



Sección de Electrónica del Estado Sólido

**“EXPERIMENTACIÓN CON REDES  
NEURONALES PULSADAS: EVALUACIÓN DE  
CAPACIDADES COMPUTACIONALES”**

**Tesis que presenta:**

Ing. Guillermo Nieto Hernández

**Asesores:**

Dr. Felipe Gómez Castañeda

Dr. José Antonio Moreno Cadenas

# CONTENIDO

- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS
- MARCO TEÓRICO
- DESARROLLO
- APORTES
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- TRABAJO FUTURO

# INTRODUCCIÓN

- Este proyecto propone un método de análisis para una red neuronal pulsada en sistemas de procesamiento de información temporal, específicamente, reconocimiento de patrones.

# CONTENIDO

- INTRODUCCIÓN
- **OBJETIVOS**
- MARCO TEÓRICO
- DESARROLLO
- APORTES
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- TRABAJO FUTURO

# OBJETIVOS

## GENERAL

- ▶ Desarrollar una red neuronal artificial bioinspirada para su implementación en el procesamiento de información temporal (reconocimiento de patrones).

## ESPECÍFICOS

- ▶ Estudiar las capacidades computacionales de una red neuronal pulsada.
- ▶ Utilizar el modelo biorealista de Izhikevich como base para la simulación de las neuronas en la red.
- ▶ Implementar una arquitectura WTA con sinapsis basadas en conductancia.
- ▶ Implementar un algoritmo de entrenamiento no supervisado basado en STDP.
- ▶ Estudiar el comportamiento estocástico de la capa WTA de la red.
- ▶ Estudiar las aplicaciones de los memristores como elementos de memoria.
- ▶ Comparar los modelos deterministas y los modelos estocásticos de los memristores.

# CONTENIDO

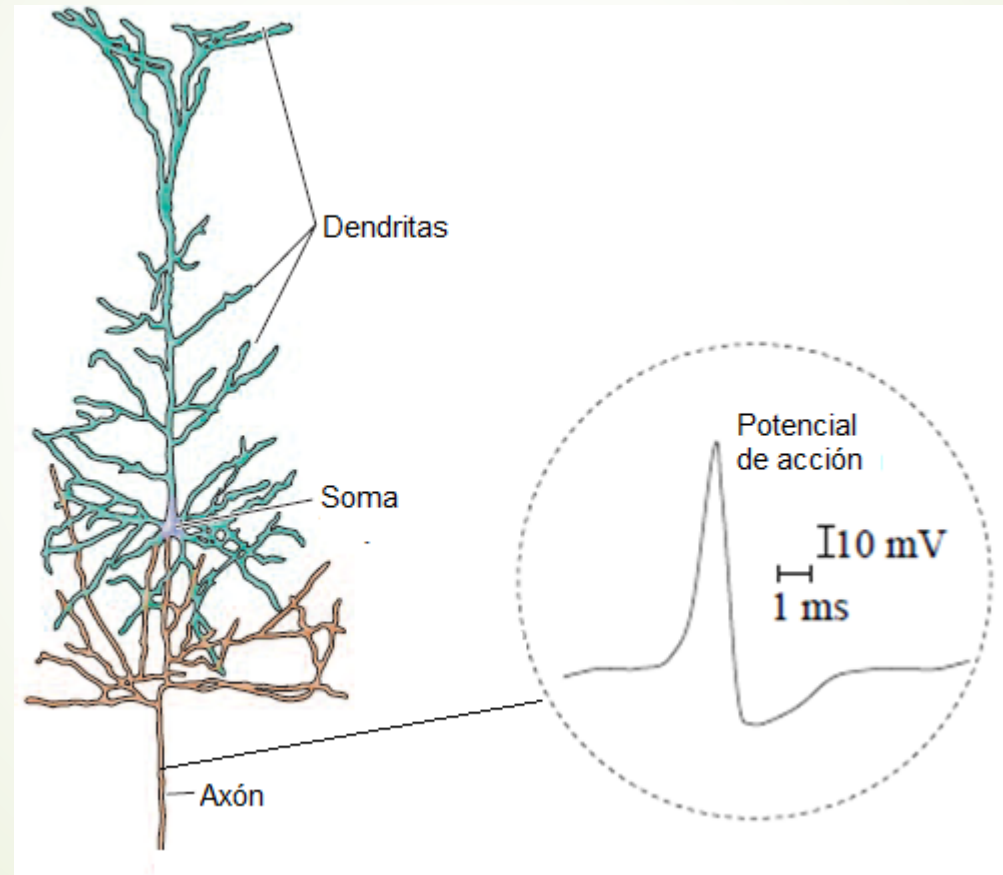
- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS
- **MARCO TEÓRICO**
- DESARROLLO
- APORTES
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- TRABAJO FUTURO

# MARCO TEÓRICO

- ▶ Las bases fundamentales para el desarrollo del proyecto están contenidas en estos cinco conceptos:
  - **Modelo de Izhikevich**
  - **Sinapsis química**
  - **Arquitectura WTA (Winner Takes All)**
  - **Regla de Hebb (Plasticidad de Hebb)**
  - **Memristores**



# NEURONA BIOLÓGICA





# MODELO DE IZHIKEVICH

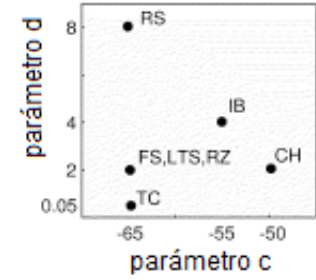
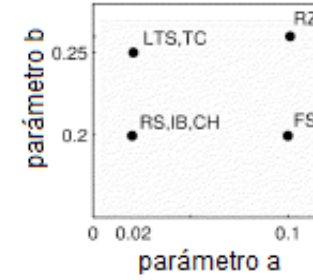
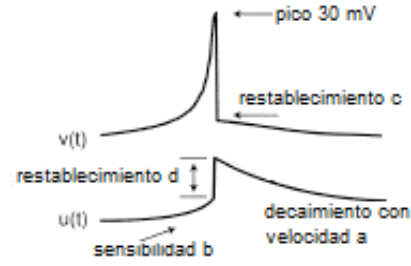
- Es un modelo matemático bidimensional propuesto por Eugene Izhikevich en 2003.
- Es un modelo biorealista y computacionalmente eficiente.
- Reproduce muchas familias de neuronas (corticales, tálamocorticales, interneuronas, etc.) con sólo variar 4 parámetros.

# MODELO DE IZHIKEVICH

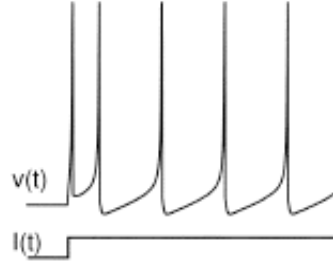
$$v' = 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I$$

$$u' = a(bv - u)$$

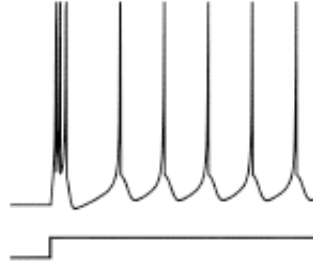
if  $v = 30$  mV,  
then  $v \leftarrow c$ ,  $u \leftarrow u + d$



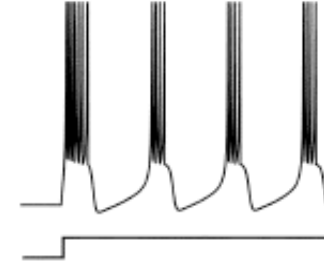
regular spiking (RS)



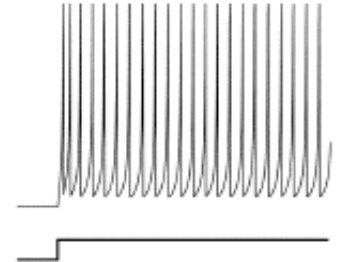
intrinsically bursting (IB)



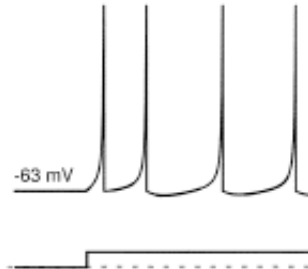
chattering (CH)



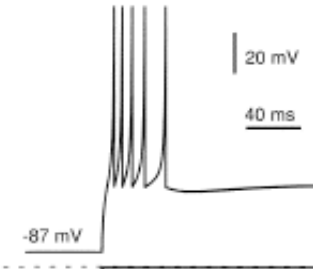
fast spiking (FS)



