

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Telecomunicações
e Controle

ISSN 1517-3550

BT/PTC/0004

Avaliação de Modelos Matemáticos
para Motoneurônios

Daniel Gustavo Goroso

André Fábio Kohn

O presente trabalho é um resumo da dissertação de mestrado apresentada por Daniel Gustavo Goroso sob orientação do Prof. Dr. André Fábio Kohn.: "Avaliação de Modelos Matemáticos para Motoneurônios", defendida em 14/12/99, na Escola Politécnica.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na Biblioteca de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica/USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

Goroso, Daniel Gustavo

Avaliação de modelos matemáticos para motoneurônios / D.G. Goroso, A.F. Kohn. – São Paulo : EPUSP, 2000.

9 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle, BT/PTC/0004)

1. Motoneurônios I. Kohn, André Fábio II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle III. Título IV. Série

ISSN 1517-3550

CDD 621.816

Avaliação de modelos matemáticos para motoneurônios

Daniel Gustavo Goroso

Laboratório de Engenharia Biomédica, Escola Politécnica da USP

Cx.P. 61548, CEP 05424-970 São Paulo, S.P.

*Bolsista da Fapesp. E-mails: ggoroso@leb.usp.br

Resumo: Dois modelos, originalmente propostos por TRAUB (1977) e BOOTH et al (1997) para motoneurônios da medula espinhal, foram simplificados e submetidos a diferentes testes. A relação entre frequência de descarga e corrente injetada, as características passivas da membrana, a condutância durante a AHP, os efeitos de um trem de PEPS, o limiar de voltagem durante dois disparos consecutivos e a resposta dinâmica à injeção de corrente tipo rampa e senoidal foram obtidos mediante simulação. Os resultados são comparados com os encontrados na literatura experimental. A principal contribuição deste trabalho é a avaliação dos modelos para motoneurônios através de uma bateria de testes adicionais aos realizados pelos autores originais, além da obtenção de subsídios para a melhoria dos modelos analisados.

Abstract A three compartments model of a motoneuron is proposed in this work, based on TRAUB (1977), and another model based on BOOTH et al. (1997) is reduced in order to have passive dendrite. The relation between firing frequency and injected current, the membrane passive characteristics, the behaviour of the conductance during the AHP, threshold voltage during the interspike interval, the effects of a train of EPSPs and the frequency responses were determined through simulations. The results given by the models are compared with data from the experimental literature. The main feature of this work is to purpose a serie of validation tests with motoneuron models, which were not employed before by others authors. In addition the tests showed how the models under study may be improved.

(Palavras chaves: modelos de motoneurônios, , relação frequência/corrente, condutância durante a AHP, resposta dinâmica).

Introdução

O controle da contração coordenada de músculos durante qualquer atividade de preensão, postura ou movimentação é realizado pela combinação de comandos cerebrais e das dinâmicas neuronais medulares e do sistema músculo-esquelético.

Uma linha de pesquisa visa o estudo de aspectos da circuitaria neuronal da medula espinhal humana no que diz respeito ao controle motor. Em paralelo com a abordagem experimental, é de grande importância o desenvolvimento de modelos matemáticos e simuladores das populações de neurônios e sinapses que compõe a medula espinhal. Uma vez conseguidos modelos confiáveis para certa gama de fenômenos, a simulação pode ser utilizada para testar hipóteses geradas após a análise dos resultados experimentais. Em geral, devido ao fato dos experimentos com humanos serem praticamente não invasivos, em muitas ocasiões ficam no ar algumas hipóteses que não são factíveis de serem respondidas experimentalmente no ser humano. Uma alternativa é realizar experimentos paralelos com macaco ou gato e a outra é realizar simulações computacionais. Esta última é a abordagem selecionada na "Avaliação de modelos matemáticos para motoneurônios".

O objetivo central da pesquisa é avaliar os modelos mais representativos de motoneurônios medula espinhal por teste fisiológicos que os autores originais não levaram em conta. Um aspecto importante do presente trabalho é a simulação de experimentos não utilizados no desenvolvimento original do modelo, para se verificar qual é o seu grau de generalização.

