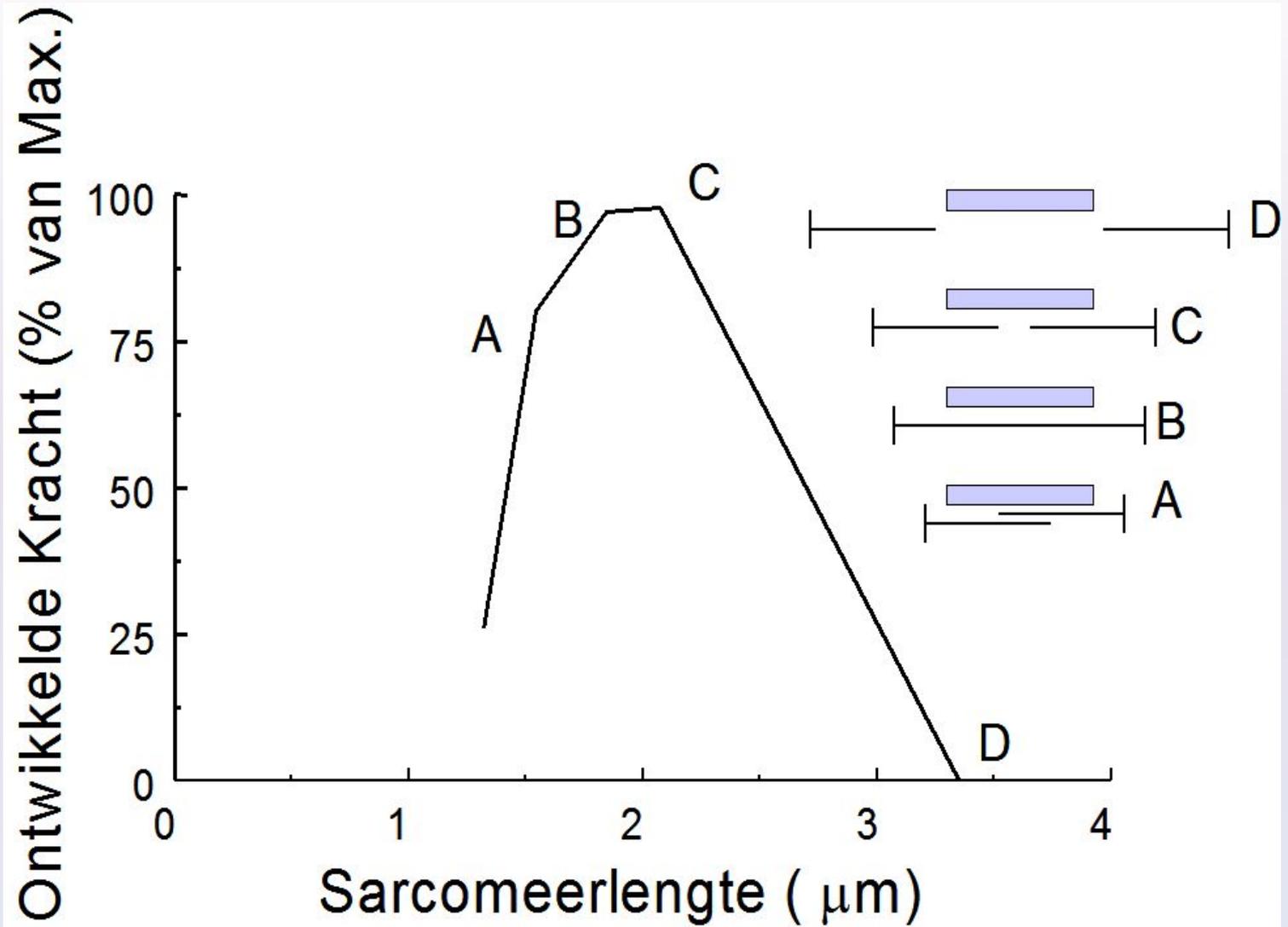
F_{\max} máxima força a comprimento de sarcómero -l- ótimo

Valores: 10-100 N/cm²

$$F = F_{\max} f(l) (1 - (v/v_0)) / (1 + c(v/F_0))$$

- Isto é válido para fibra tetanizada

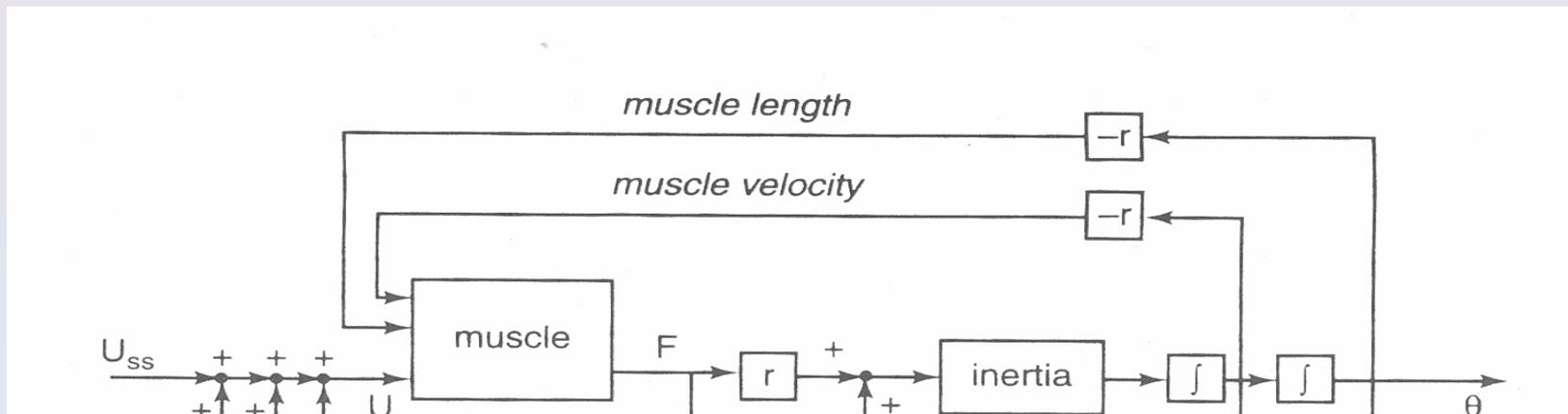
- Assume-se que o comprimento e a velocidade de contração são independentes...





Modelos do músculo

- Compromiso: complexidade vs detalhe
- Relação atividade neural => trajetória articular
- Descrição força-comprimento e velocidade
- Duas aproximações





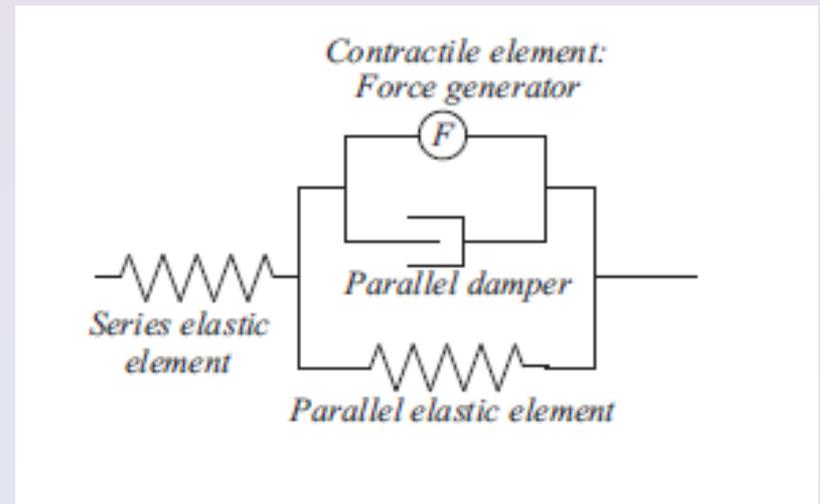
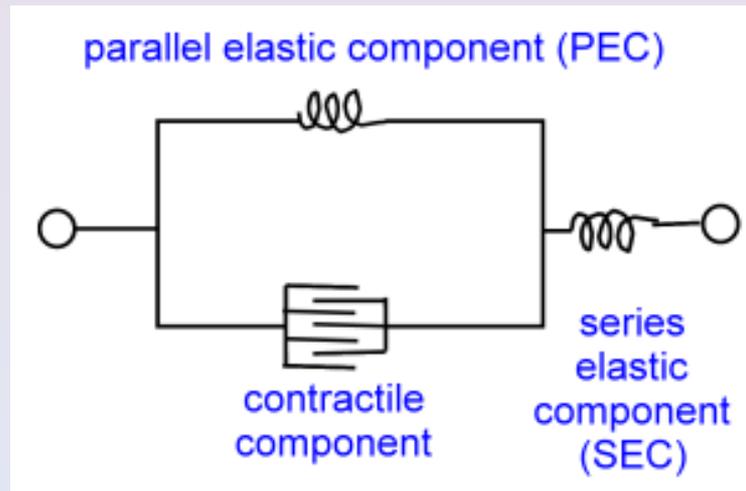
Modelos do músculo