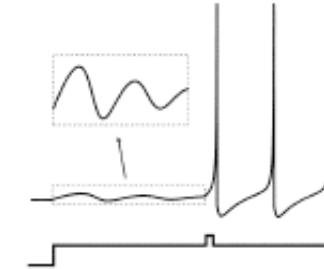
thalamo-cortical (TC)



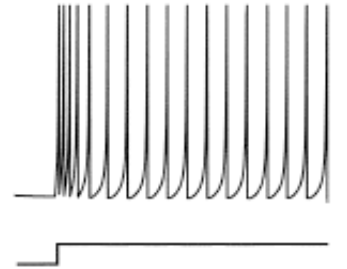
thalamo-cortical (TC)



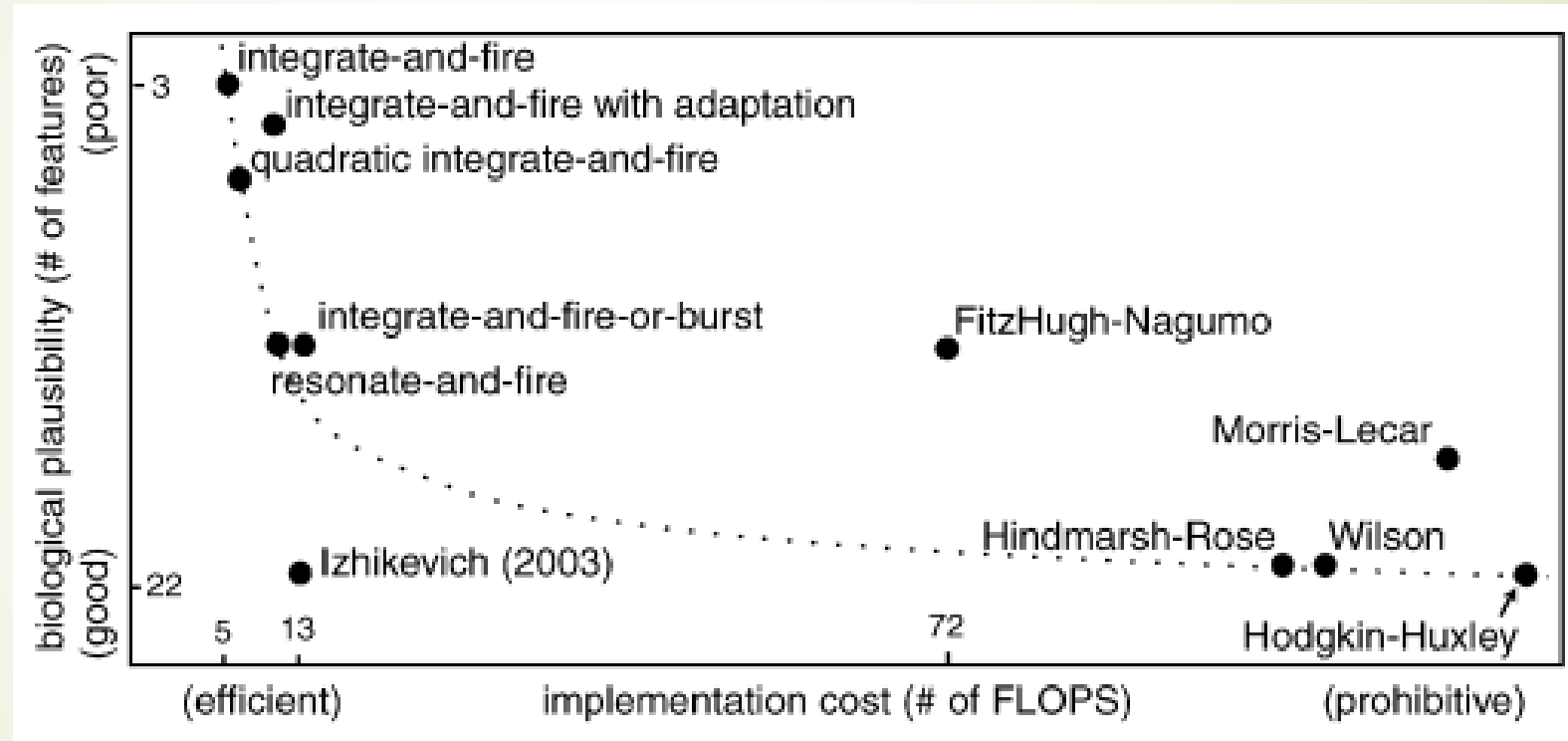
resonator (RZ)



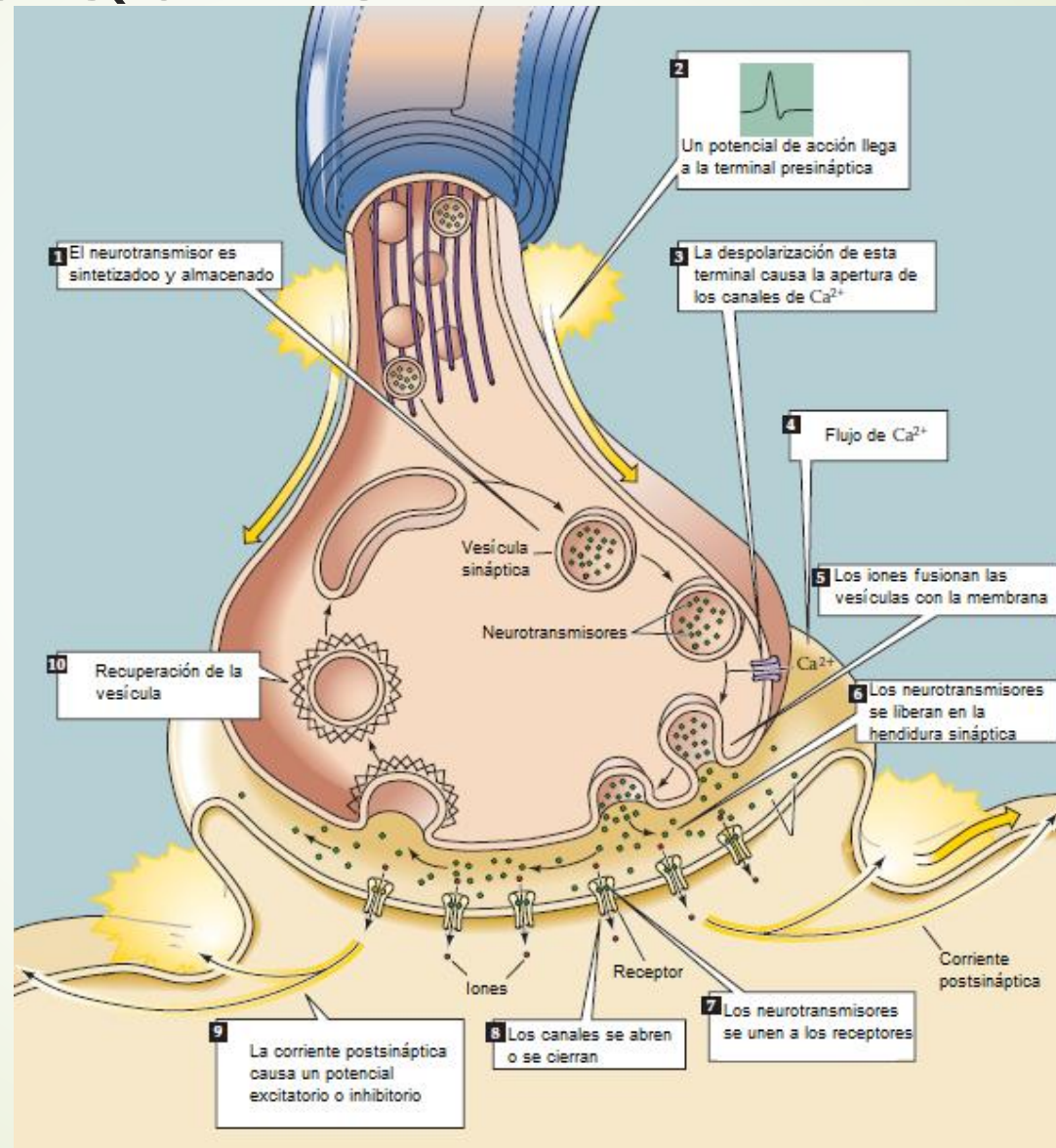
low-threshold spiking (LTS)