Foi obtida, mediante simulação, a relação entre frequência de descarga e amplitude de corrente injetada. Analisa-se, também, o comportamento da condutância que ocorre durante a AHP (afterhyperpolarization) e os efeitos de um trem de PEPS⁵, limiar de disparo e resposta dos modelos à injeção de corrente tipo rampa e tipo senóide. Alguns de testes estes não foram realizados pelo autores originais apesar de sua relevância.

Modelos

Os modelos mais refinados, que incluem mais que um compartimento, tentam ser mais realísticos para representar as propriedades dos motoneurônios referidas aos dendritos, corpo celular e axônio. Dentro de desse marco pode-se citar os trabalhos de TRAUB (1977) e BOOTH et al. (1997).

O motoneurônio (Mn) é representado como um cilindro não uniforme, sendo dividido em 3 compartimentos: 1 dendrito (D), soma (Sm) e o segmento inicial (SI). Arbitariamente considera-se o raio do cilindro do Sm igual ao do D. A relação da superfície do Sm é 1/15 da superfície do D.

A dinâmica do sistema é descrita por um conjunto de dez equações diferenciais acopladas, ordinárias, de primeira ordem e não lineares. Destas equações três correspondem à descrição dos três circuitos elétricos acoplados que representam o Sm, D e SI. O primeiro é similar ao modelo elétrico de HODGKIN-HUXLEY (1952), com a diferença que contém uma condutância de K^+ a mais em paralelo, que representa os canais de K^+ dependentes de Ca^{++} , característicos da AHP. O segundo só inclui componentes passivos e o SI é um típico circuito de HODGKIN-HUXLEY (1952). A ligação entre os compartimentos é feita mediante as condutâncias de acoplamento.

As sete equações paramétricas que descrevem os estados de ativação e inativação para os canais de K^+ , Na^+ e K^+ lento são as propostas no artigo original de TRAUB (1977). Entretanto, os valores de vários parâmetros não são encontrados na literatura. Os valores constantes das condutâncias máximas e os potenciais de equilíbrio dos diferentes íons foram particularizados para descrever o comportamento do Mn tipo F.

O modelo proposto por BOOTH et al. (1997), é o primeiro a representar o fenômeno da biestabilidade, observado em motoneurônios sob certas condições. Consiste basicamente em dois compartimentos: corpo celular e dendrito. O corpo celular possui, além das condutâncias de Na^+ e K^+ com dinâmicas que dependem de (V, t), a condutância lenta de K^+ dependente explicitamente da concentração intracelular de Ca^{2+} , que a sua vez depende da corrente de Ca^{2+} . O dendrito também possui elementos passivos mais uma condutância lenta de potássio igual ao soma.

O principal inconveniente do modelo de BOOTH et al (1997) radica em que muitos dos parâmetros empregados pelos autores correspondem a dados biofísicos de motoneurônios de tartaruga, mais algum dados estimados por POWERS e BINDER (1996) em suas simulações.

Os principais assuntos cobertos foram:

(1) Características passivas da membrana. (2) Comportamento durante descargas repetitivas. (3) Limiar de disparo e limiar de voltagem entre dois pulsos consecutivos. (4) Efeito de um trem de PEPS sobre uma descarga repetitiva. (5) Condutância durante dois disparos consecutivos. (6) Resposta dinâmica: (a) Injeção de corrente rampa e (b) Injeção de corrente senoidal.

Resultados

Características passivas da membrana

Foram encontradas a resistência de entrada (R_{in}), a constante de tempo da membrana, a magnitude da AHP, duração da AHP e constante de tempo da AHP. Os resultados obtidos do modelo de TRAUB (3 compartimentos) foram comparados com dados experimentais de gato e os resultados obtidos do modelo de BOOTH et al. (1997) e BOOTH DP foram comparados com dados de tartaruga. A Tabela 1 e 2 apresentam os dados da R_{in} .

Tabela 1 Dados experimentais de motoneurônio de gato e dados obtidos por simulação de R_{in} .

	Zengel et al.	Traub (3c)
	[M Ω]	[M Ω]
R_{in}	(0,6-0,9) ± 0.1	0,90 $\pm$ 0,05

Tabela 2 Dados experimentais de motoneurônio de tartaruga e dados obtidos por simulação de R_{in} .

