Simulação 03
Redes de Neurônios Acoplados

Prof. Marcos Quiles

O que veremos

1. Um pouco de história sobre modelagem neuronal
2. O modelo biológico
3. Alguns modelos artificiais de neurônios

O Neurônio Biológico

- O Neurônio é semelhante a qualquer célula do corpo
  - Membrana, citoplasma e núcleo
- Apresenta algumas características particulares
  - Dendritos, Soma e Axônio
- O neurônio é excitável
- Os neurônios se comunicam através de neurotransmissores pela fenda sináptica

O Neurônio Biológico

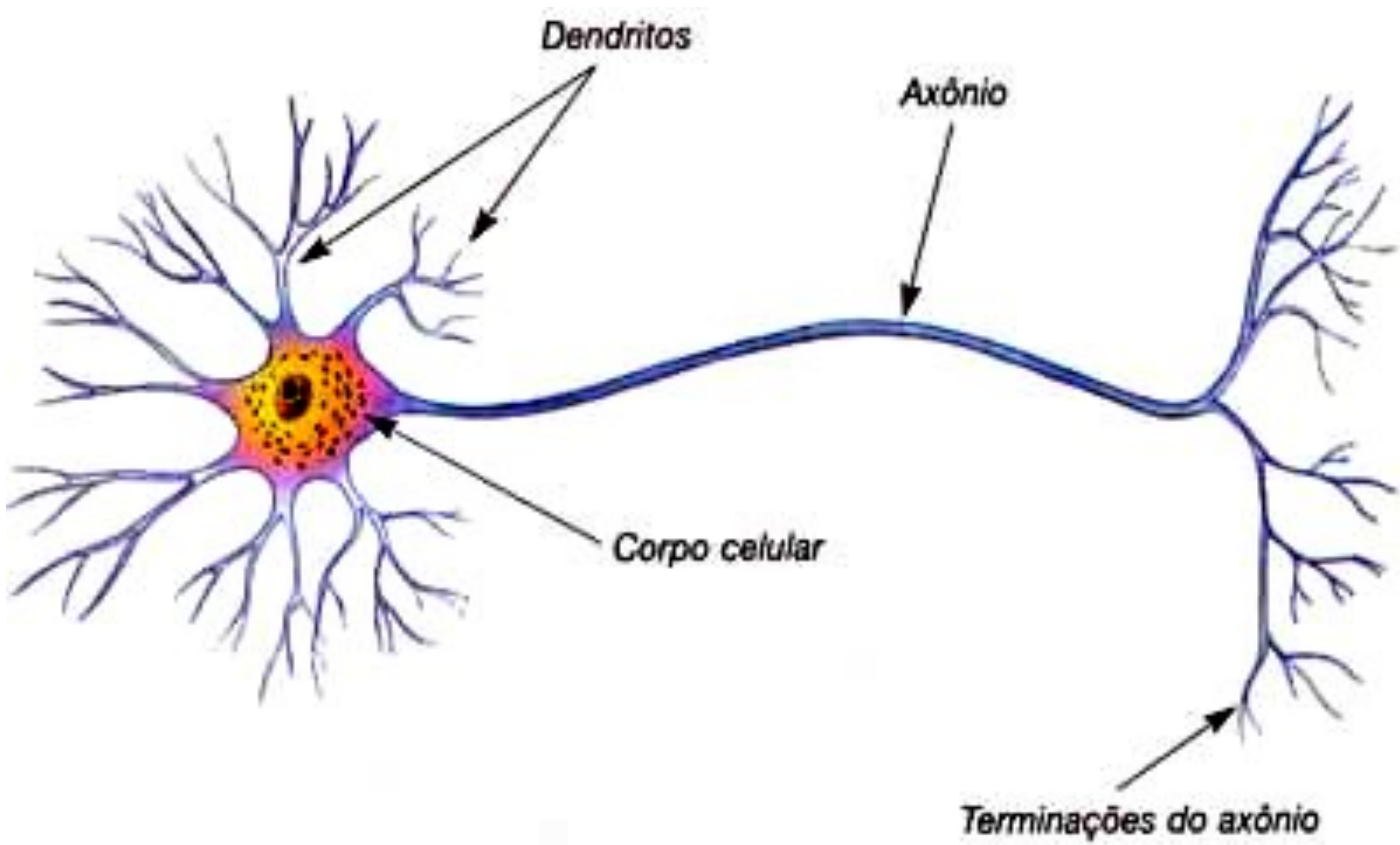
- Dendritos: Recebem as informações de outras células ou neurônios
- Soma: "Processa a informação"
- Axônio: conduz a informação do soma até a extremidade do neurônio (sinapses) onde são liberados os neurotransmissores
  - Potencial de ação
- Sinapses: medeiam as conexões entre neurônios

O Neurônio Biológico

- Sinapses liberam os neurotransmissores
  - Sinal Elétrico → Químico → Elétrico

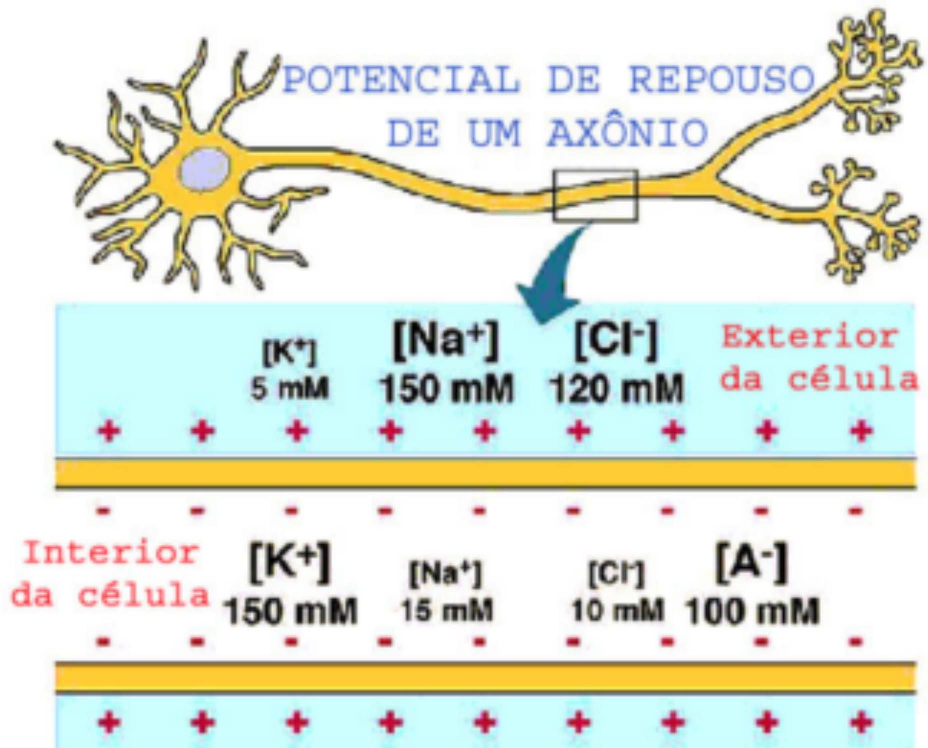
- Plasticidade do neurônio
  - Criação de novas conexões sinápticas
  - Modificação das sinapses existentes