# MODELO DE IZHIVKIVICH



# SINAPSIS QUÍMICA

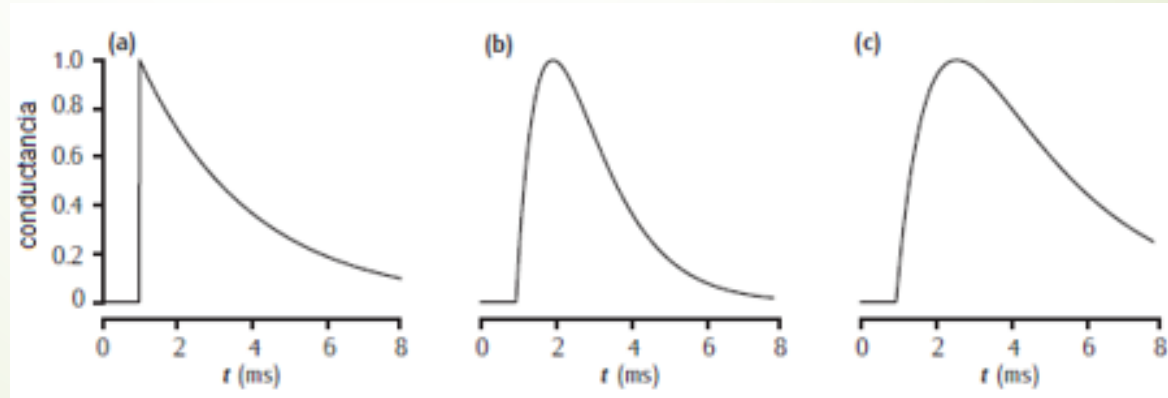


# SINAPSIS QUÍMICA

$$g_{syn}(t) = \bar{g}_{syn} \exp\left(-\frac{t - t_s}{\tau}\right)$$

$$g_{syn}(t) = \bar{g}_{syn} \frac{t - t_s}{\tau} \exp\left(-\frac{t - t_s}{\tau}\right)$$

$$g_{syn}(t) = \bar{g}_{syn} \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \left( \exp\left(-\frac{t - t_s}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t - t_s}{\tau_2}\right) \right)$$

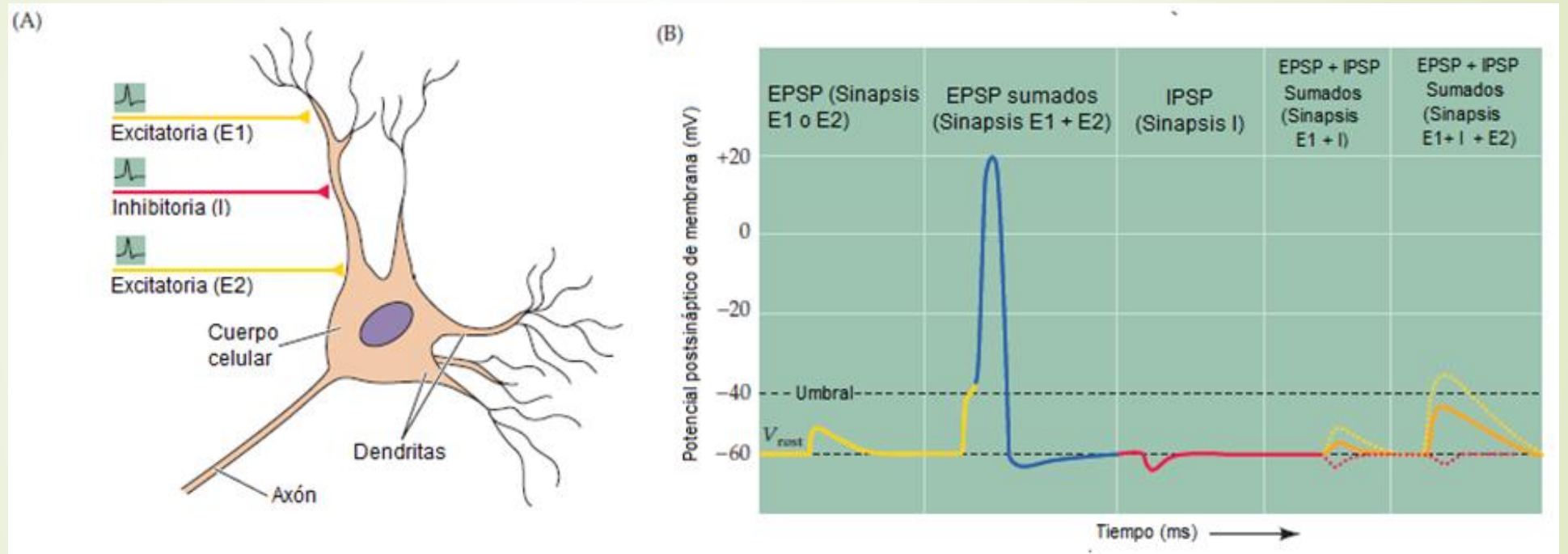




# SINAPSIS QUÍMICA

- A mayor cantidad de potenciales postsinápticos aumentan la probabilidad de generar un potencial de acción (EPSP).
- Ciertos tipos de sinapsis que disminuyen la probabilidad de generar un potencial de acción (IPSP).
- La inhibición y la excitación hacen referencia a la forma en cómo se comportan los neurotransmisores (cerrar o abrir los canales iónicos).
- Receptores inhibitorios (de glutamato): ácido alfa-amino-3-hidroxi-5-metil-4-isoxazolpropiónico (AMPA), N-metil-D-aspartato (NMDA).
- Neurotransmisores excitatorios (GABA): GABAA y GABAB (ácido gamma amino butírico)

# SINAPSIS QUÍMICA

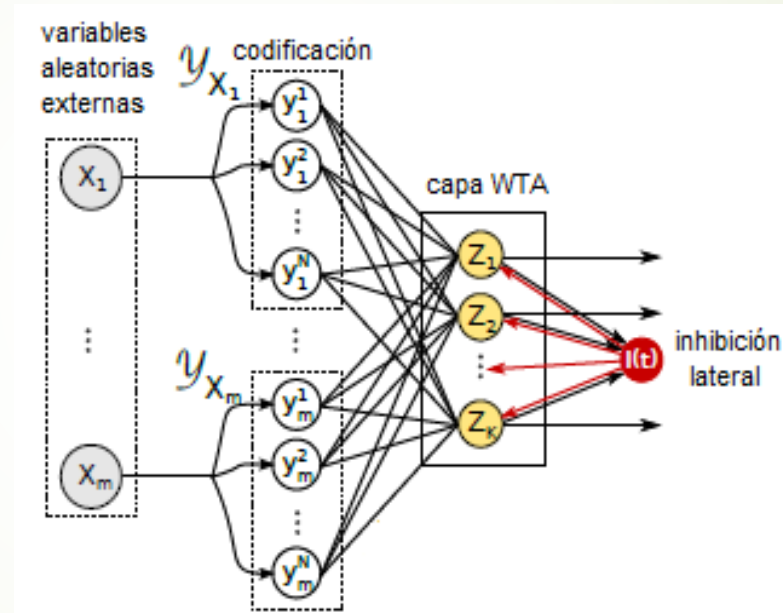




# ARQUITECTURA DE LA RED, WTA

- Un mecanismo WTA es un proceso que determina la identidad, y a veces la amplitud de su entrada más grande.
- *La inhibición lateral*, se define como la capacidad de una neurona excitada de reducir la actividad de las neuronas vecinas.
- La actividad en la capa WTA presenta un comportamiento totalmente estocástico.

# ARQUITECTURA DE LA RED, WTA



# ARQUITECTURA DE LA RED, WTA

$$P(Z|Y; \mathbf{w}) = \frac{P(Z) \cdot P(Y|Z)}{\sum_Z P(Z) \cdot P(Y|Z)} = \frac{\exp(\sum_k Z_k b_k) \cdot \exp(\sum_{i,k} Z_k w_{ik} y(t - t_i))}{\sum_k \exp(b_k + \sum_i w_{ik} y(t - t_i))}$$

b: es un parámetro de excitabilidad intrínseca de la neurona (mV).

w: son los pesos sinápticos.

y(t): son las formas temporales de los pulsos.

Z: vale 1 para la neurona que está pulsando y 0 para las demás.