	McDonagh et al.	BOOTH et al.	Booth Dp.
--	-----------------	--------------	-----------

[MΩ]	[MΩ]	[MΩ]
$2,5 \pm 0,1$	$0,55 \pm 0,05$	$0,50 \pm 0,05$

Observe-se que o modelo de TRAUB (3c) ajusta-se melhor aos dados da literatura. As constantes de tempo da membrana são apresentadas nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Dados experimentais de motoneurônio de gato e dados obtidos por simulação da constante de tempo da membrana.

	Zengel et al. [ms]	Traub (3C) [ms]
τ_m	$(5.0-8.0) \pm 0.2^*$	$2,78 \pm 0,02$

Tabela 4. Dados experimentais de motoneurônio de tartaruga e dados obtidos por simulação da constante de tempo da membrana.

McDonagh et al. [ms]	Booth et al. [ms]	Booth DP [ms]
$2,5 \pm 0,1$	$1,02 \pm 0,02$	$1,08 \pm 0,02$

Também foram determinadas as características da AHP, encontrando-se valores semelhantes aos fornecidos pela literatura. (Tabela 5 e 6)

Tabela 5: Características da AHP.

	Dados experimentais	TRAU B
τ_{AHP} [ms]	$(15-20) \pm 2$	$22,5 \pm 0,1$
Duração [ms]	$(65-80) \pm 5$	$80,71 \pm 0,01$
Magnitude [mV]	$(2,8-4,0) \pm 0.4$	$3,50 \pm 0,02$

Comportamento descarga repetitiva.

Foram determinadas as inclinações entre a corrente injetada e a taxa de disparo dos diferentes modelos (tabela 6 e 7).

Tabela 6: Inclinação da curva f/I para a faixa primária. [imp/s/nA].

Schwindt e Crill, (1984) (dado exp)	Traub (3 comp.)
$2.2 \pm 0,2^{\#}$	$2.2 \pm 0,1^*$

Tabela 7: Inclinação da curva f/I para a faixa primária. [imp/s/uA/cm²].

Mc Donagh et al. (1999)	Booth et al. (1997)	Booth DP
$3.2 \pm 0,2^{\#}$	$3,01 \pm 0,02^{\#}$	$3.13 \pm 0,02^{\#}$

Observa-se que os três modelos reproduzem satisfatoriamente a inclinação da relação f/I .

Limiar de disparo entre dois disparos consecutivos.

O limiar de voltagem entre dois disparos consecutivos em regime de disparos periódicos foi obtido na simulação medindo-se em diferentes fases do ciclo a corrente necessária para ocasionar um novo potencial de ação.

As figuras 1 e 2 mostram a variação do limiar de potencial de membrana durante o intervalo entre disparos correspondentes a uma frequência de disparo de 12,00 imp/s para os modelos de TRAUB (3 compartimentos), BOOTH et al. (1997) e BOOTH DP comparados com a trajetória do potencial de membrana e o respectivo limiar de potencial obtido por CALVIN (1974) em seus experimentos com motoneurônios de gato.

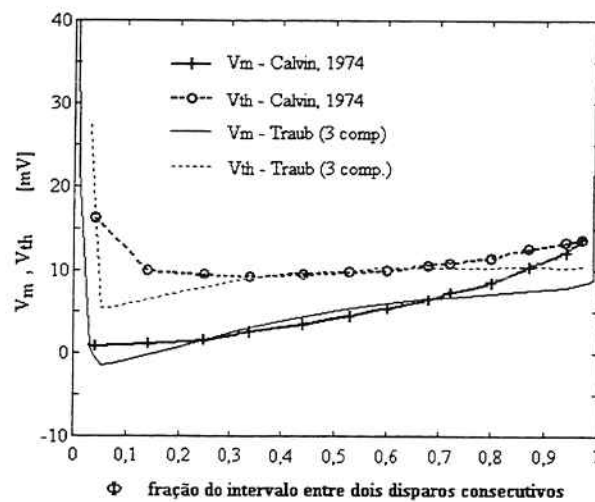


Figura 1. Trajetória do potencial de membrana (V_m) e limiar de potencial (V_{th}) durante o intervalo entre disparos correspondentes a uma frequência de disparo de 12,00 imp/s. Modelo de TRAUB (3 compartimentos).