O Neurônio Biológico



O Potencial de Ação

- O Neurônio se mantém em um estado de repouso (aprox. -70mv)



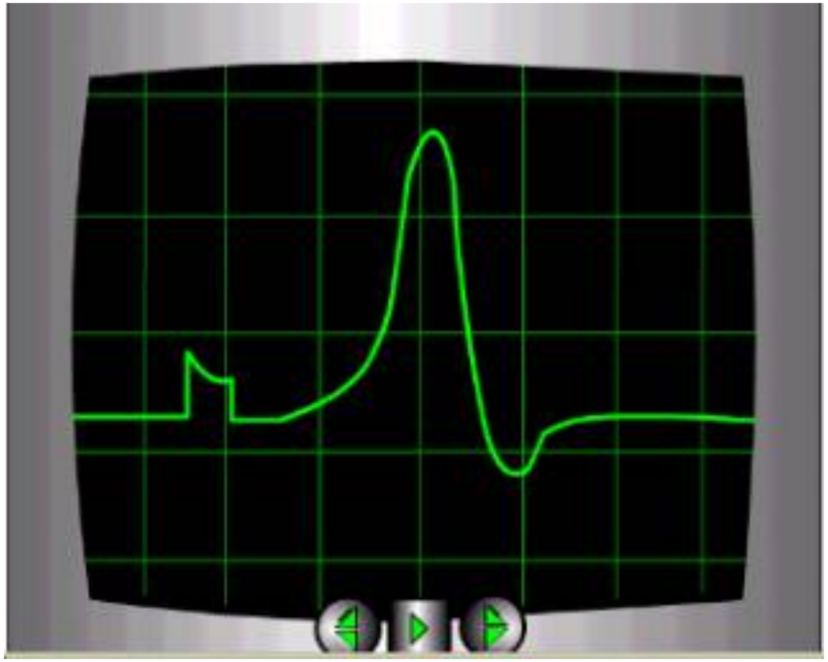
O Potencial de Ação

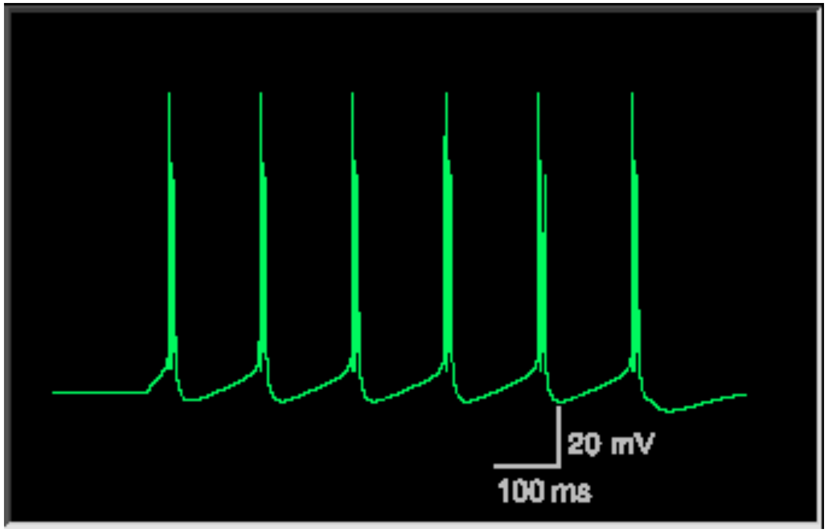
- Sempre que o neurônio recebe um sinal o seu potencial de repouso sofre pequenas alterações
  - Despolarização (sinal excitatório)
  - Hiperpolarização (sinal inibitório)
- O potencial retorna ao repouso logo após a oscilação
  - circuito RC

O Potencial de Ação

- Quando o potencial do neurônio sofre uma despolarização ultrapassando um determinado limiar um Potencial de Ação é gerado
  - Efeito tudo ou nada
  - Sinais com amplitudes constantes
- São utilizados pelo cérebro para receber, analisar e transmitir informação (Kandel, 1997)

O Potencial de Ação





Modelagem Matemática

Neurônios Artificiais

O Neurônio Matemático

- No início da década de 40, alguns pesquisadores começaram a desenvolver modelos matemáticos para descrever o comportamento dos neurônios.
  - Neurônio MCP ("Reproduzir")
  - O Modelo Hodgkin-Huxley ("Entender")