# Plasticidad Sináptica

- ▶ El concepto de plasticidad sináptica fue propuesto por primera vez como un mecanismo de aprendizaje y memoria por Donald Olding Hebb en 1949.
- ▶ La plasticidad sináptica es la habilidad de las sinapsis para fortalecerse o debilitarse con el tiempo, en respuesta a aumentos o disminuciones en su actividad.
- ▶ La regla de Hebb o regla *Hebbiana*, postula que cuando cierta neurona impulsa la actividad de otra neurona, la conexión entre ambas neuronas es potenciada.
- ▶ También debe considerarse la depresión, ya que evitan que todas las sinapsis se saturen a sus valores máximos y perder así su selectividad

# Spike-Timing Dependent Plasticity

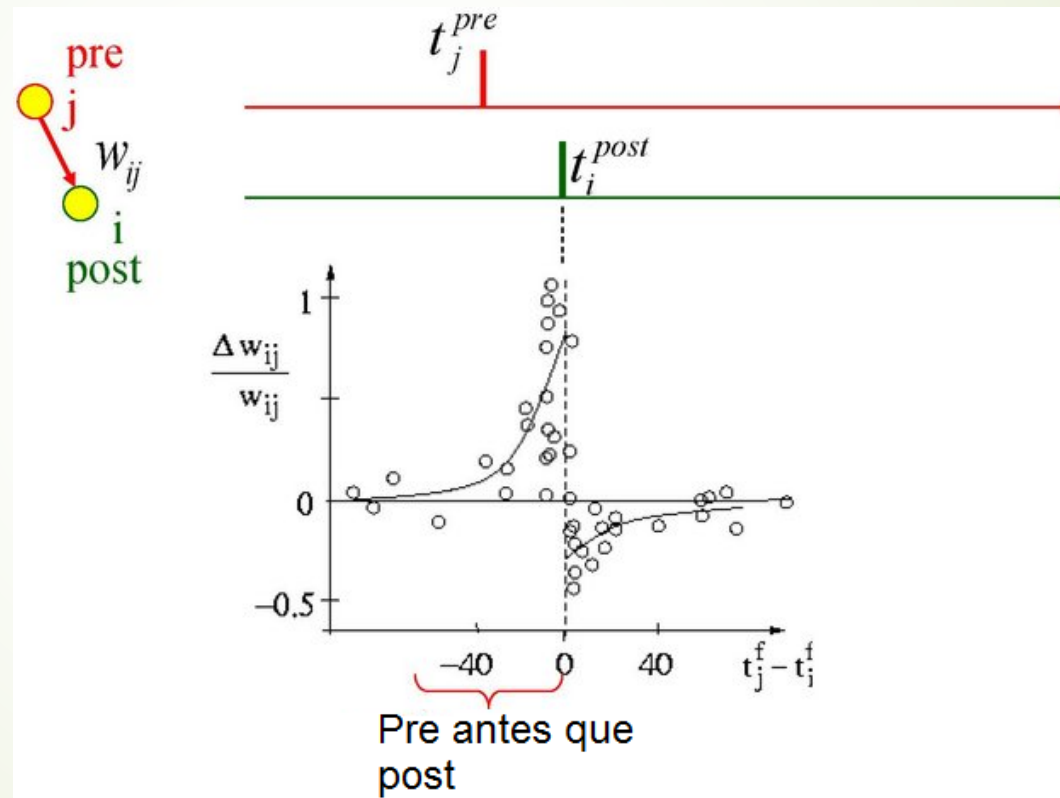
- ▶ STDP es una forma temporalmente asimétrica del aprendizaje hebbiano inducida por estrechas correlaciones temporales entre los pulsos de neuronas pre y postsinápticas.
- ▶ El modelo básico expresa que el cambio del peso  $\Delta w_j$  de una sinapsis desde una neurona presináptica  $j$  depende del tiempo relativo entre la llega del pulso presináptico y los pulsos postsinápticos.

$$\Delta w_j = \sum_{f=1}^N \sum_{n=1}^N W(t_i^n - t_j^f)$$

$$W(x) = A_+ \exp\left(-\frac{x}{\tau_+}\right) \text{ para } x > 0$$

$$W(x) = -A_- \exp\left(\frac{x}{\tau_-}\right) \text{ para } x < 0$$

# Spike-Timing Dependent Plasticity





# Memristores

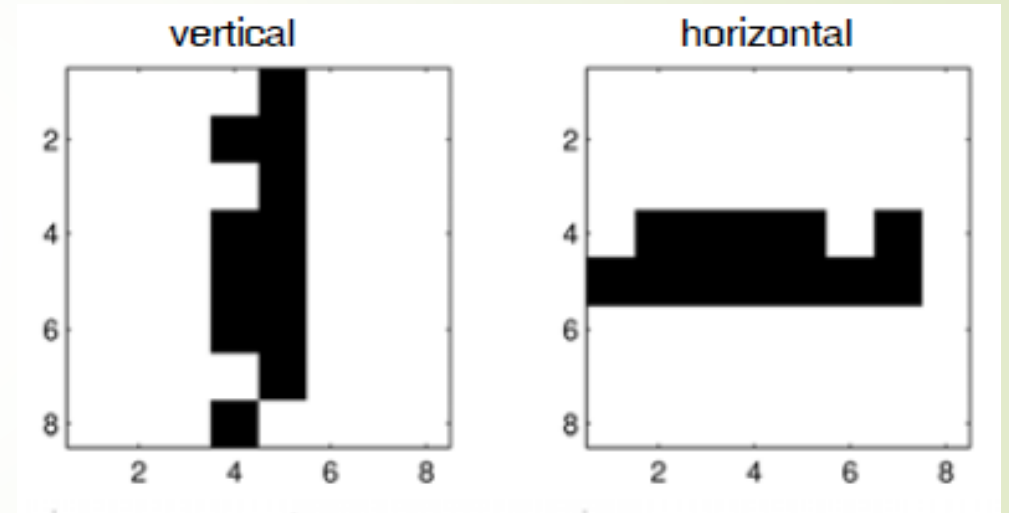
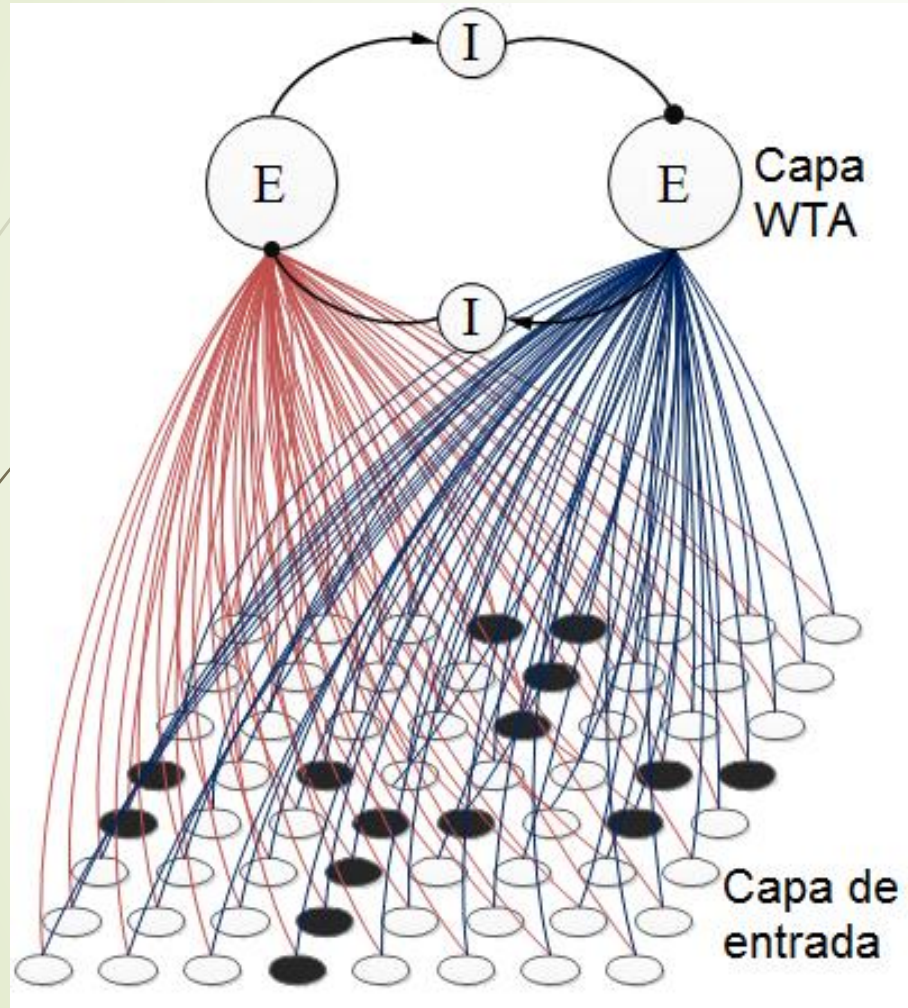
- ▶ Un *memristor*, es un elemento eléctrico pasivo de dos terminales cuyo valor resistivo cambia en función del voltaje o la corriente en sus terminales y conserva ese valor aún cuando el estímulo ha sido suprimido.
- ▶ La mayoría de los modelos desarrollados para los memristores tienen un enfoque determinista, o sea que establecen valores nominales o promedios “esperados”.
- ▶ Los modelos usados son modelos basados en umbral.
- ▶ Los tres modelos estudiados son: modelo bipolar de Biolek, modelo analítico de Yakopcic y el modelo bipolar no lineal de Pickett.