- Propriedades do sarcômero:
 - Dinâmica da contração:
 - Tensão-comprimento
 - Tensão-velocidade
 - Dinâmica da ativação:
 - Entrada: sinal neural
 - Saída: ativação muscular
- Dois tipos de modelos:
 - Macroscópica (Hill)
 - Microscópica (Huxley)



Modelo de Hill

- Sarcômero (CE)
- Tendão (SE)
- Tecidos conectivos: epimysium,... (PE)





Modelo de Hill

- $F_{mus} = F_{SE} + F_{CE}$
- $F_{SE} = F_{CE} / \cos(\varphi)$
- $F_{CE} = F_{max} q(t) f(l) g(v)$
- Onde $q(t)$ é a função de estado de ativação
 φ representa o ângulo de penação
 $g(v)$ é a relação tensão-velocidade
(atenção a $g(v) = (1 - (v/v_0)) / (1 + c(v/F_0))$ só é válida para contrações concêntricas*)

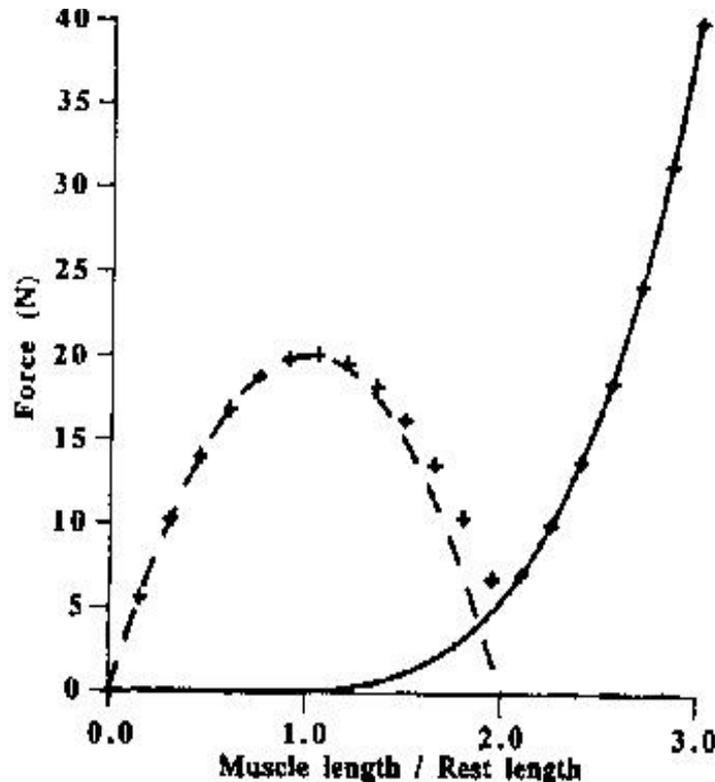
* Contrações concêntricas e excêntricas, isométricas e isotônicas.. Isocinéticas (nome? mesma velocidade)



Curva tensão-comprimento

Curva tensão-comprimento:

Partes ativa e passiva



- Duas contribuições:
 - Passiva (PE)
 - Ativa (CE)
 - Tensão passiva depende da velocidade: viscoelasticidade
- Relação ativa modelo polinómico ou exponencial



Função de ativação

- Entrada neural $u(t) \Rightarrow$ atividade musculo $q(t)$
- Modelo de Winters&Stark (1985):
 - Dois equações diferenciais de ordem 1:
 1. Dinâmica da excitação:
 - 30ms
 2. Concentração do Ca^{++} :
 - Ativação: 10 ms
 - Deativação: 50 ms
 3. Concentração de Ca^{++} relação linear com a força de saída



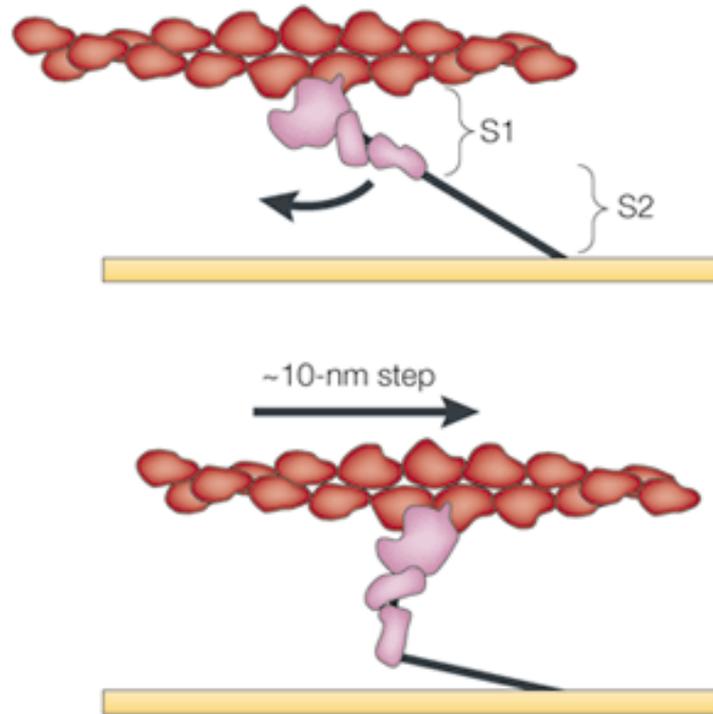
Reflexão sobre o modelo de Hill

- Independência dos termos de comprimento e velocidade
- Parâmetros desconhecidos:
 - Obtidos para musculo in vitro
 - Differente para musculo in vivo
- Parametros não constantes
- Modelos de Hill: experimentais (curve fitting)
- Tensão-comprimento: pendente negativa=rigidez negativa