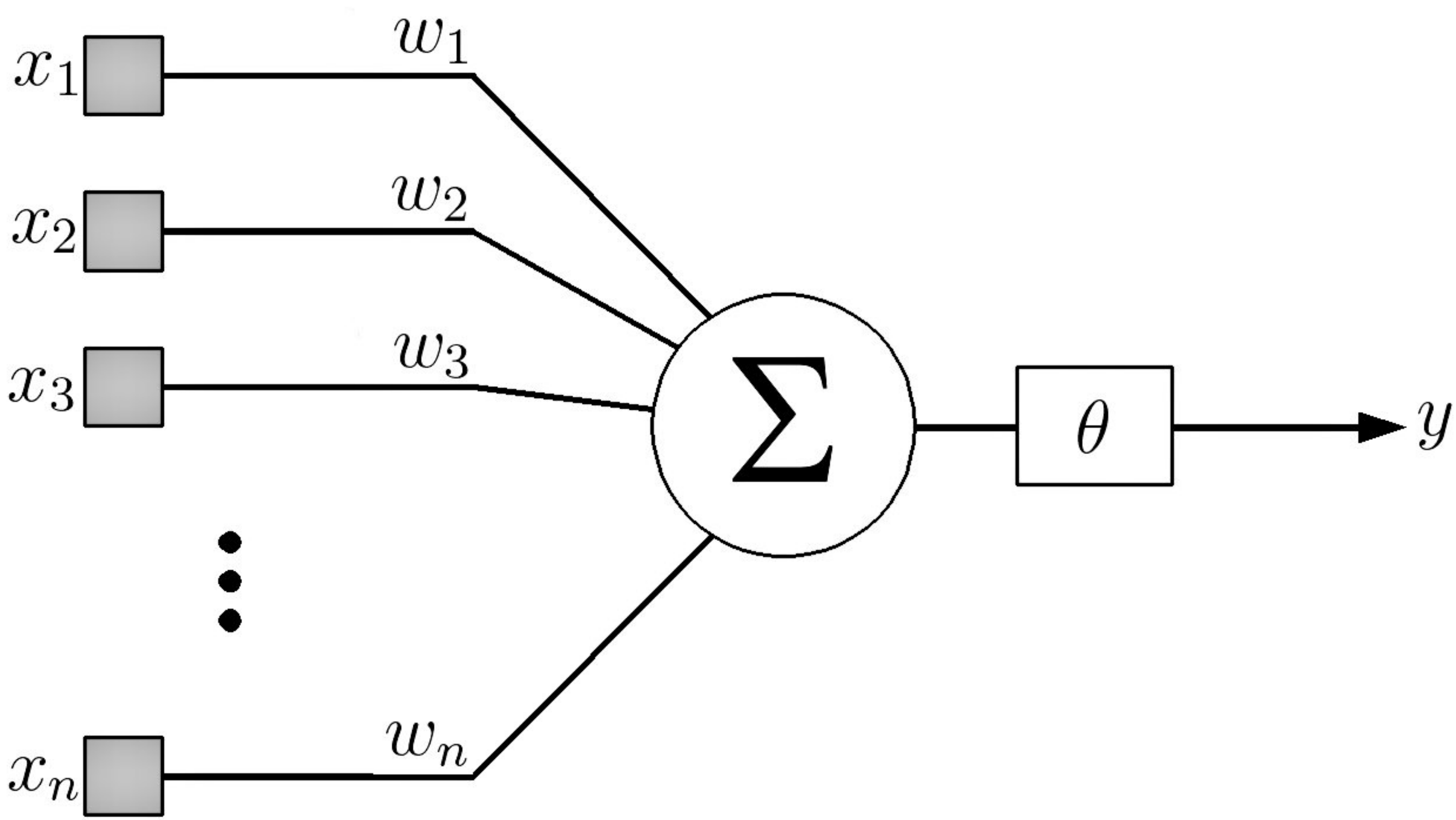
O Neurônio MCP

- Considerando o que se conhecia até o momento (década de 40) os pesquisadores McCulloch e Pitts propuseram o primeiro modelo matemático para um neurônio artificial
- Pode ser visto como uma simplificação do que já havia sido descoberto a respeito do neurônio biológico

O Neurônio MCP

- O Nó MCP é composto por:
  - Diversas entradas (dendritos)
  - Ponderadas por pesos (comportamento das sinapses)
  - E uma saída (axônio) que representa quando o neurônio está ativo ou não
  - Saída binária: ou está disparando potenciais de ação ou está em repouso

O Neurônio MCP



O Modelo Hodgkin-Huxley

- Desenvolvido quase em paralelo ao nó MCP
- Modelo matemático que descreve fielmente o comportamento eletrofisiológico do neurônio biológico
- Enfoque fisiológico e não computacional (potencial de ação)
- Formado por algumas equações diferenciais e muitos parâmetros

O Modelo Hodgkin-Huxley

- Um dos mais importantes modelos utilizados em simulações em Neurociência Computacional (Izhikevich, 2004)
- Autores foram contemplados com o premio **Nobel** em fisiologia (1963) pelo desenvolvimento deste modelo
- Diversas variações
  - Modelos mais simples e eficientes
  - Comportamento limitado