# CONTENIDO

- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS
- MARCO TEÓRICO
- **DESARROLLO**
- APORTES
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- TRABAJO FUTURO

## DESARROLLO



# DESARROLLO

Pesos sinápticos

$$c_{ij} = r^2 / 64,$$

$$[0, 0.5]$$

$$c_{WTA} = 1$$

Inhibitorias GABA

$$(a, b) = (0.02, 0.25)$$

$$(c, d) = (-65, 2)$$

Excitatorias de entrada integradora

$$(a, b) = (0.02, -0.1)$$

$$(c, d) = (-55, 6)$$

Pulsación normal

$$\dot{v} = 0.04v^2 + 5v + 140 - u - I_{syn}$$

$$\dot{u} = a(bv - u),$$

Neurona integradora

$$\dot{v} = 0.04v^2 + 4.1v + 108 - u - I_{syn}$$

$$\dot{u} = a(bv - u).$$

# DESARROLLO

Corriente Sináptica Aproximada

$$\begin{aligned}
 I_{syn} = & g_{AMPA} (v - 0) \\
 & + g_{NMDA} \frac{[(v + 80) / 60]^2}{1 + [(v + 80) / 60]^2} (v - 0) \\
 & + g_{GABA_A} (v + 70) \\
 & + g_{GABA_B} (v + 90),
 \end{aligned}$$

Cinética de primer orden

$$\dot{g}_k = -\frac{g_k}{\tau_k}$$

$$g_k \leftarrow g_k + c_{ij}$$

Valores para la función STDP

$$A_+ = 0.005$$

$$A_- = 0.009$$

$$\tau_+ = 15ms$$

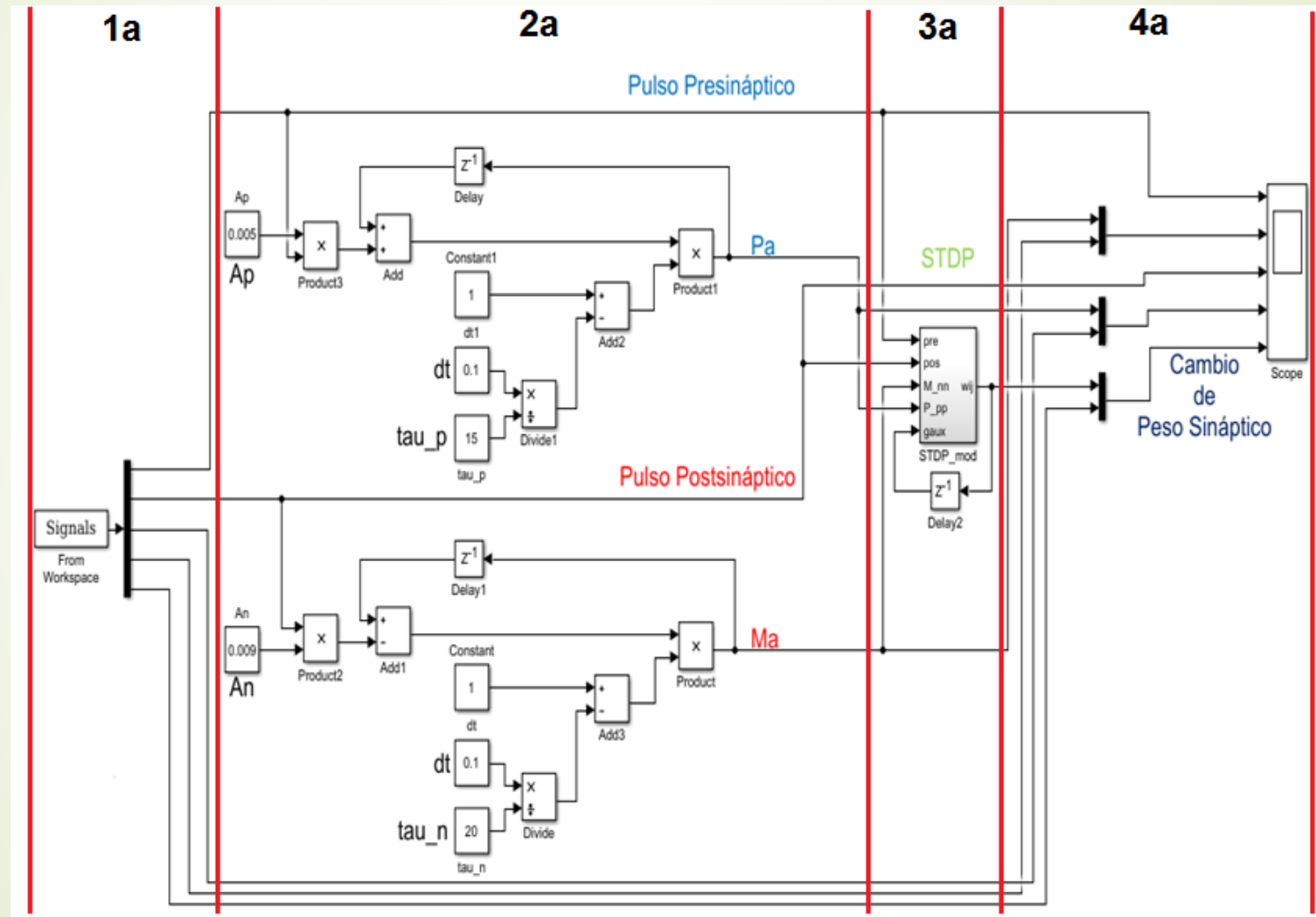
$$\tau_- = 20ms$$

$$A_+ \tau_+ \leq A_- \tau_-$$

# CONTENIDO

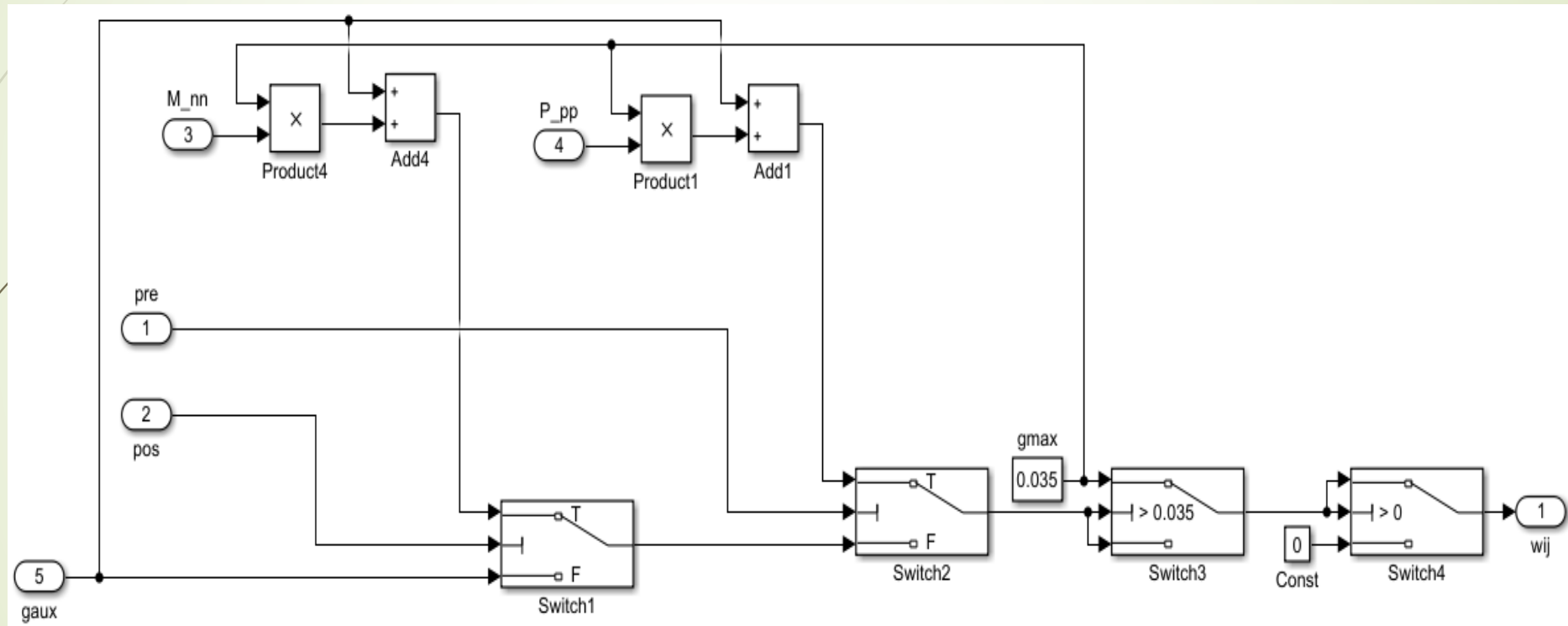
- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS
- MARCO TEÓRICO
- DESARROLLO
- **APORTES**
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- TRABAJO FUTURO