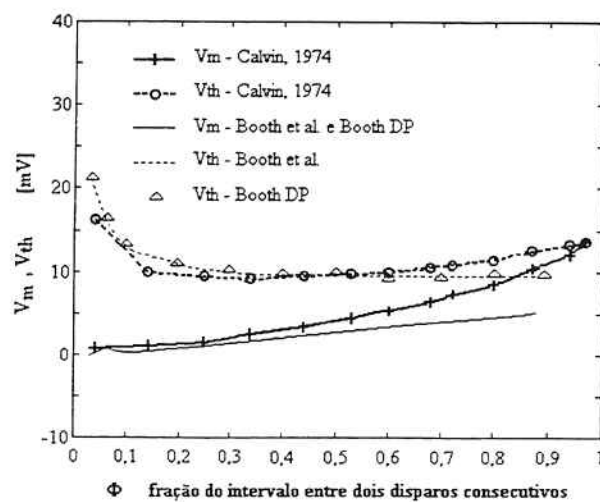


Figura 2. Trajetória do potencial de membrana (V_m) e limiar de potencial (V_{th}) durante o intervalo entre disparos correspondentes a uma frequência de disparo de 12,00 imp/s. Modelos de BOOTH et al. e BOOTH DP.

Observa-se as diferenças entre as trajetórias do potencial de membrana dos três modelos em relação à trajetória obtida por CALVIN (1974) em experimentos de motoneurônios de gato. Em segundo lugar o limiar nos modelos de BOOTH DP e BOOTH et al. (1997) segue mais de perto o comportamento fisiológico

Efeitos de um trem de "PEPS" sobre a descarga repetitiva do modelo de Mn

Com o objetivo de avaliar os modelos com testes não realizados pelos autores originais e comparar os mesmos com os dados experimentais fornecidos por POWERS e BINDER (1996), aplicou-se uma corrente supraliminar somada a um trem de pulsos de curta duração (0,5ms) (que imitariam correntes que causam PEPS) durante 1s, 0,5s após ter-se injetado um degrau de corrente. Mudando a frequência do trem é possível simular os efeitos de diferentes trens de PEPS.

A figura 3 apresenta as curvas obtidas quando a frequência basal de disparo é 12,00 imp/s, largura dos pulsos igual a 0.5ms e a relação do entre a amplitude do pulso e o degrau de corrente é 1:2

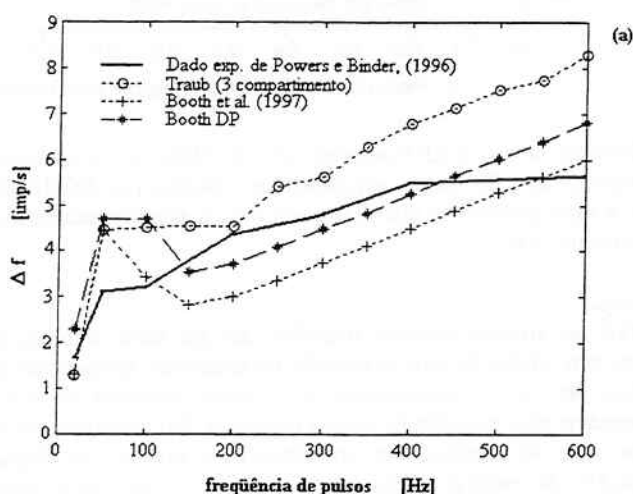


Figura 3 Variação da frequência de disparo em função da frequência do trem de pulsos para diferentes modelos. Frequência basal igual a 12,00 imp/s. Largura do pulso: 0.5ms. Relação $I_{peps}:I_i=1:2$.

Condutâncias durante dois disparos consecutivos.

Em muitos motoneurônios os disparos são seguidos por uma hiperpolarização. As pesquisas feitas em animais (motoneurônios α de gato) indicam que a AHP (*afterhyperpolarization*: hiperpolarização do potencial de membrana após a ocorrência do potencial de ação) é causada pelo incremento da condutância lenta de membrana aos íons de potássio.

A fim de poder comparar a variação da condutância durante a AHP que acontece em cada modelo com os dados experimentais reportados por SCHWINDT e CALVIN (1973), a mesma foi normalizada em relação ao valor da condutância em repouso e o intervalo entre dois disparos consecutivos (83,33 ms) foi reduzido à unidade (figura 4).