Neurônios Matemáticos

Alguns Modelos

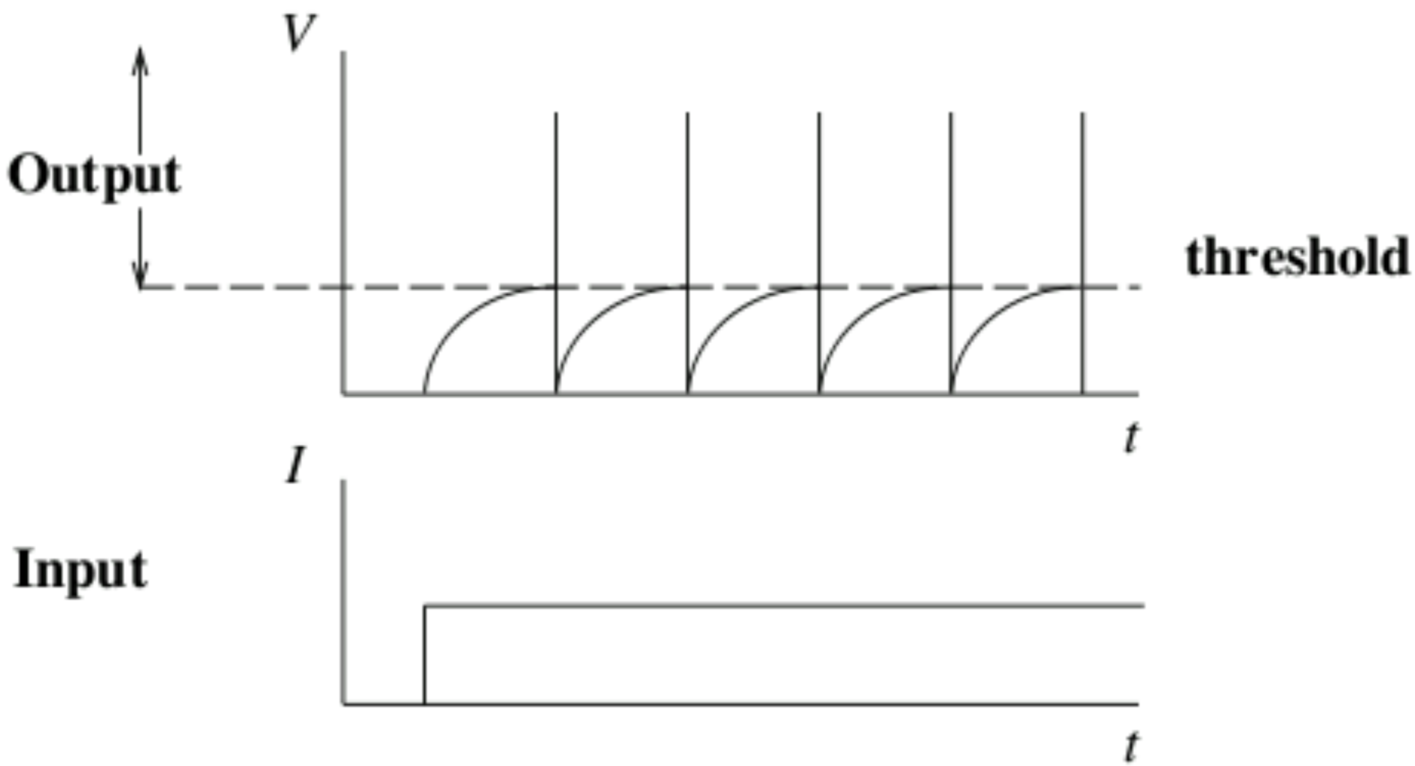
Modelo Integra e Dispara

- Modelo bastante simples
- Utiliza uma abordagem algoritmica para disparar os potenciais de ação

$$\frac{dV}{dt} = I + a - bV$$

  - V define o potencial da membrana
  - *I* define a corrente de entrada (estímulo externo)
  - *a* e *b* são parâmetros do modelo
- **Se** (V>=Limiar) **então** V=c

Modelo Integra e Dispara



Modelo FitzHugh–Nagumo

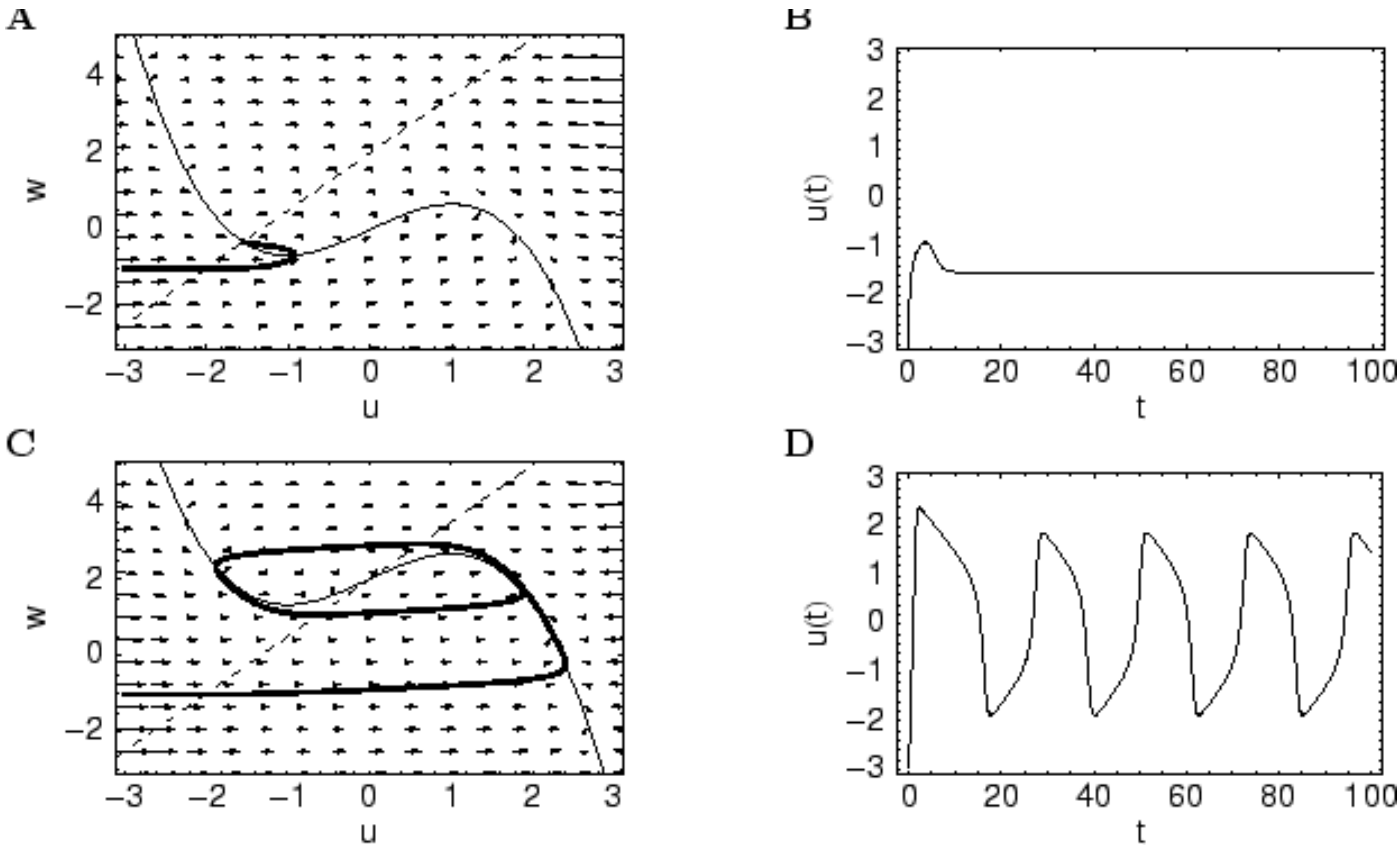
- Consiste numa simplificação bidimensional do modelo Hodgkin-Huxley

$$\frac{du}{dt} = u - \frac{1}{3}u^3 - w + I$$

$$\frac{dw}{dt} = \varepsilon(a + bu - w)$$

- Onde I define o estímulo externo e *a* e *b* são parâmetros do modelo

Modelo FitzHugh–Nagumo



Modelo van der Pol (Relaxamento)