# APORTES





## APORTES

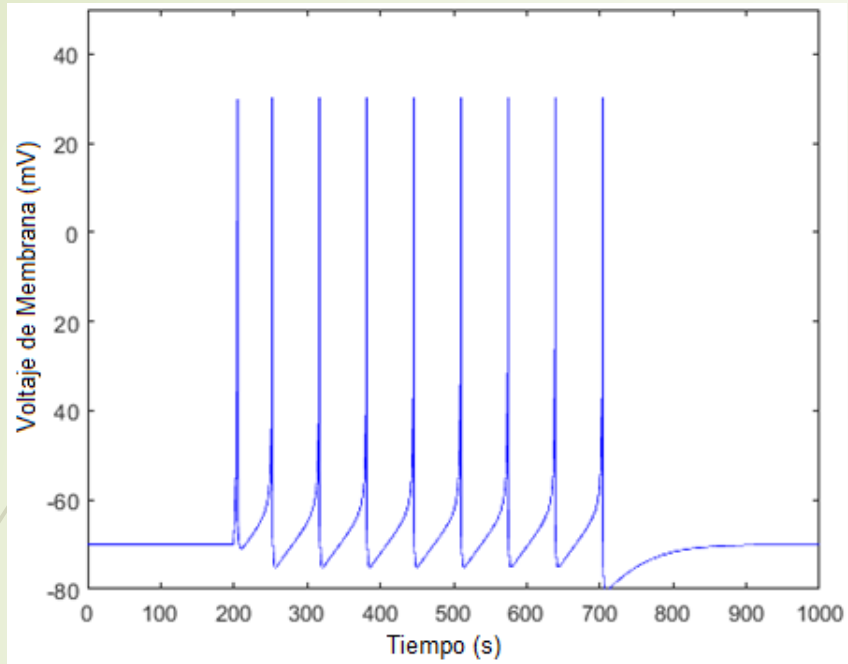
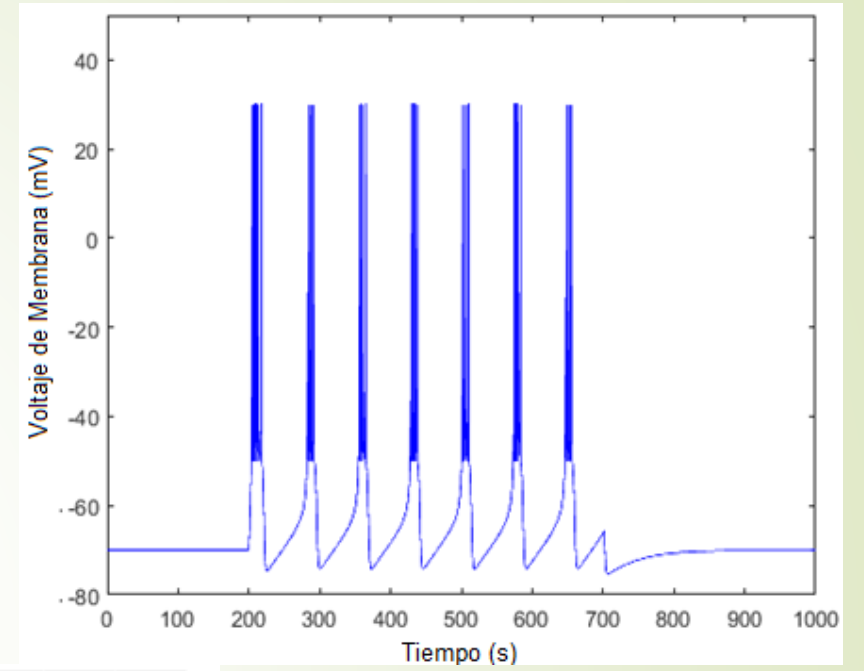
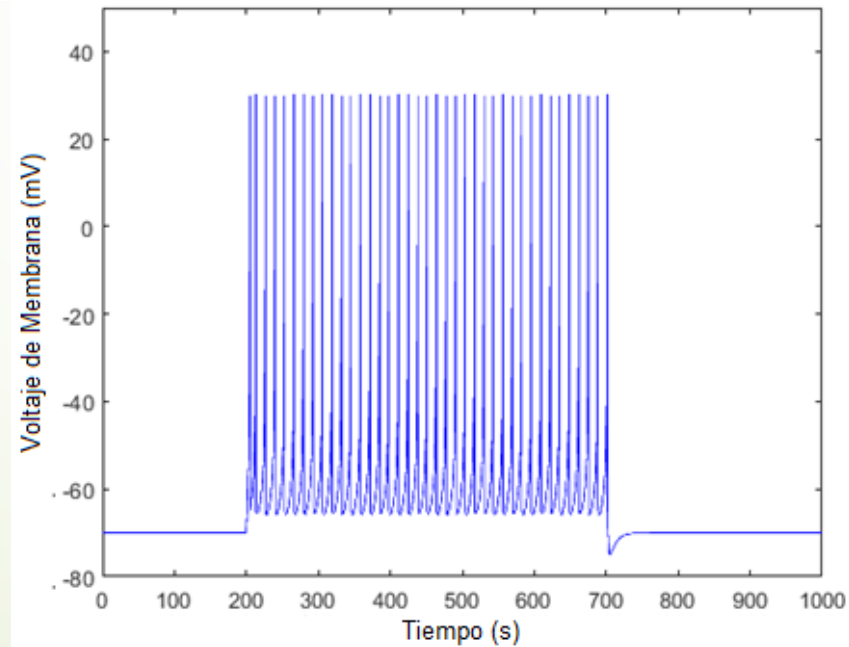




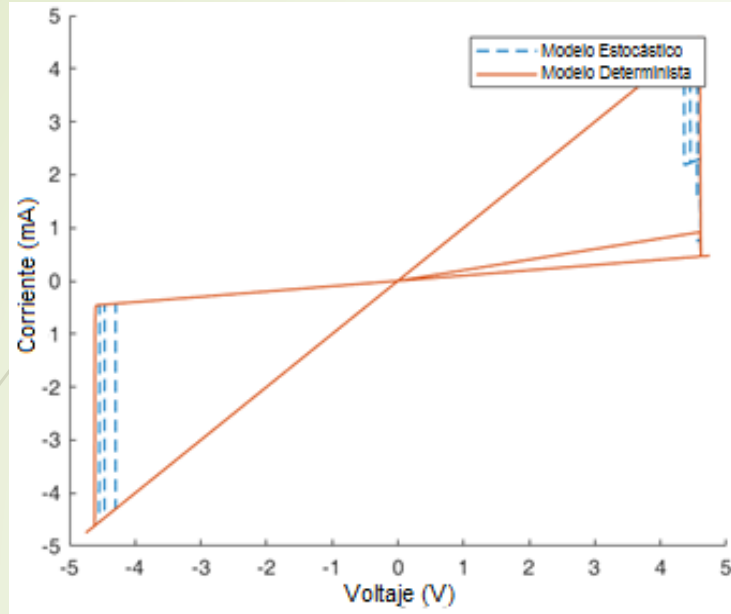
# CONTENIDO

- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS
- MARCO TEÓRICO
- DESARROLLO
- APORTES
- **RESULTADOS**
- CONCLUSIONES
- TRABAJO FUTURO