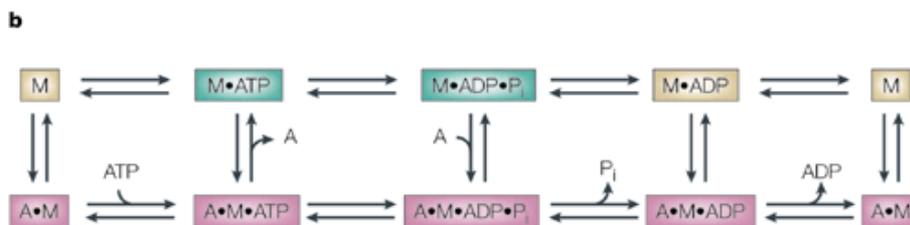
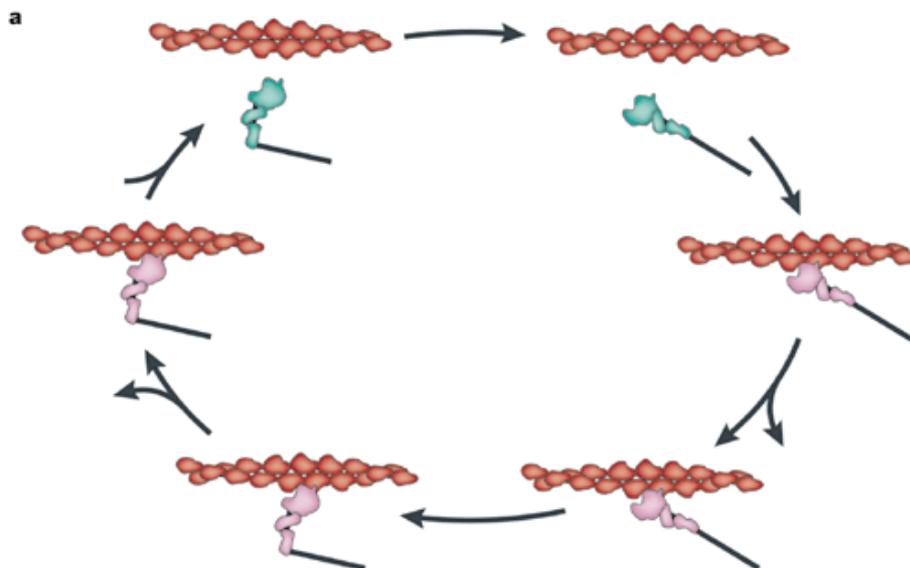


Modelos *cross-bridge*

- Nivel molecular: Elemento contrátil
 - Dois estados:
 - Attach $f(x)$
 - Detach $g(x)$
 - Dependem da distancia x dentro de um rango
 - Probabilidade de attachment dependente da distancia
 - A força total resulta da integração das forças dos cross-bridges
 - Precisa-se conhecer o módulo de rigidez