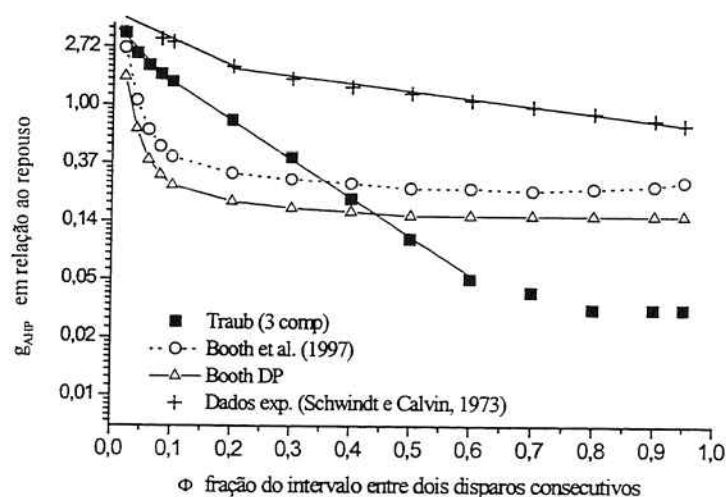


Figura 4. Condutância durante a AHP normalizada em relação à condutância em repouso com o eixo vertical em escala logarítmica. Os dados experimentais obtidos por SCHWINDT e CALVIN (1973) foram ajustados com a superposição de duas exponenciais da mesma maneira que os dados obtidos por simulação dos diferentes modelos.

Respostas Dinâmicas.

É comum observar no sistema nervoso situações em que para se obter resultados extremamente precisos, componentes individuais de uma população de neurônios apresentam precisão modesta em seu comportamento e interconexões. Aparentemente é a função coletiva de uma grande quantidade de neurônios que é responsável pela precisão de todo o resultado. Por exemplo, durante a locomoção há uma excitação rítmica que atua na população de motoneurônios que os faz disparar surtos rítmicos que comandam as contrações do músculo. Em outras palavras, a resposta dinâmica de cada um dos motoneurônios determina o comportamento da população e o padrão de disparos da população de motoneurônios que atua sobre determinado músculo define como o músculo vai se contrair.

A figura 5 apresenta os resultados obtidos para os modelos de TRAUB(3 compartimento), de acordo a metodologia de BALDISSERA et al. (1982). Este teste também foi realizado com os modelos mais simples tipo *leaky* integrador puro e *leaky* integrador com realimentação negativa.

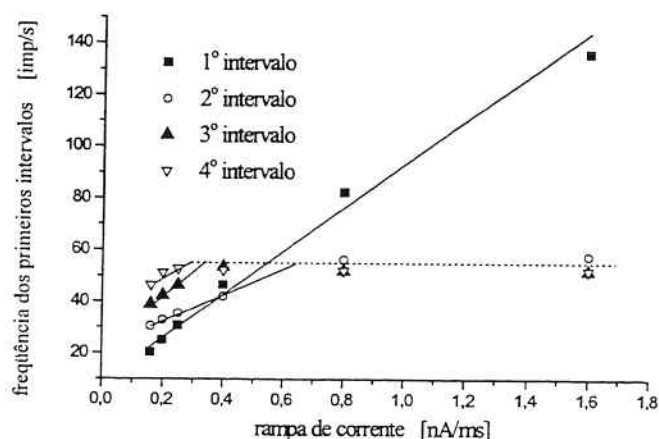


Figura. 5: Desenho $f-I$ para o primeiro, segundo, terceiro e quarto intervalo entre disparos. Modelo de TRAUB (3 compartimentos).

Observa-se que depois de um certo valor de inclinação de rampa cada um dos intervalos satura (com exceção do primeiro) e o valor da frequência instantânea atinge um valor de patamar. Por exemplo; nas

simulações do modelo de TRAUB (3 compartimentos) a inclinação do segundo intervalo atinge a saturação (52,00 imp/s) quando a rampa de corrente é aproximadamente 0,8 nA/ms. O terceiro intervalo satura por acima de 0,3 nA/ms, igualmente acontece com o quarto intervalo (vide figura 5).