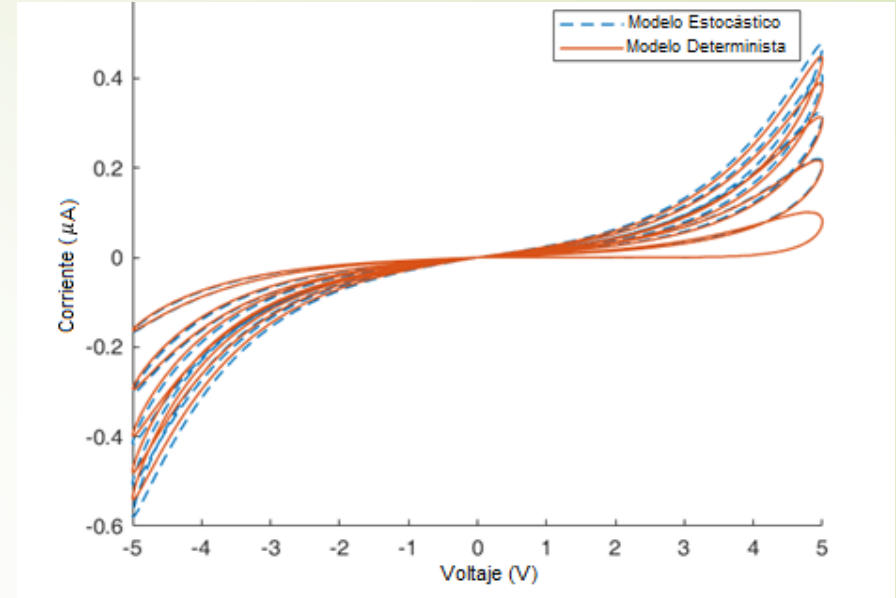
# RESULTADOS

**Pulsación Regular****Chattering****Pulsación Rápida**

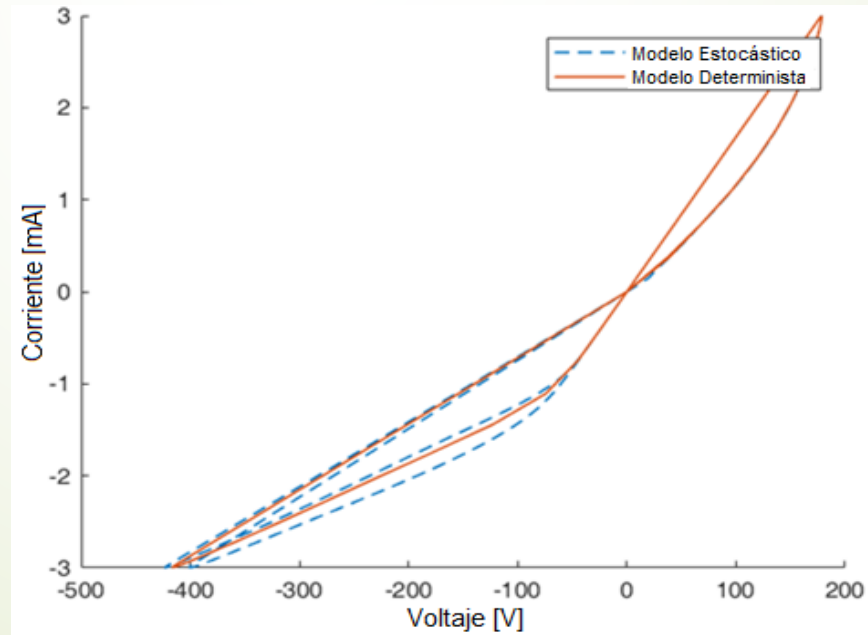
## Bialek

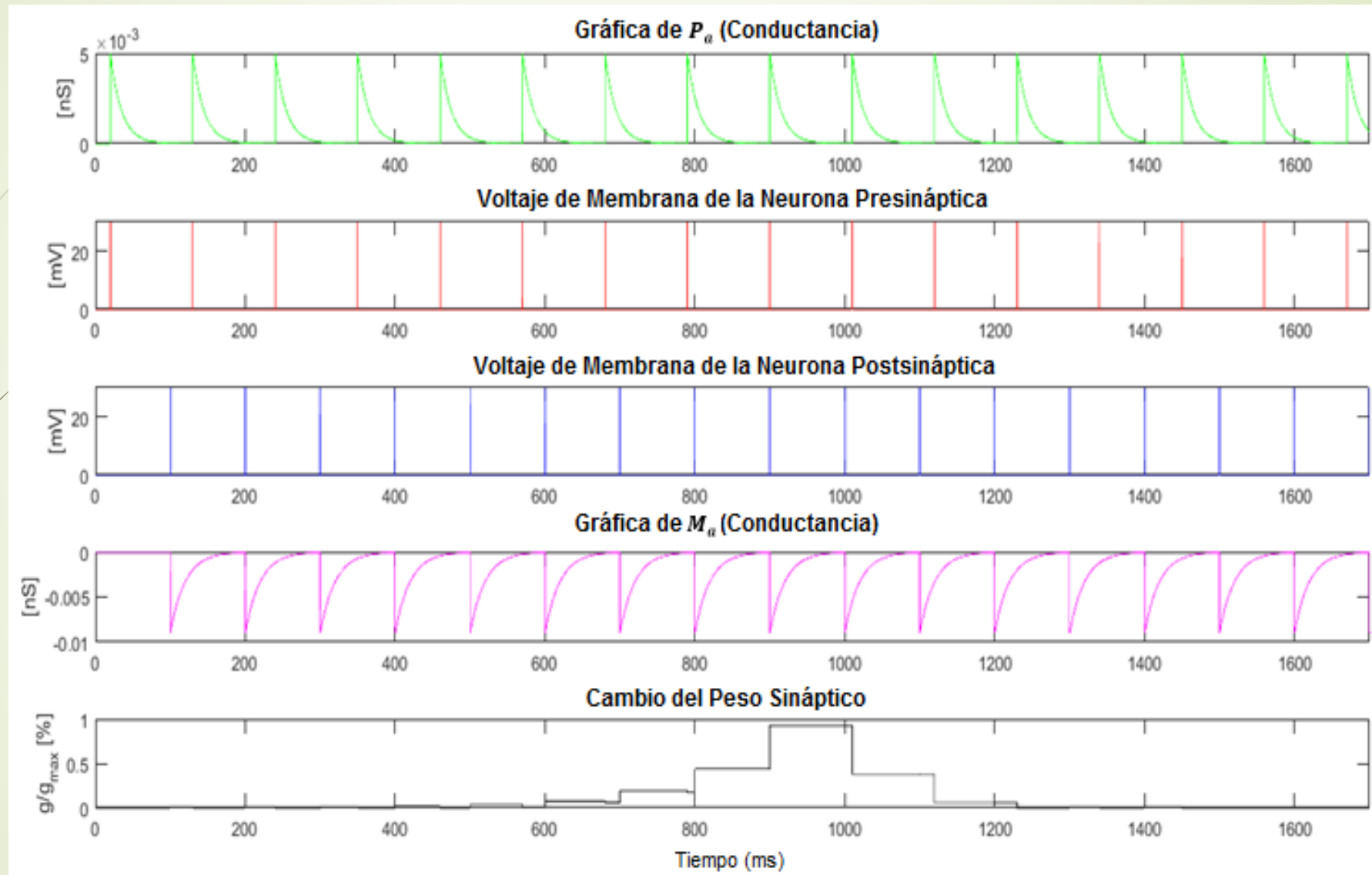