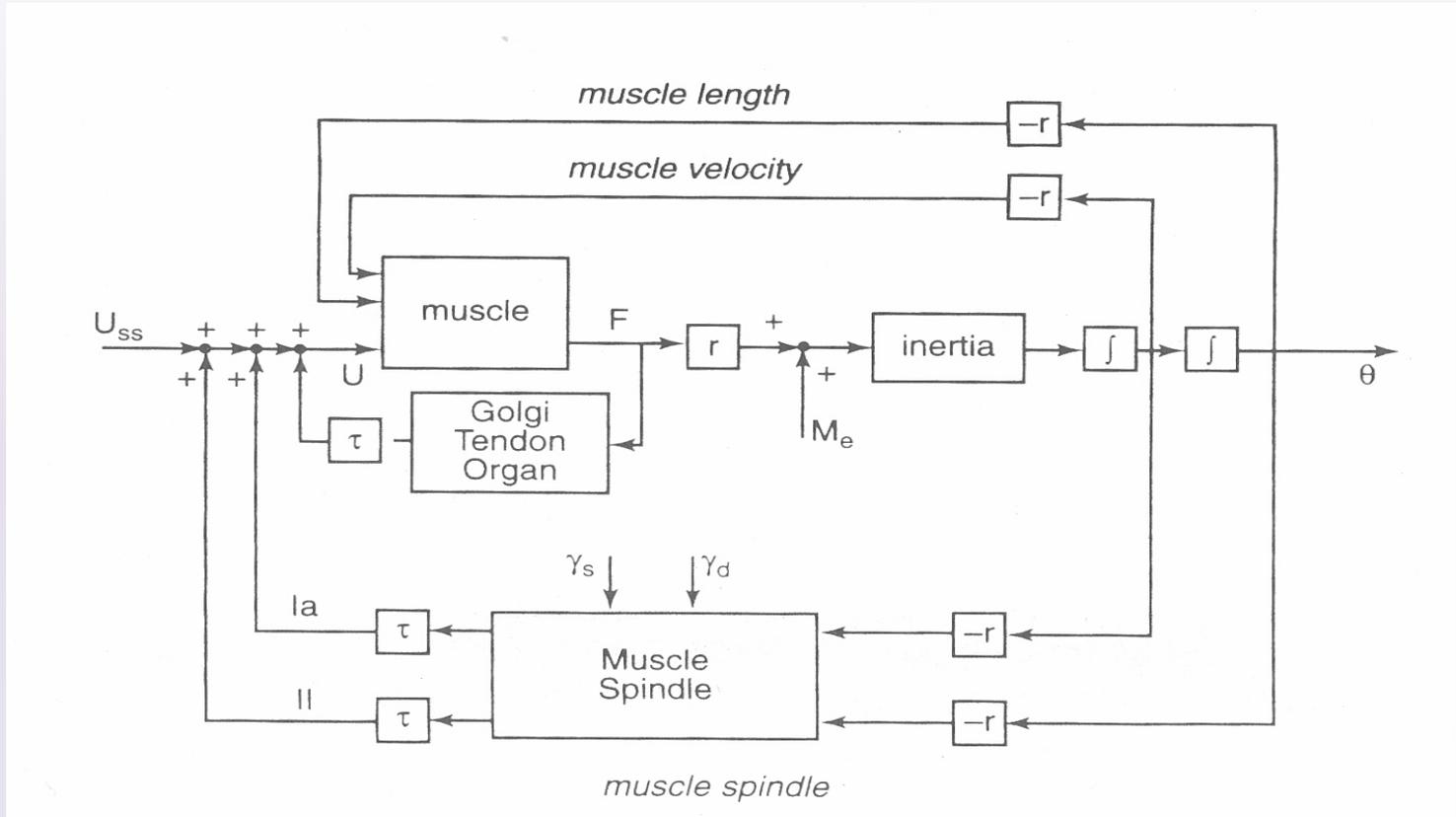
Nature Reviews | Molecular Cell Biology



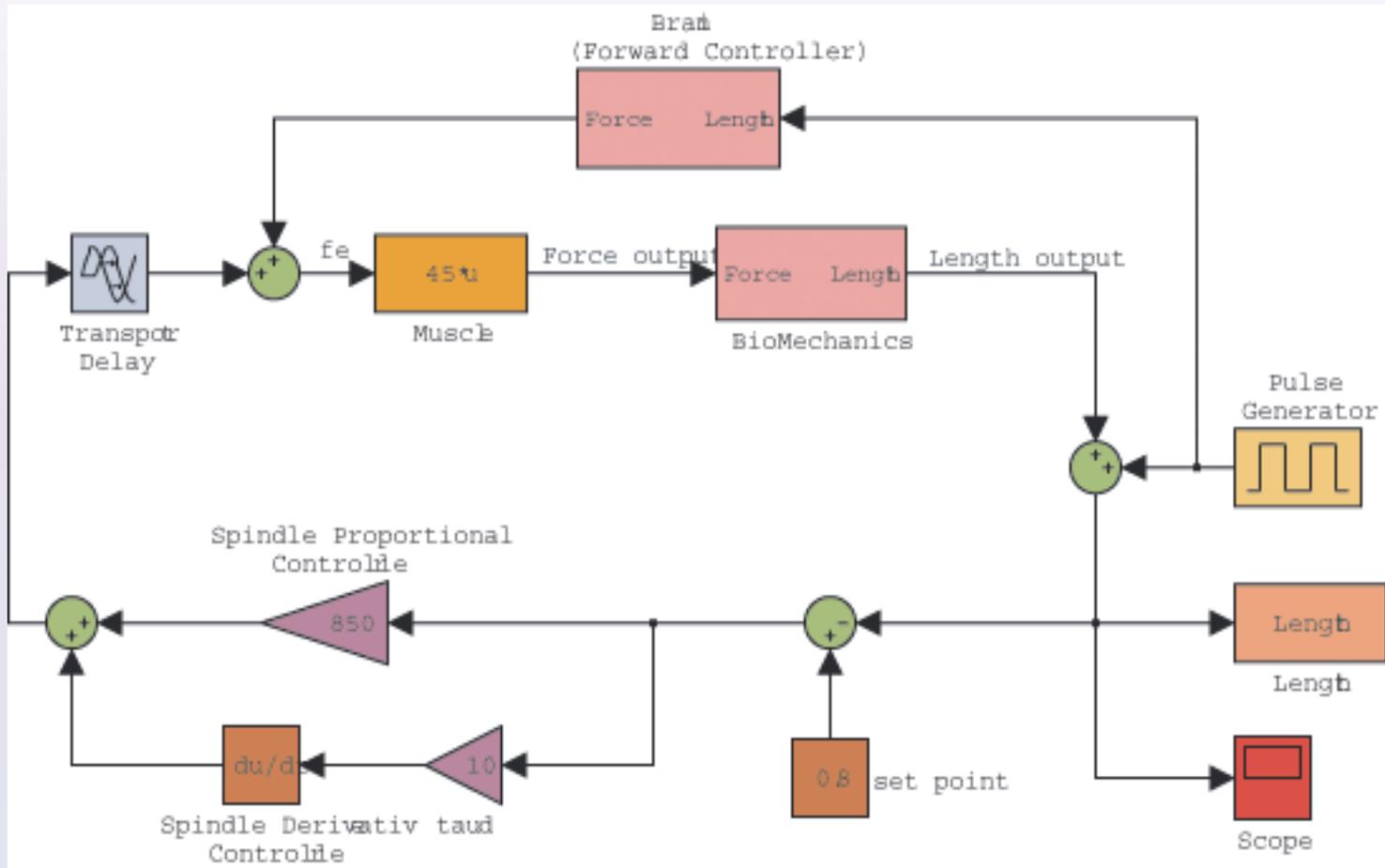
Nature Reviews | Molecular Cell Biology



Modelo: músculo e reflexo miotático



Van der Helm FCT, Rozendaal LA (2000). Musculoskeletal systems with intrinsic and proprioceptive feedback. In: Winters JM, Crago P (Eds), Neural control of posture and movement, Springer Verlag, NY, 164-174





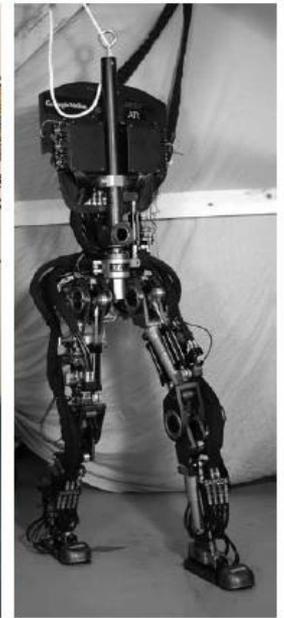
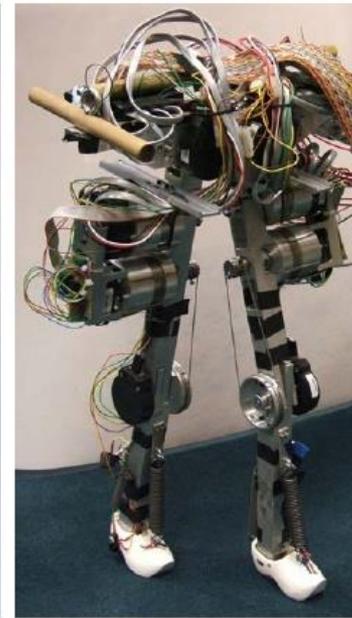
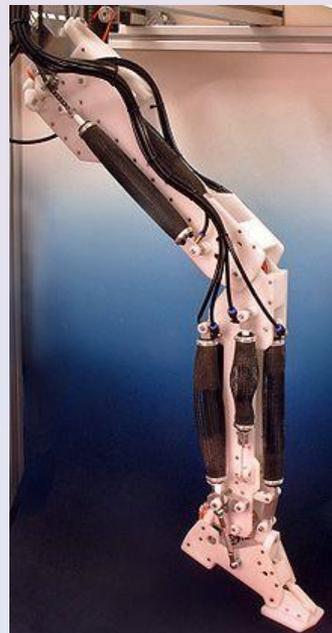
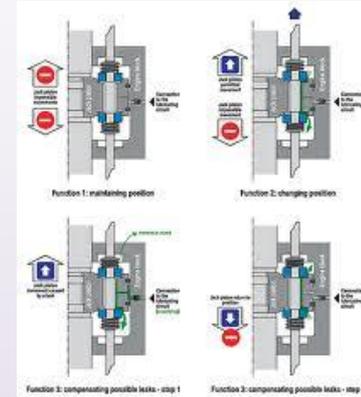
Conteúdo

1. Introdução: Justificação e objetivos
2. Atuadores biológicos humanos
 - Organização e Estrutura
 - Princípios de funcionamento
 - Modelos do músculo
 - Hill
 - Cross-bridge
3. Atuadores artificiais robóticos- biomiméticos
 - Atuadores artificiais
 - Comparação atuadores biológicos-artificiais
 - Atuação do sistema de atuadores fisiológicos



Atuadores robóticos

- Hidráulicos
- Pneumáticos
- Eletromagnéticos
- Outros





Hidráulicos

- Qualidades:
 - Primeiros robôs industriais
 - Alta capacidade de força. Alta taxa peso-potência
 - Controle:
 - Solenoide (on-off)
 - Servoválvula (proporcional)
- Desvantagens
 - Precisam bombeo de líquido: Alimentação
 - Custo alto de servoválvulas rápidas
 - Problemas de fugas e manutenção



Pneumáticos

- Movimento ponto a ponto
- Controle é simple
 - Difícil de modelar o comportamento não-linear
- Custo baixo
- Baixa eficiencia energética
- Manipuladores pneumáticos servocontrolados em malha fechada e controle proporcional
- Biomimetismo: Musculos pneumáticos



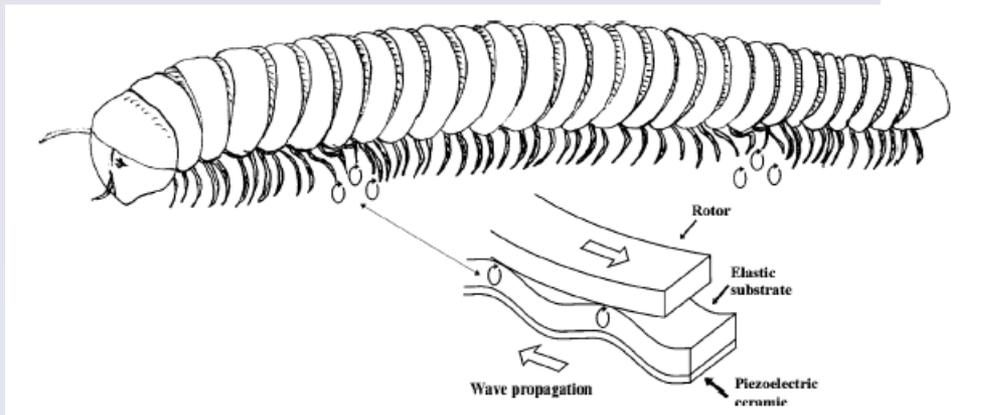
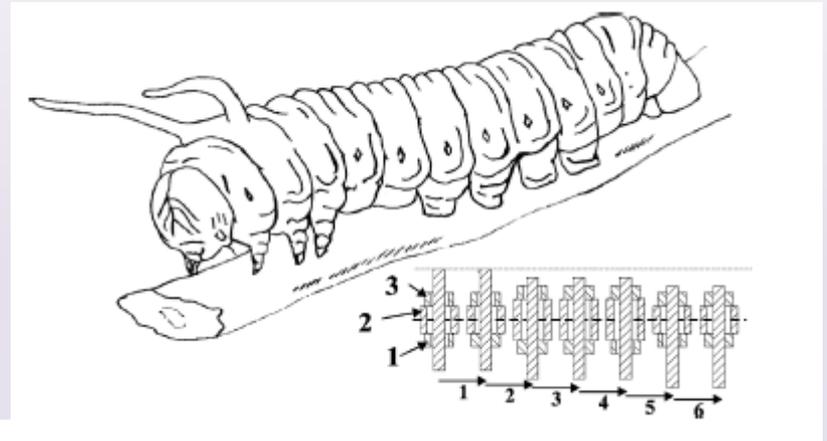
Electromagnéticos