Os diferentes modelos também foram submetidos ao teste de injetar corrente tipo senoide de acordo a metodologia experimental descrita por BALDISSERA et al (1984).

Dessa forma foi obtido o ganho e fase de acordo a metodologia experimental descrita por BALDISSERA et al (1984). A figura 5.33 mostra o ganho obtido nos diferentes modelos seguindo a metodologia experimental descrita por BALDISSERA et al. (1984). Os modelos tipo *leaky* integrador puro e *leaky* com realimentação negativa implementados correspondem aos descritos na seção anterior com parâmetros fisiológicos.

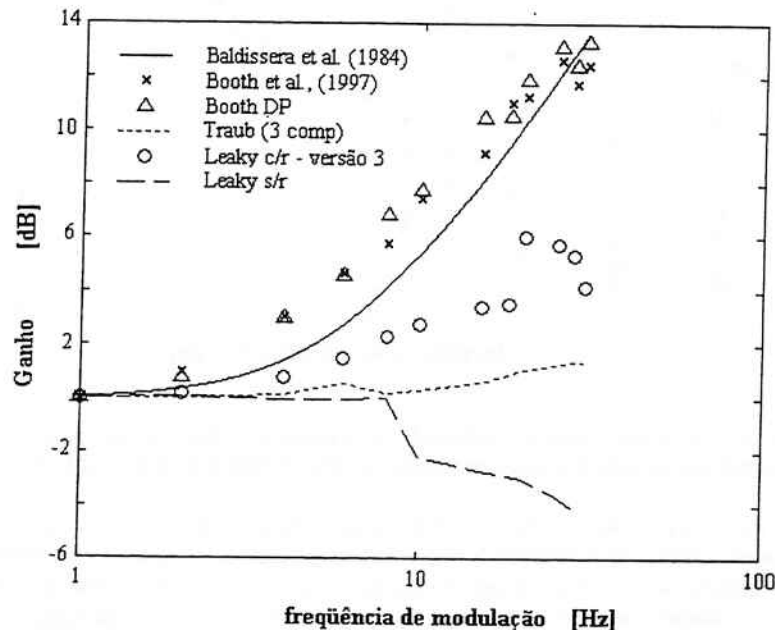


Figura 6. Ganho obtido para os distintos modelos de motoneurônios seguindo a metodologia descrita por BALDISSERA et al (1984) e dados experimentais do autor desses mesmos autores. A frequência basal em cada um dos modelos foi mantida em 52,00imp/s. (c/r): com realimentação. (s/r): sem realimentação.

Observa-se na figura 6 que os modelos de BOOTH et al. (1997) e BOOTH DP, além de apresentar comportamentos semelhantes são os que melhor acompanham ao resultado experimental obtido por BALDISSERA et al. (1984).

No modelo de TRAUB (3 compartimentos) é observado que o ganho é praticamente constante para frequências de modulação menores que 10Hz. Logo cresce lentamente até 30 Hz, mas os valores da simulação estão abaixo dos resultados experimentais. Também deve mencionar-se as diferenças de comportamento entre os modelos tipo *leaky* integrador puro ou sem realimentação (*leaky s/r*), e *leaky* com realimentação negativa.

A figura 6 mostra a fase dos diferentes modelos obtida a partir da metodologia descrita no capítulo anterior. A relação de amplitudes entre o degrau de corrente e a corrente tipo senoidal foi 1:200. O gráfico também mostra a fase do modelo de TRAUB (3 compartimentos) obtida com uma relação de perturbação 1:8 e 1:200. Observa-se que não há diferença alguma entre ambas. As simulações realizadas nos outros modelos com relações de perturbação 1:100, 1:50, 1:25, e no caso particular do modelo de TRAUB (3compartimentos) 1:10 e 1:8, mostram que a fase não depende da relação entre as amplitudes da corrente tipo senoidal. e o degrau de corrente. Isso é devido a que a grandeza da perturbação é suficientemente pequena em relação à corrente injetada para não distorcer o histograma de frequências.