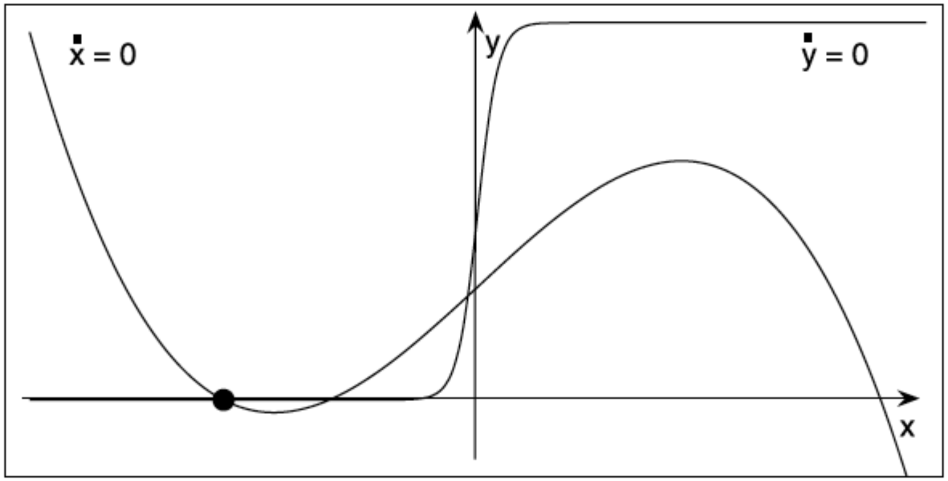
- O oscilador de relaxamento é definido como um laço de realimentação entre uma variável excitatória (*x*) e uma variável inibitória (*y*)

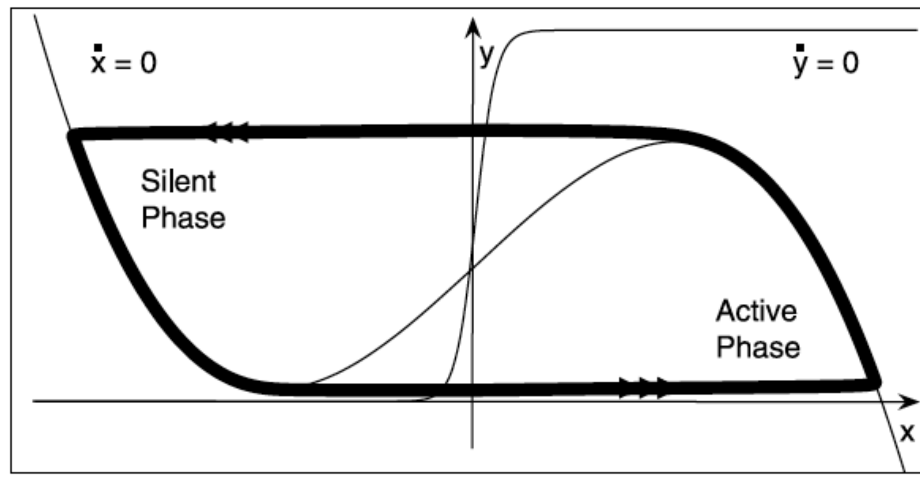
$$\frac{dx}{dt} = 3x - x^3 + 2 - y + I + \rho$$

$$\frac{dy}{dt} = \varepsilon\left(\alpha\left(1 + \tanh\left(x / \beta\right)\right) - y\right)$$

- *I* representa o estímulo externo, ε é um número positivo pequeno, α e β são parâmetros do modelo; ρ representa um sinal de ruído

Modelo van der Pol (Relaxamento)





Neurônios em Rede

- Considere o oscilador de relaxamento:

$$\frac{dx}{dt} = 3x - x^3 + 2 - y + I + \rho$$

$$\frac{dy}{dt} = \varepsilon\left(\alpha\left(1 + \tanh\left(x / \beta\right)\right) - y\right)$$

- Podemos definir uma rede com vários neurônios
  - Conexões entre neurônios
  - Se um neurônio A está conectado a um neurônio B, quando A dispara, a fase do neurônio B é afetada pelo pulso proveniente de A.
  - Neurônios acoplados podem sincronizar

Acoplamento

- Diversas formas de acoplamento podem ser definidas, ex:

$$S_i = \sum_{k \in N(i)} w_{ik} H\left(x_k - \theta\right)$$

- w_{ik} define a força de acoplamento
- $N(i)$ define a vizinhança do neurônio i
- $H()$ Heaviside function

  $H(v) = 1$ se $v \geq 0$ e $H(v) = 0$, caso contrário
- θ define um limiar de corte

Modelo com acoplamento

- Oscilador de Relaxamento (van der Pol)

$$\frac{dx_i}{dt} = 3x_i - x_i^3 + 2 - y_i + I + \rho + S_i$$

$$\frac{dy_i}{dt} = \varepsilon\left(\alpha\left(1 + \tanh\left(x_i / \beta\right)\right) - y_i\right)$$

- Acoplamento:

$$S_i = \sum_{k \in N(i)} w_{ik} H\left(x_k - \theta\right)$$

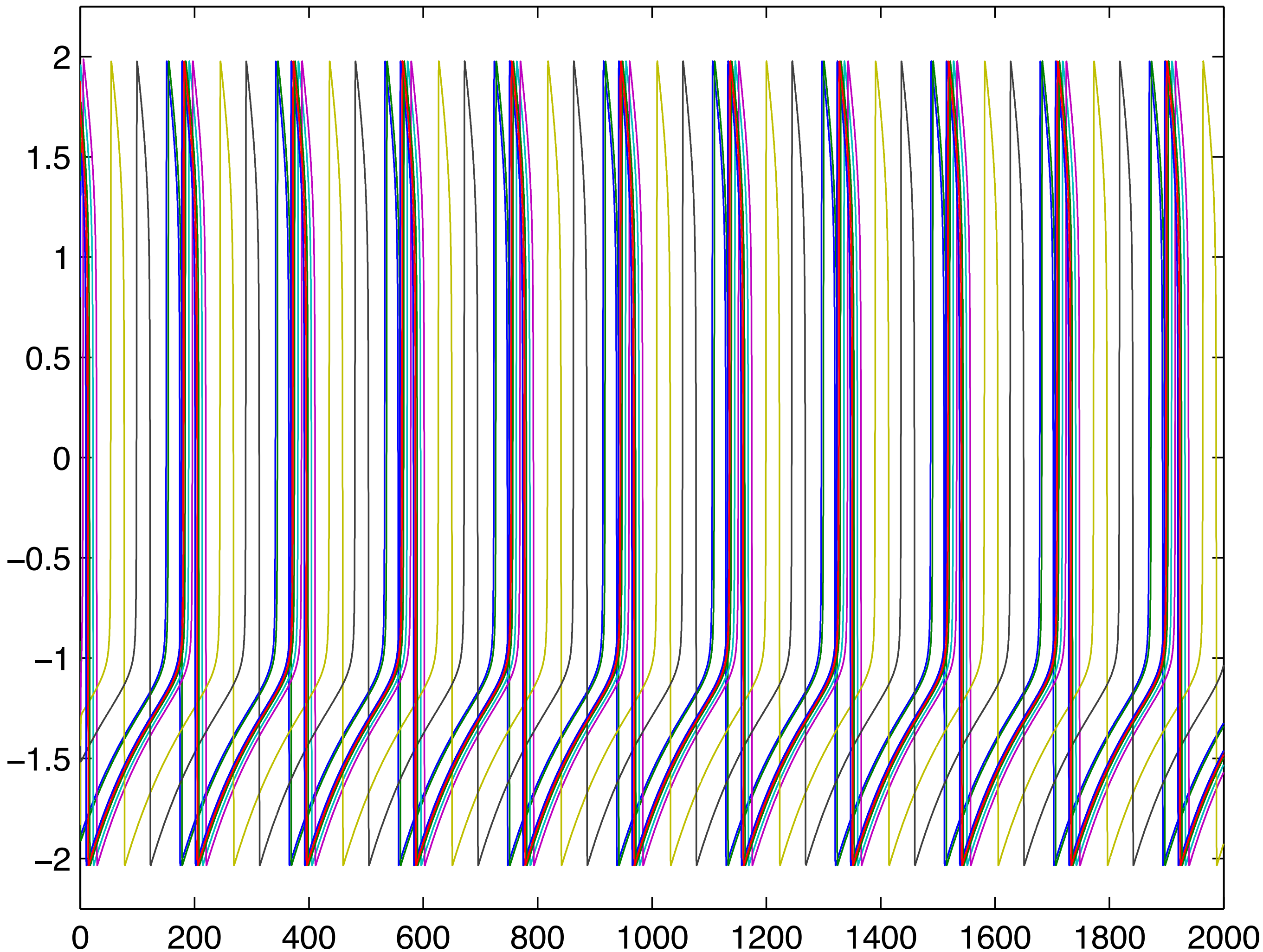
Projeto 3

- Estudar o efeito da estrutura da rede na sincronização de osciladores de relaxamento
  1. Tempo para atingir a sincronização em cada topologia (regular, aleatória e livre de escala)
  2. Percentual mínimo necessário de neurônios ativos para sincronização
     1. Seleção aleatória
     2. Seleção guiada
  3. Critérios mínimos:
     1. N=500
     2. <K> = 2

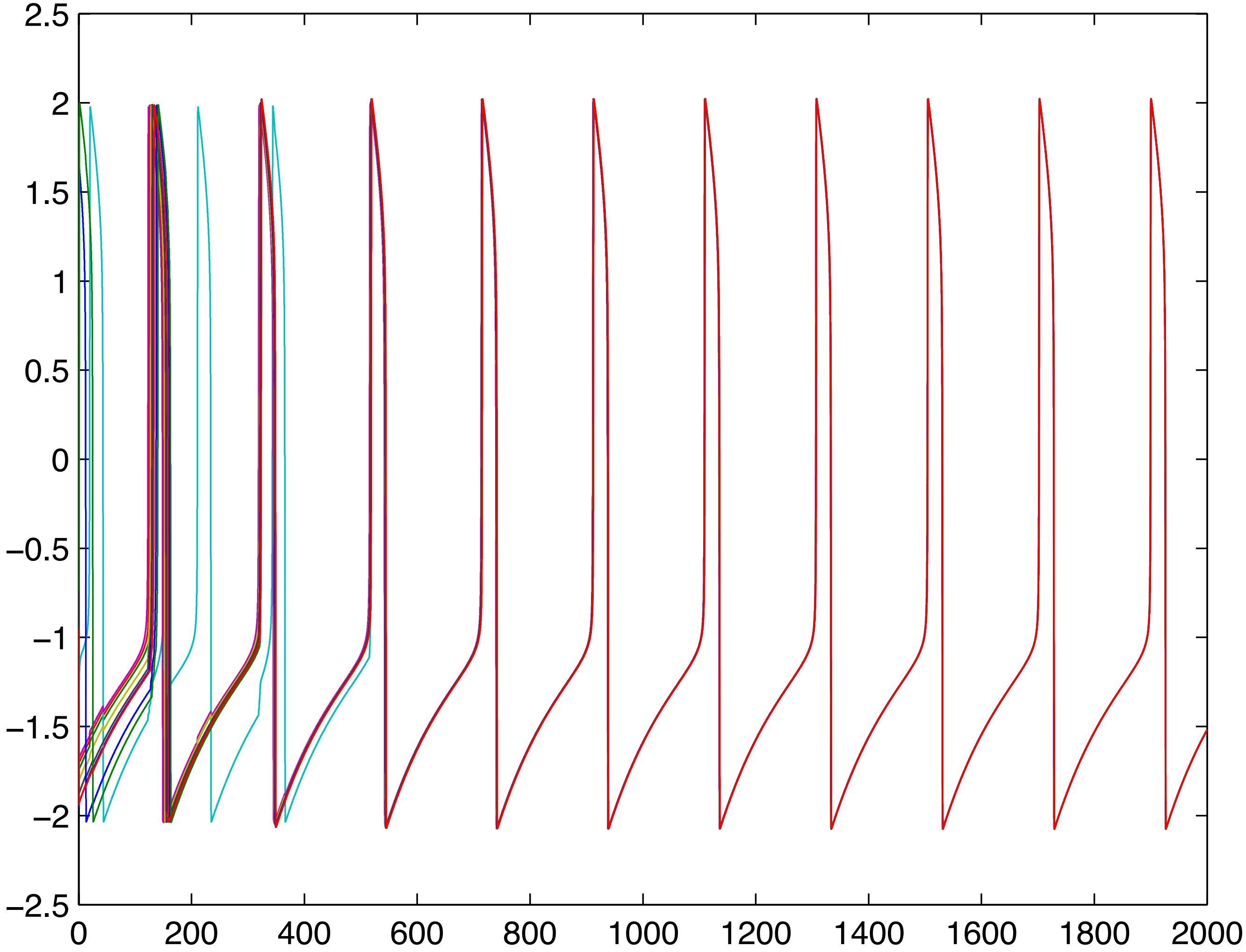
Parâmetros do Modelo

I(ativo) = 0.2 / I(inativo) = -0.02
Acoplamento w_ij = 0.1
Theta = 0.5
Alpha = 6.0
Epsilon = 0.02
Beta = 0.1