- Motores de passo:
 - Malha aberta
- Motores com escovas:
 - Elevado peso e tamanho
- Motores sem escovas:
 - Maior complexidade de controle
 - Atuadores rotacionais e lineais



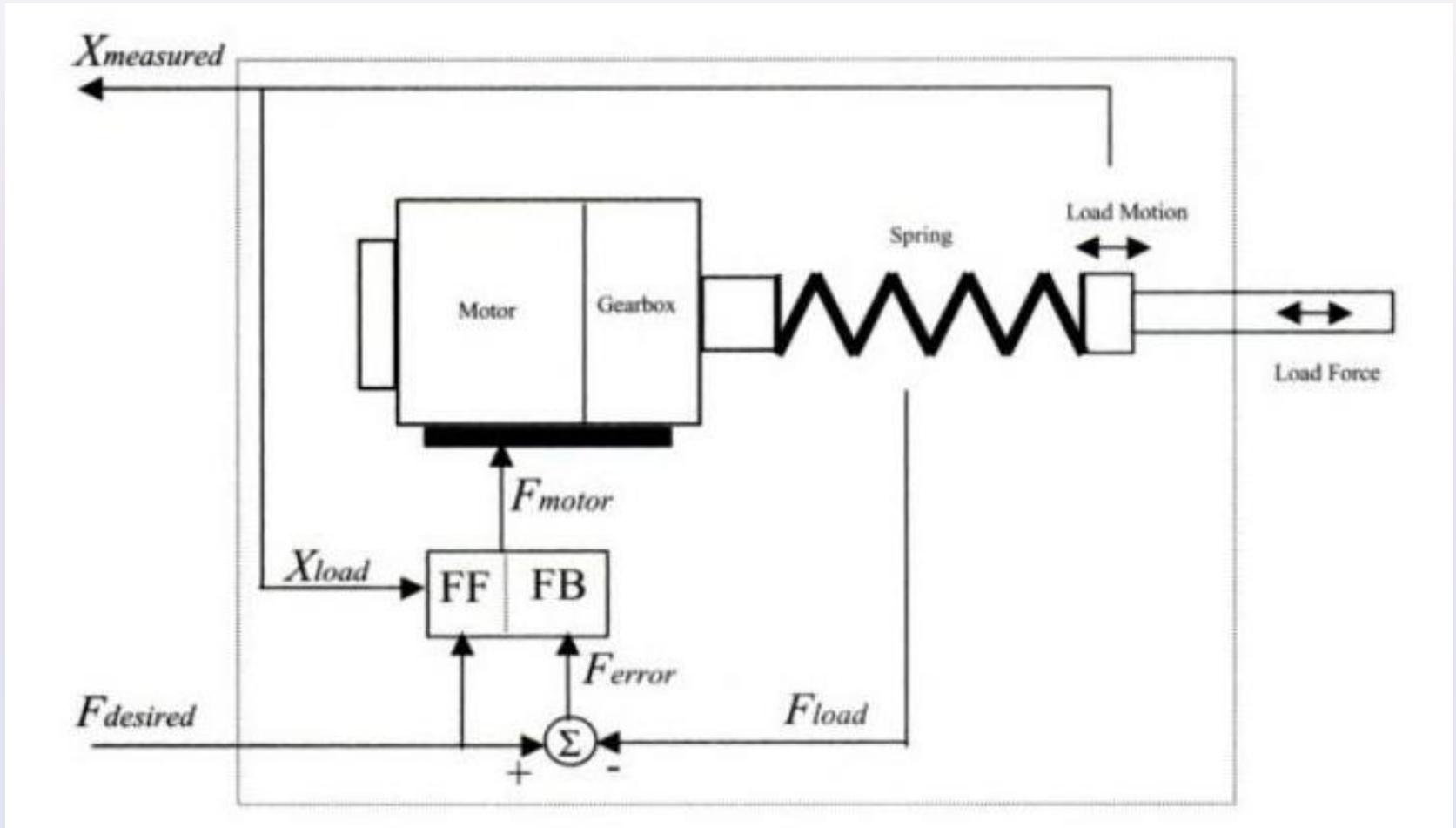
Outros

- Polímeros eletroativos (EPAM)
- *Shape memory alloys*
- Piezoelétricos
- Motores ultrasônicos



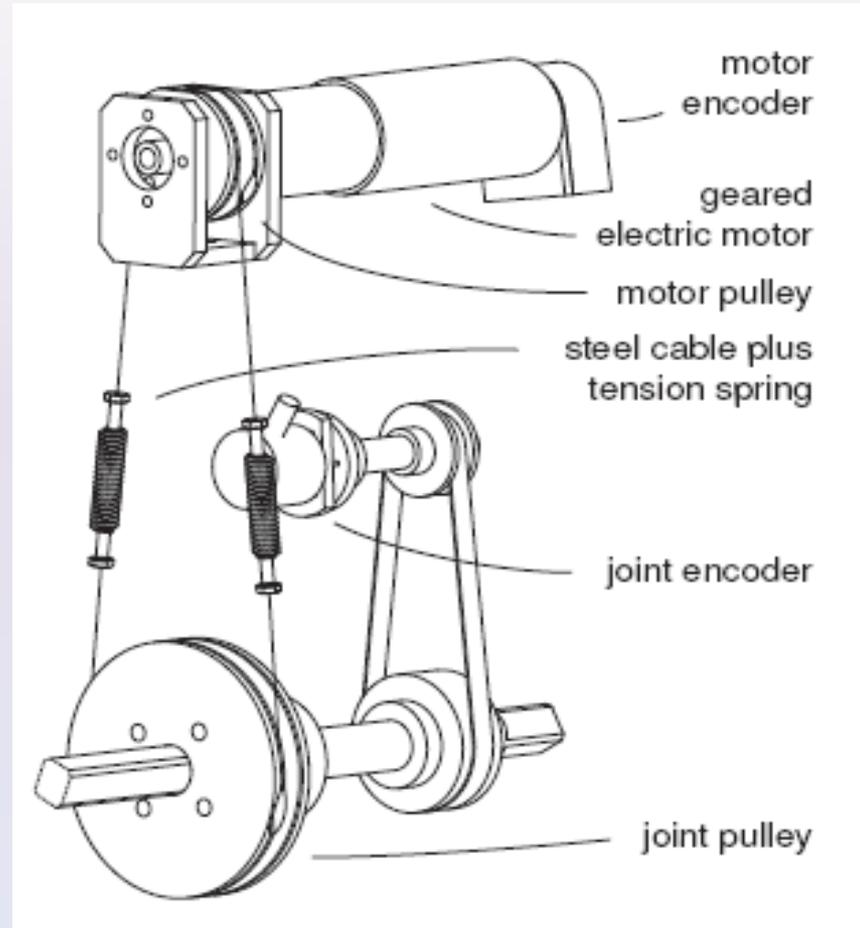
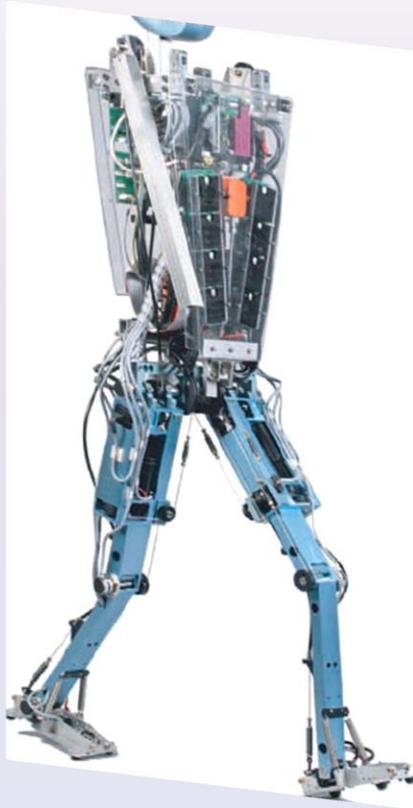