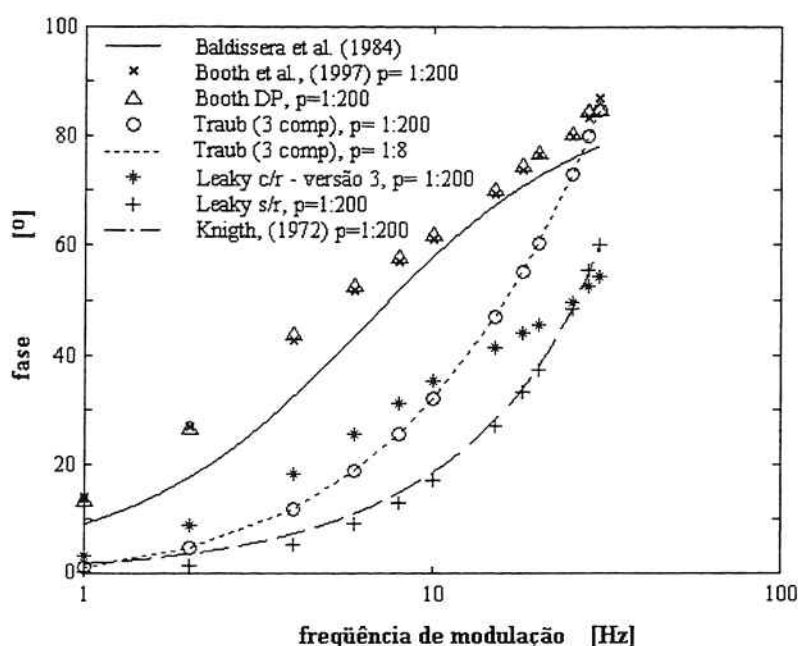


Figura 7. Fase dos distintos modelos aplicando a metodologia descrita na seção 5.6.4, a qual é independente da metodologia empregada por BALDISSERA et al (1984) e KNIGHT (1972).

Note-se na figura 7 que os dados obtidos pela simulação do modelo *Leaky* integrador puro acompanham a curva teórica de KNIGHT (1972) correspondente as mesmas características do modelo implementado na simulação ($\tau_m = 5\text{ms}$, limiar de disparo (V_{th}) = 14,4mV, $S_0 = 2,943\text{ mV/ms}$ e relação de perturbação 1:200). Também deve-se notar que o desempenho do *leaky* sem realimentação em relação ao *leaky* c/realimentação negativa fica mais abaixo da curva experimental obtida por BALDISSERA et al. (1984) em motoneurônios de gato tipo F.

Os modelos que melhor acompanham a curva experimental são os modelos de BOOTH et al. (1997) e BOOTH DP. Observa-se que as respostas de ambos praticamente se sobrepõe, além de estar acima da curva experimental.

Discussão

A principal contribuição do presente trabalho consistiu na avaliação dos modelos de TRAUB (3 compartimentos), BOOTH et al. (1997) e BOOTH com dendrito passivo através de uma bateria de testes que permitiu uma análise mais ampla da representatividade dos modelos face aos modelos reais. Uma análise auxiliar de modelos tipo *leaky* integrador foi de utilidade para identificar com maior precisão as variáveis e parâmetros que têm influência direta na resposta em frequência dos modelos de TRAUB (3 compartimentos) e BOOTH et al. (1997).

O modelo de TRAUB (3 compartimentos) reproduz razoavelmente os experimentos de tipo estático (relação f/I , limiar de disparo, condutância entre dois disparos consecutivos e as características passivas da membrana). Não acontece o mesmo com os teste de tipo dinâmico onde foi observado que o melhor desempenho corresponde ao obtido pelo modelo de BOOTH et al. (1997) e BOOTH DP.

Bibliografia.

BALDISSERA, F.; CAMPADELLI, P; PICCINELLI, L. Neural encoding of input transients investigated by intracellular injection of ramp currents in cat α -motoneurons. *J. Physiology* 328. pp: 73-86. 1982.