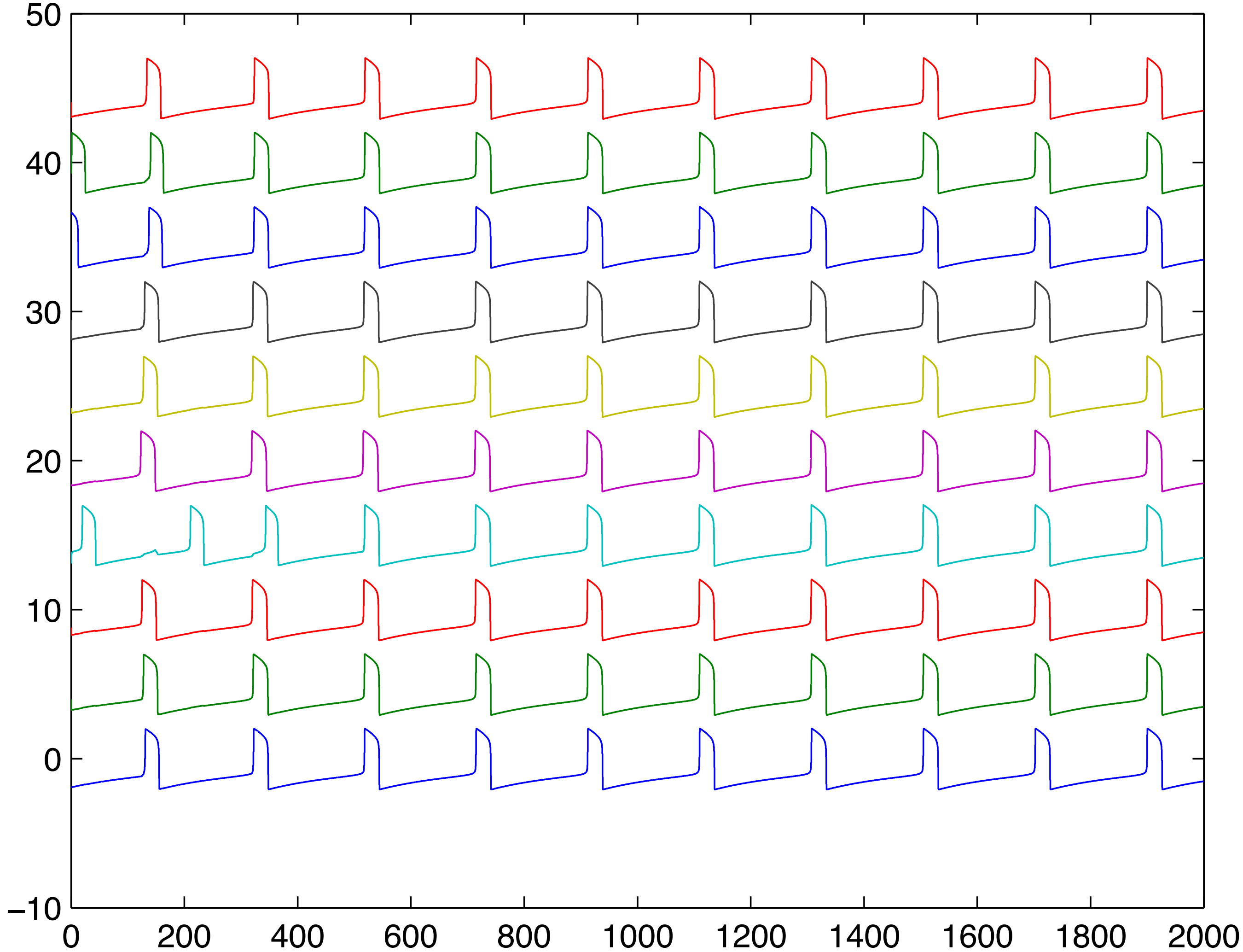
Exemplo I (sem acoplamento)