Atuadores artificiais: Series Elastic Actuators





Atuadores elásticos em serie





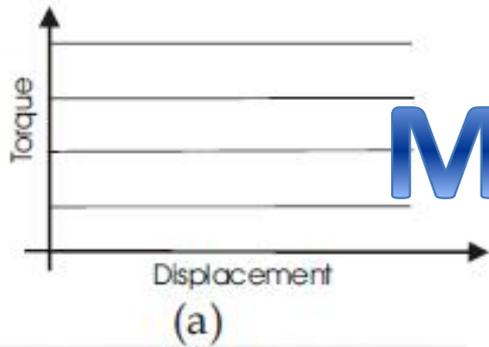


Comparação atuadores

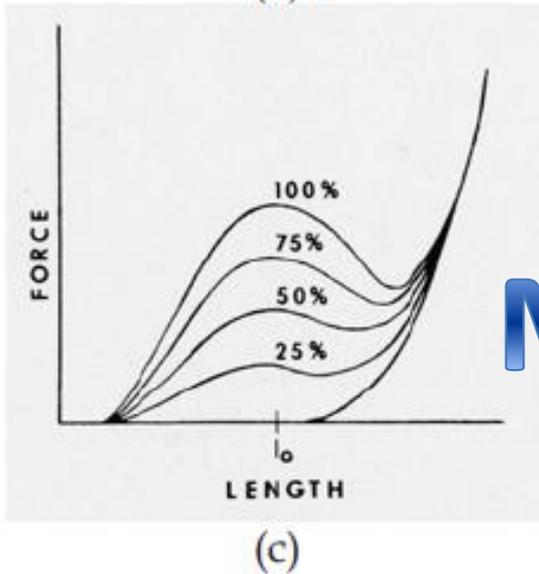
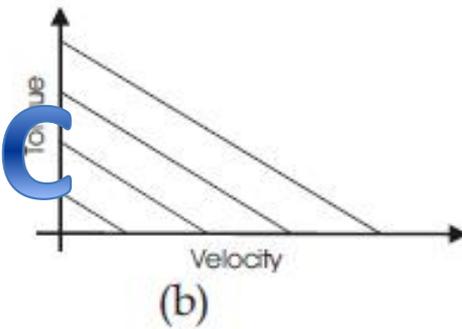
- Definição de métricas compatíveis:
 - Potencia de saída por:
 - Masa do atuador
 - Volume do atuador
 - Eficiência
 - Outras medidas: *stress, strain, strain rate, cycle life*, impedância mecânica