- BALDISSERA, F.; CAMPADELLI, P; PICCINELLI, L. The dynamic response of cat α -motoneurons investigated by intracellular injection of sinusoidal currents. **J. Physiology.** vol 54. pp: 275-282. 1984.
- BOOTH, V. RINZEL, J. KIEHN, O. Compartmental model of vertebrate motoneurons for Ca^{2+} -dependent spiking and plateau potentials under pharmacological treatment. **J. Neurophysiol.** vol 78: 3371-3385. 1997.
- CALVIN, W.H. The modes of repetitive firing and the role of threshold time course between spike. **Brain Research.** 69, pp 341-436. 1974.
- HODGKIN, A.L.; HUXLEY, A.F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. **J. Physiol.** Vol 117. Pp: 500-544. 1952.
- McDONAGH, J. GORMAN, R.B. GILLIAM, E.E. HORNBY, T.H. REINKING, R.M. STUART, D.G. Electrophysiological and morphological properties of neurons in the ventral horn of the turtle spinal cord. **J. Physiol. (Paris).** Vol 93, pp. 3-16. 1999
- POWERS, R.K; BINDER, M.D. Experimental evaluation of input-output models of motoneuron discharge. **J. of Neurophysiology.** vol. 75. No. 1. pp: 367-379. 1996.
- SCHWINDT, P. C.; CALVIN, W.H. Nature of conductance underlying rhythmic firing in cat spinal motoneurons. **J. Neurophysiol.** 36: pp. 955-973. 1973.
- TRAUB, R.D. Motoneurons of different geometry and the size principle. **Biol. Cybern.** 25: pp. 163-176. 1977.
- ZENGEL, J. E.; REID, S. A.; SYPERT, G.W.; MUNSON, J.B. Membrane electrical properties and prediction of motor-unit type of medial gastrocnemius motoneurons in the cat. **J. Neurophysiology.** vol 53. No 5. 1323-1344. 1985.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PTC/9901 – Avaliação de Ergoespirômetros Segundo a Norma NBR IEC 601-1- MARIA RUTH C. R. LEITE, JOSÉ CARLOS TEIXEIRA DE B. MORAES
- BT/PTC/9902 – Sistemas de Criptofonia de Voz com Mapas Caóticos e Redes Neurais Artificiais – MIGUEL ANTONIO FERNANDES SOLER, EUVALDO FERREIRA CABRAL JR.
- BT/PTC/9903 – Regulação Sincronizada de Distúrbios Senodais – VAIDYA INÉS CARRILLO SEGURA, PAULO SÉRGIO PEREIRA DA SILVA
- BT/PTC/9904 – Desenvolvimento e Implementação de Algoritmo Computacional para Garantir um Determinado Nível de Letalidade Acumulada para Microorganismos Presentes em Alimentos Industrializados – RUBENS GEDRAITE, CLÁUDIO GARCIA
- BT/PTC/9905 – Modelo Operacional de Gestão de Qualidade em Laboratórios de Ensaio e Calibração de Equipamentos Eletromédicos – MANUEL ANTONIO TAPIA LÓPEZ, JOSÉ CARLOS TEIXEIRA DE BARROS MORAES
- BT/PTC/9906 – Extração de Componentes Principais de Sinais Cerebrais Usando Karhunen – Loève Neural Network – EDUARDO AKIRA KINTO, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PTC/9907 – Observador Pseudo-Derivativo de Kalman Numa Coluna de Destilação Binária – JOSÉ HERNANDEZ LÓPEZ, JOSÉ JAIME DA CRUZ, CLAUDIO GARCIA
- BT/PTC/9908 – Reconhecimento Automático do Locutor com Coeficientes Mel-Cepstrais e Redes Neurais Artificiais – ANDRÉ BORDIN MAGNI, EUVALDO F. CABRAL JÚNIOR
- BT/PTC/9909 – Análise de Estabilidade e Síntese de Sistemas Híbridos – DIEGO COLÓN, FELIPE MIGUEL PAIT
- BT/PTC/0001 – Alguns Aspectos de Visão Multiescalas e Multiresolução – JOÃO E. KOGLER JR., MARCIO RILLO
- BT/PTC/0002 – Placa de Sinalização E1: Sinalização de Linha R2 Digital Sinalização entre Registradores MFC- PHILLIP MARK SEYMOUR BURT, FERNANDA CARDOSO DA SILVA
- BT/PTC/0003 – Estudo da Técnica de Comunicação FO-CDMA em Redes de Fibra Óptica de Alta Velocidade – TULIPA PERSO, JOSÉ ROBERTO DE A. AMAZONAS