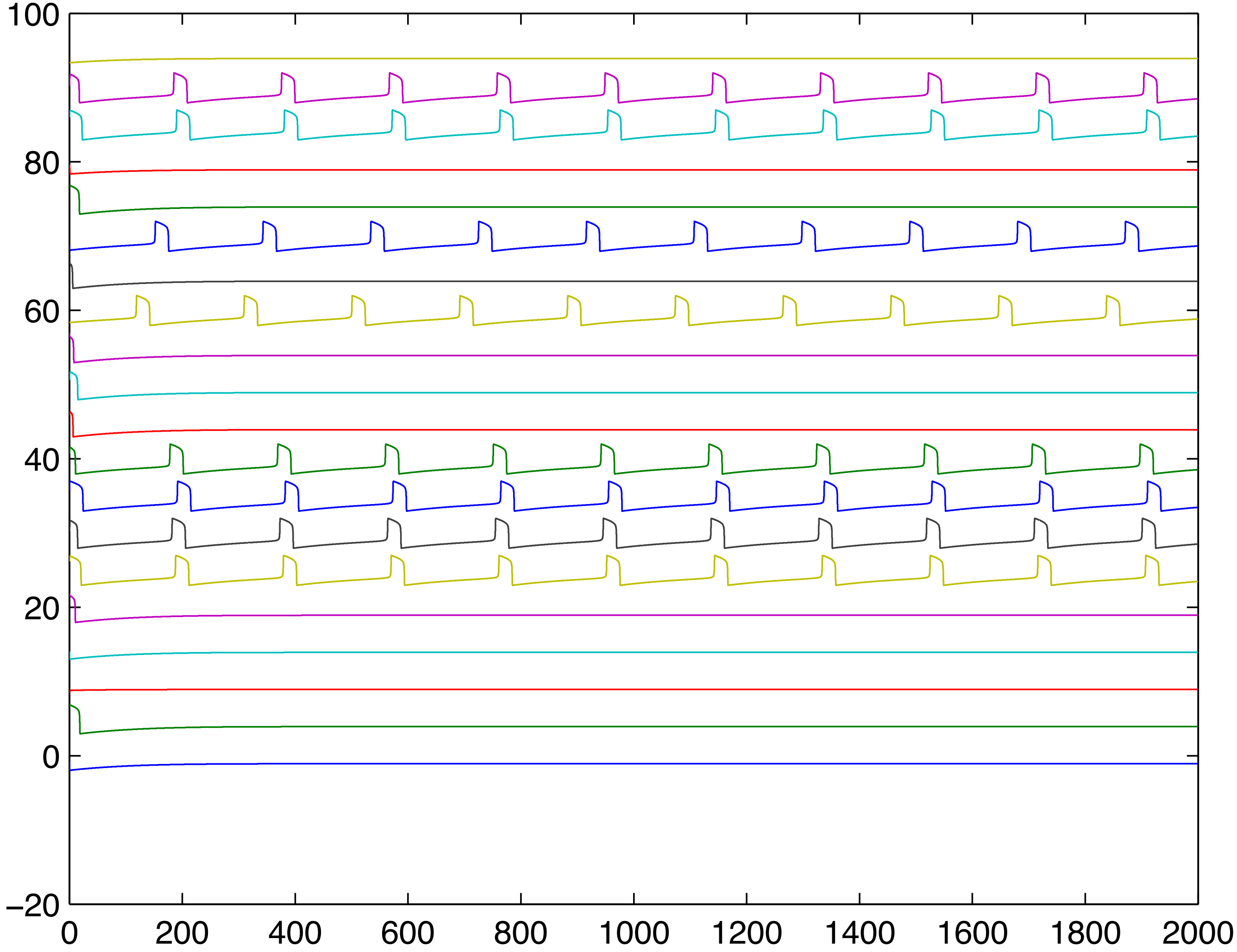
Exemplo II (com acoplamento)



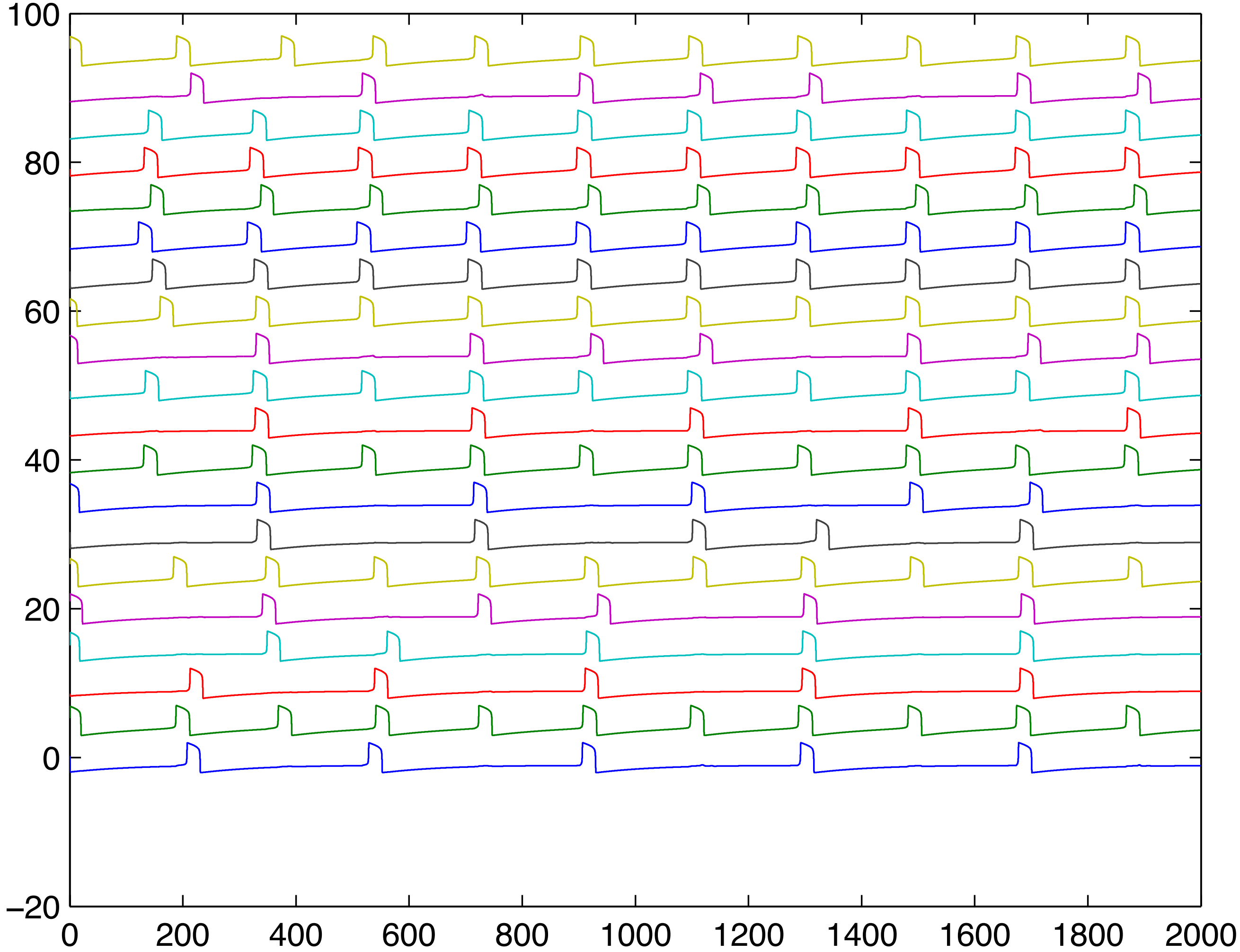
Exemplo II (com acoplamento)



Exemplo III (50% ativos s/ acoplamento)



Exemplo IV (50% ativos c/ acoplamento) Força de acoplamento fraca



Exemplo IV (50% ativos c/ acoplamento) Força de acoplamento forte