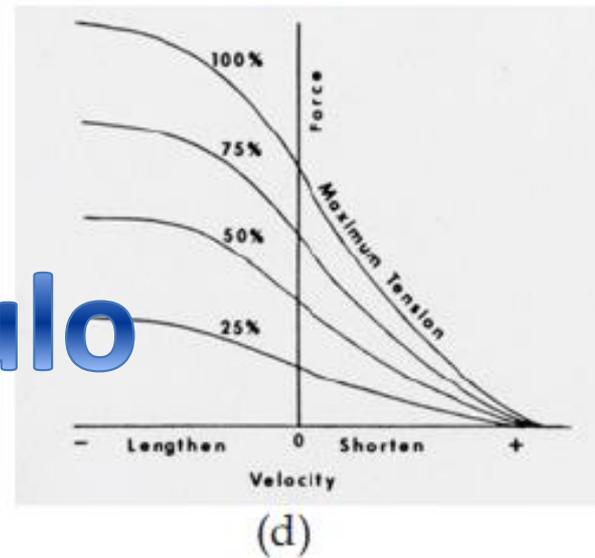
Exemplo de comparação



Motor DC



Musculo



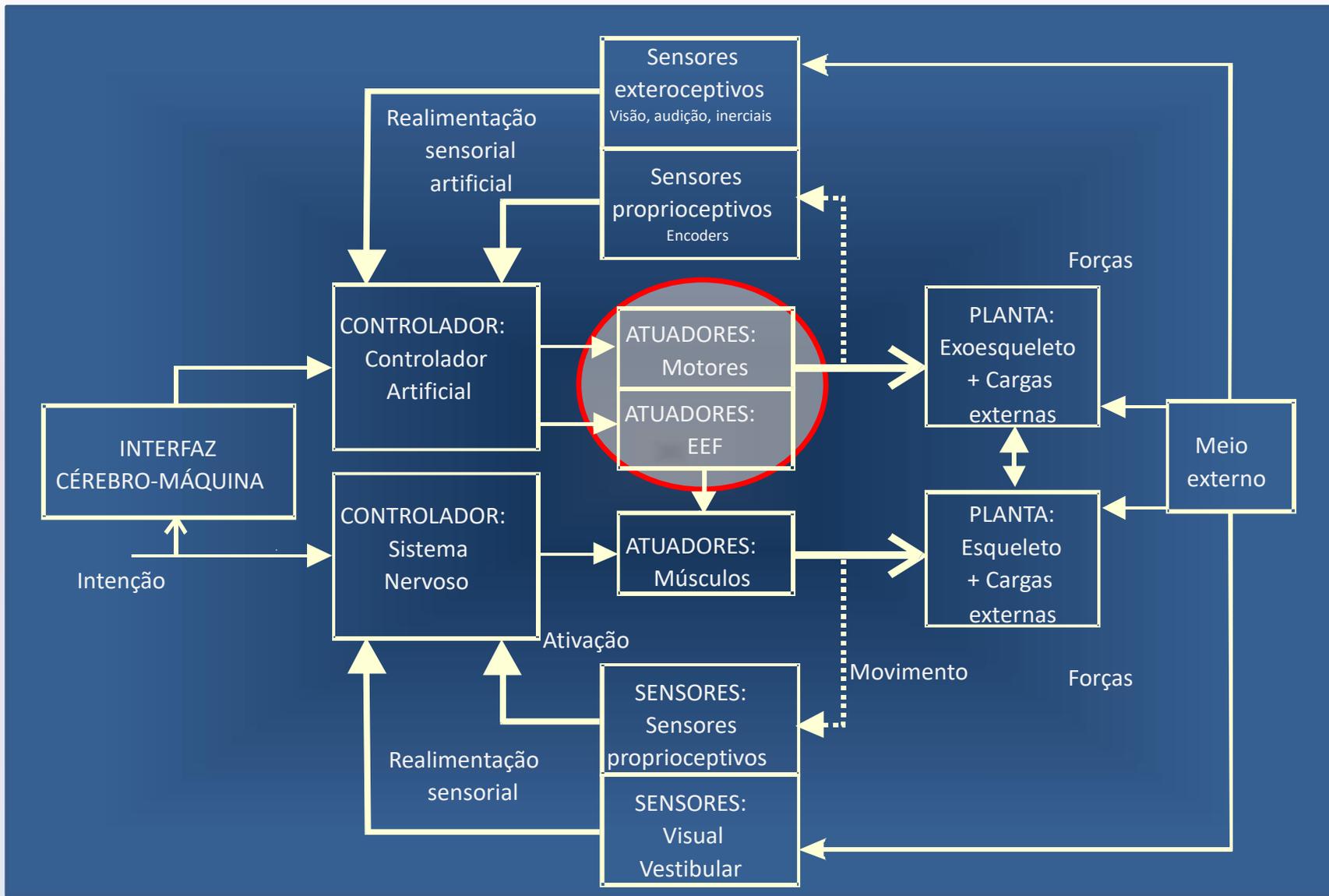


Comparação atuadores

Actuator Type (specific example)		Typical (Max.) Strain (%)	Typical (Max.) Stress (MPa)	Typical (Max.) Specific Elastic Energy Density (J/g)	Typical (Max.) Elastic Energy Density (J/cm ³)	Typical (Max.) Avg. Specific Power Density at 1 Hz (W/g)	Peak Strain rate (%/s)	Elastic Modulus (MPa)	Est. Max. Efficiency (%)	Relative Speed (full cycle)
NATURAL MUSCLE	Mammalian Skeletal Muscle	20 (40)	0.1 (0.35)	0.041 (0.08)	0.041 (0.08)	0.041 (0.08)	> 50	10–60	20%	Medium
ELECTROACTIVE POLYMER	Dielectric elastomer	25 (> 300)	1.0 (7.0)	0.1 (3.4)	0.1 (3.4)	0.1 (3.4)	> 450	0.1–10	60–90	Med. - Fast
	Electrostrictive Polymer	3.5 (7.0)	20 (45)	0.17 (> 0.53)	0.3 (> 1.0)	0.17 (> 0.53)	> 2000	400–1200	60–90	Fast
	Electrochemo-mechanical Conducting Polymer	2 (20)	5 (200)	0.1 (1.0)	0.1 (1.0)	0.1 (1.0)	1	200–3000	< 5	Med. -Slow
	Ionic Polymer Metal Composite	0.5 (3.3)	3 (15)	(0.004)	(0.006)	0.004	3.3	50–100	1.5–3	Med. - Slow
	Mechano-chemical Polymer/Gels (Polyelectrolyte)	> 40	0.3	0.06	0.06	< 0.06	< 1	?	30	Slow
	Piezoelectric Polymer (PVDF)	0.1	4.8	0.0013	0.0024	0.0013	?	450	60–90	Fast
OTHER	Liquid Crystal Elastomer (Thermal)	19 (45)	0.12 (0.45)	0.003 (0.06)	0.003 (0.06)	< 0.003	37	0.3 – 4	< 5%	Slow
	Shape Memory Polymer	100	4	2	2	< 0.2	?	?	< 10	Slow
NONPOLYMER ACTUATORS	Electromagnetic									
	Direct (Voice Coil)	50	0.10	0.003	0.025	0.003	> 1000	NA	> 80	Fast
	Motor/transmission	50	NA	NA	NA	0.5	< 200	NA	> 50	Medium
	Piezoelectric									
	Ceramic (PZT)	(0.2)	(110)	(0.013)	(0.10)	(0.013)	> 1000	25,000–70,000	> 90	Fast
	Single Crystal (PZN-PT)	(1.7)	(131)	(0.13)	(1.0)	(0.13)	> 1000	9000	> 90	Fast
	Shape Memory Alloy (TiNi)	> 5	> 200	> 15	> 100	< 15	300 (one direction only)	20,000–80,000	< 10	Slow
Thermal (Expansion)	1	78	0.15	0.4	< 0.15	Depends on heat transfer	> 70,000 (varies)	< 10	Slow	
Magnetostrictive (Terfenol-D, Etrema Products)	0.2	70	0.0027	0.025	>0.0027	>1000	40,000	60	Fast	

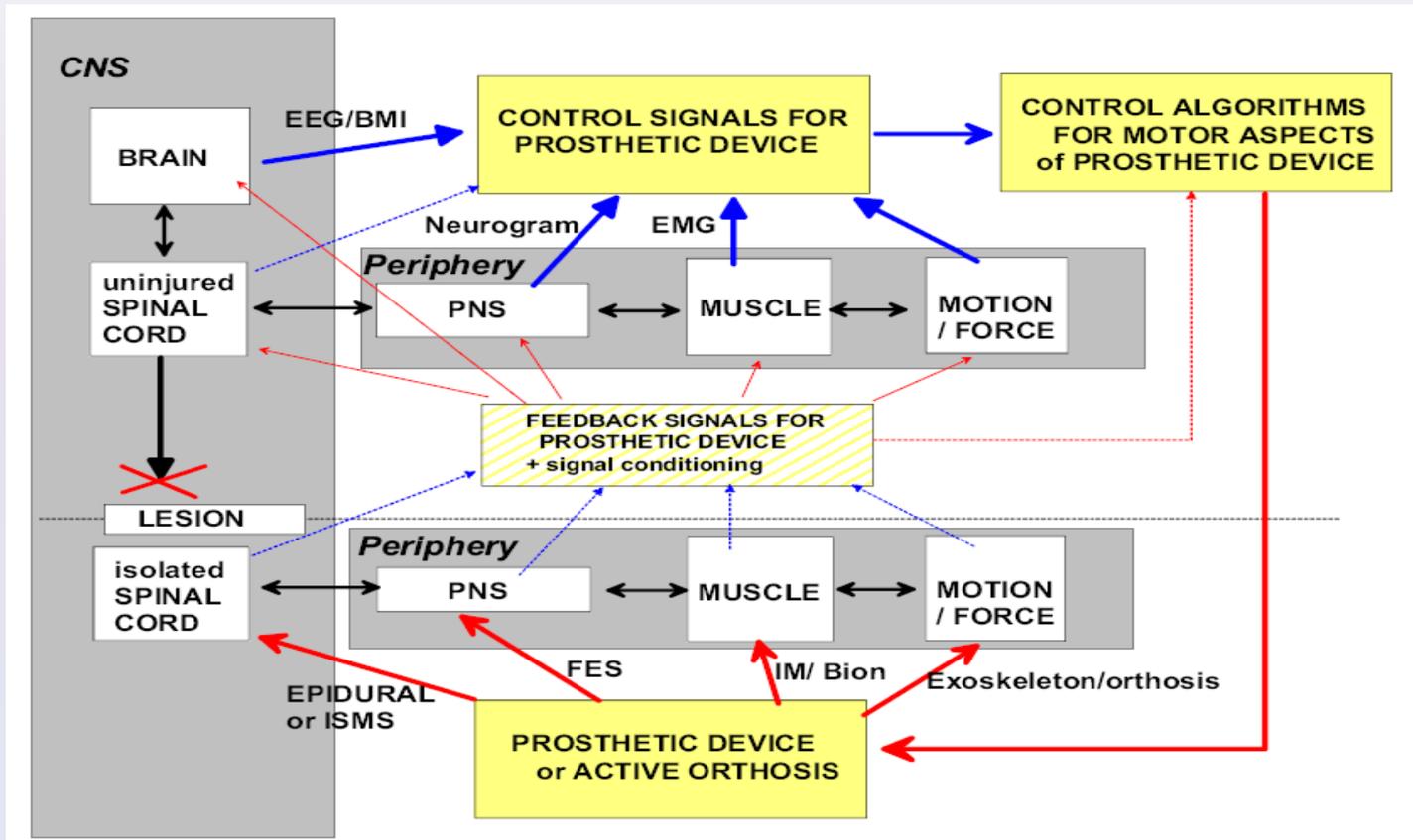


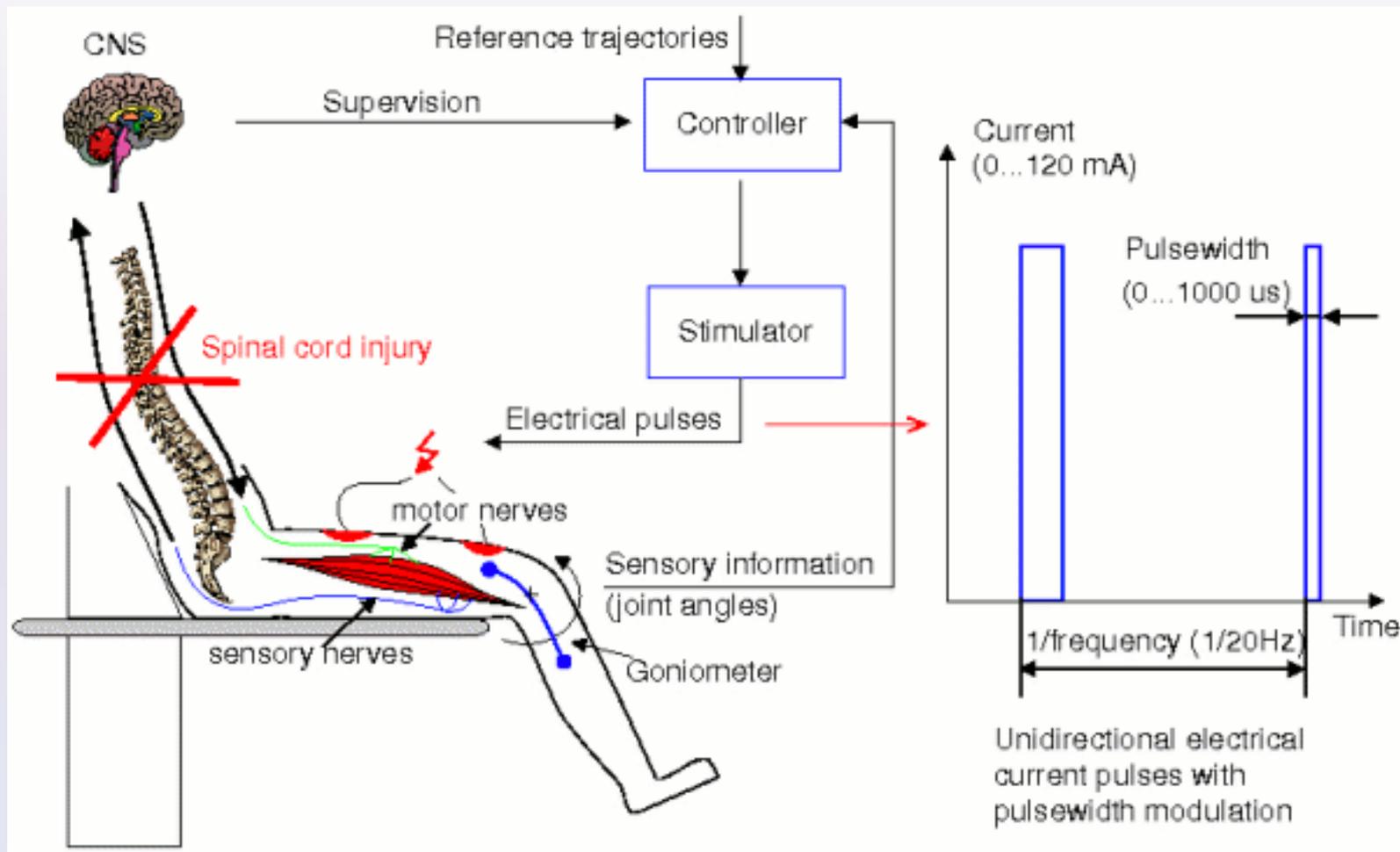
Atuação dos atuadores fisiológicos



Atuação do sistema de atuadores fisiológicos

- Paralisia







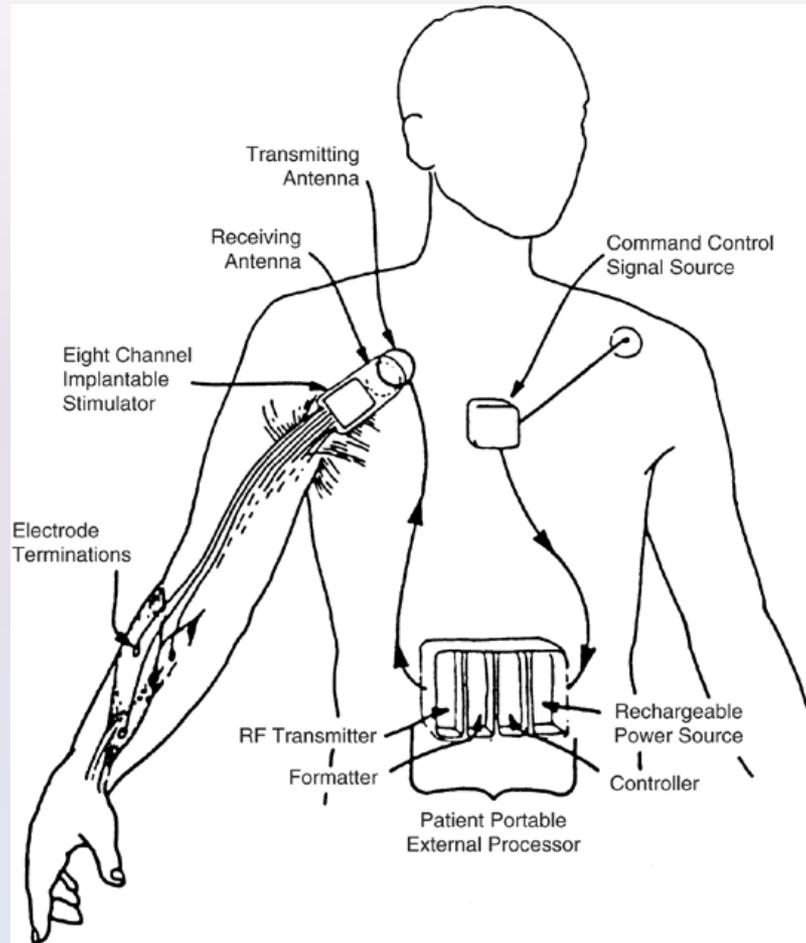
Atuação do sistema de atuadores fisiológicos

- Corrente elétrica no nervo:
 - Intracelular
 - Extracelular:
 - Estimulação elétrica
 - Estimulação magnética
- Estimulação elétrica:
 - Percutânea
 - Subcutânea
- Estimulação magnética



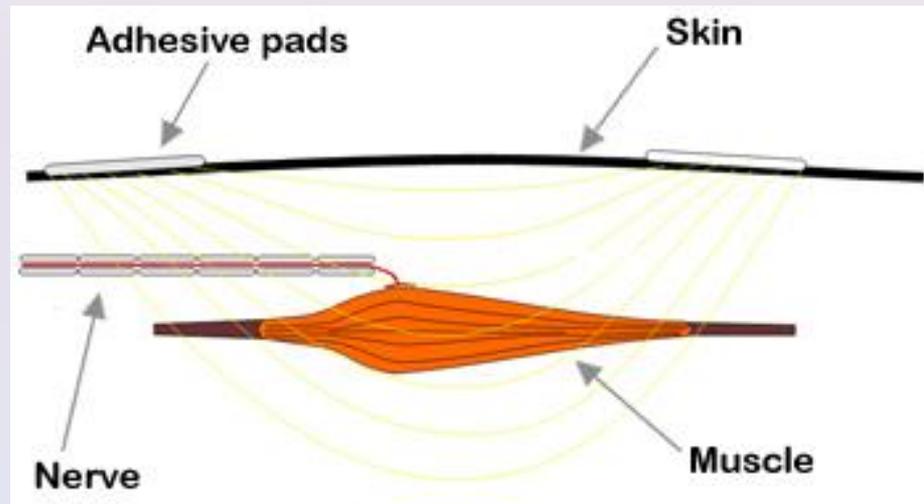
Atuação do sistema de atuadores fisiológicos

- Excitação dos axones dos motoneurônios:
 - Densidade de corrente elétrica no tecido:
 - Campo elétrico
 - Campo magnético
 - Potencial de membrana deve superar um umbral
- Controle artificial:
 - Recrutamento espacial
 - Novos arrays de eletrodos para FES
 - Recrutamento temporal





Sistema comercial





Muito Obrigado