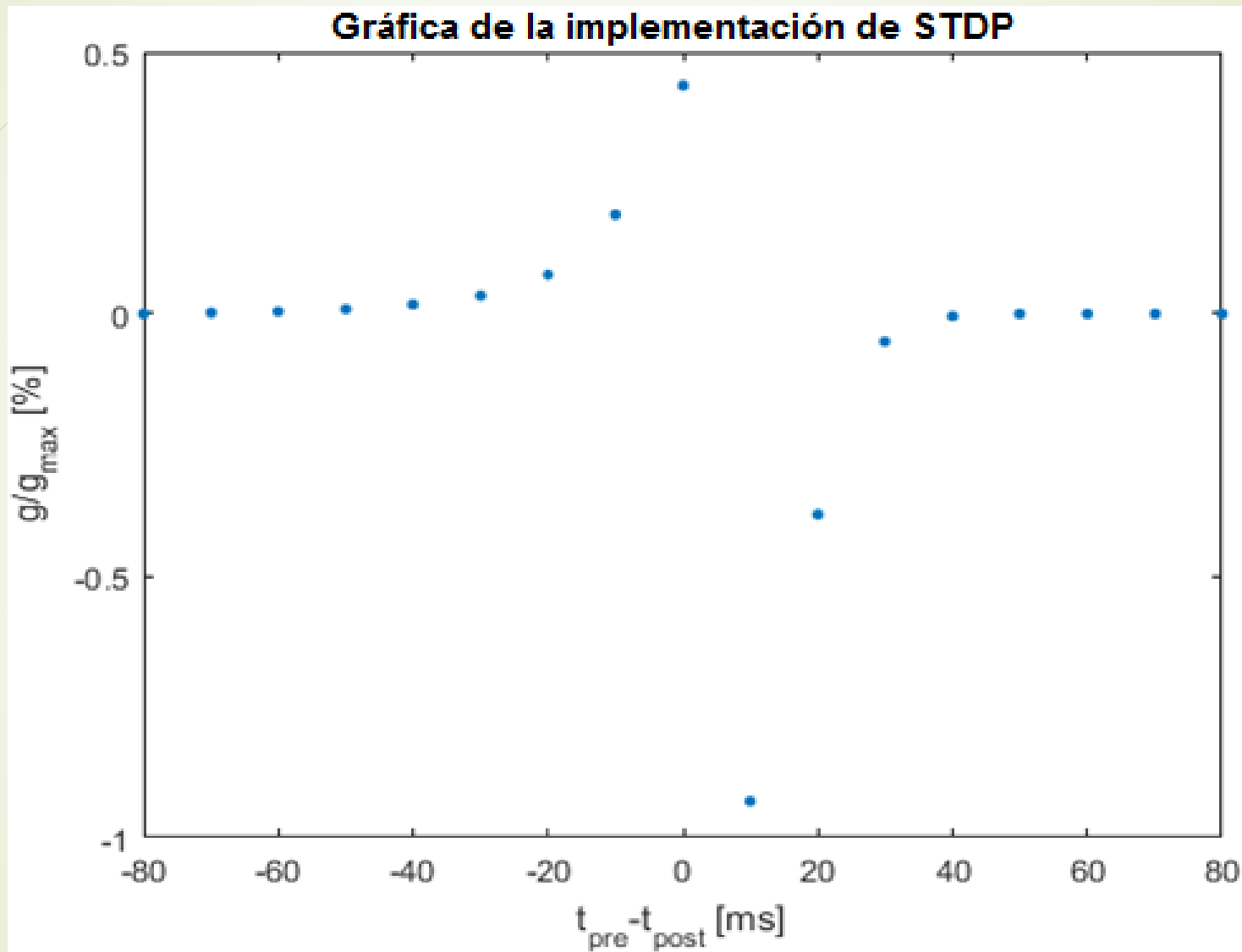
## Yakopcic

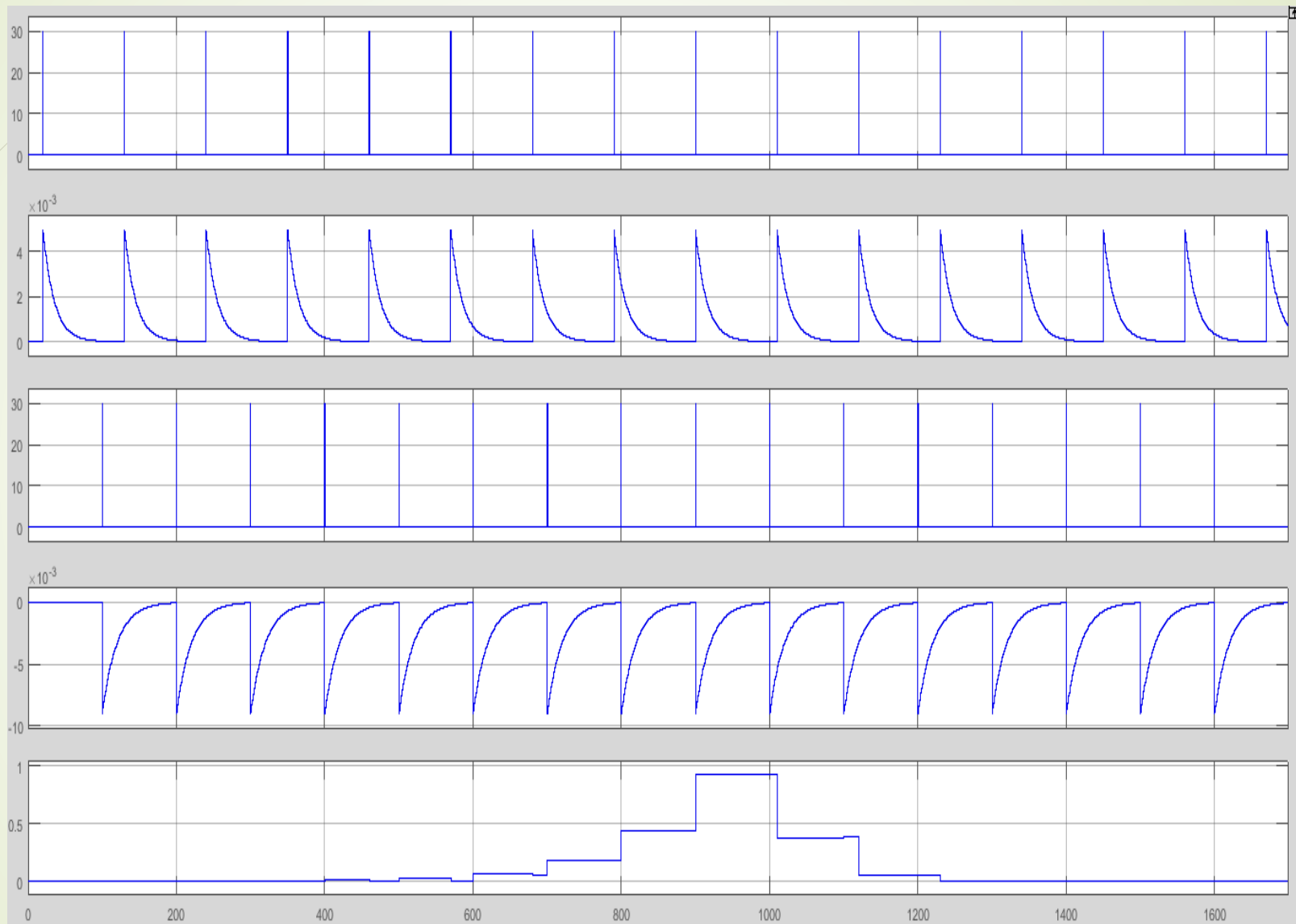


## Pickett



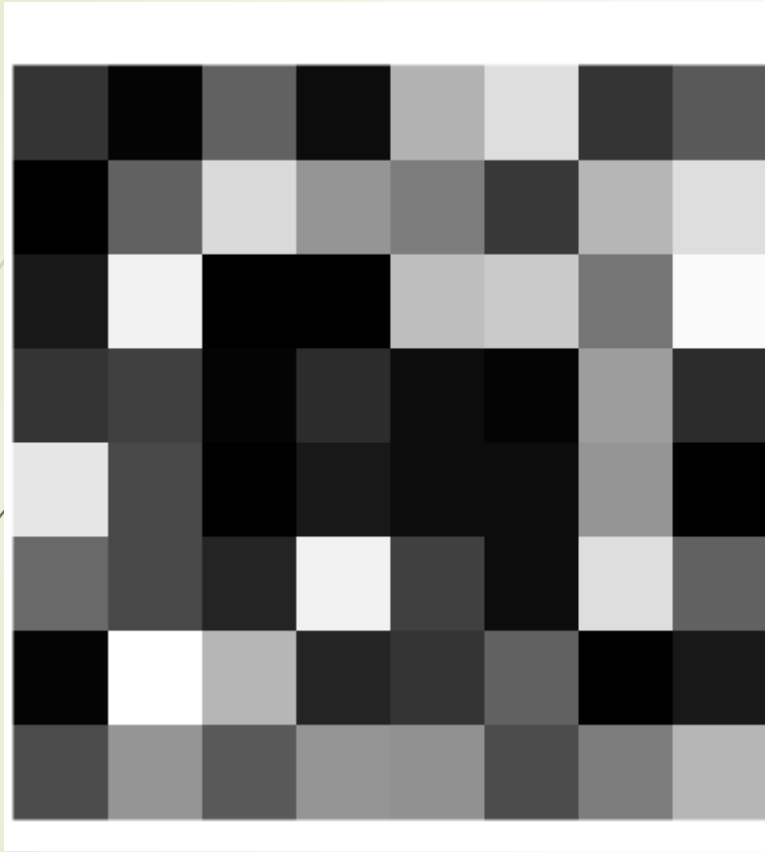




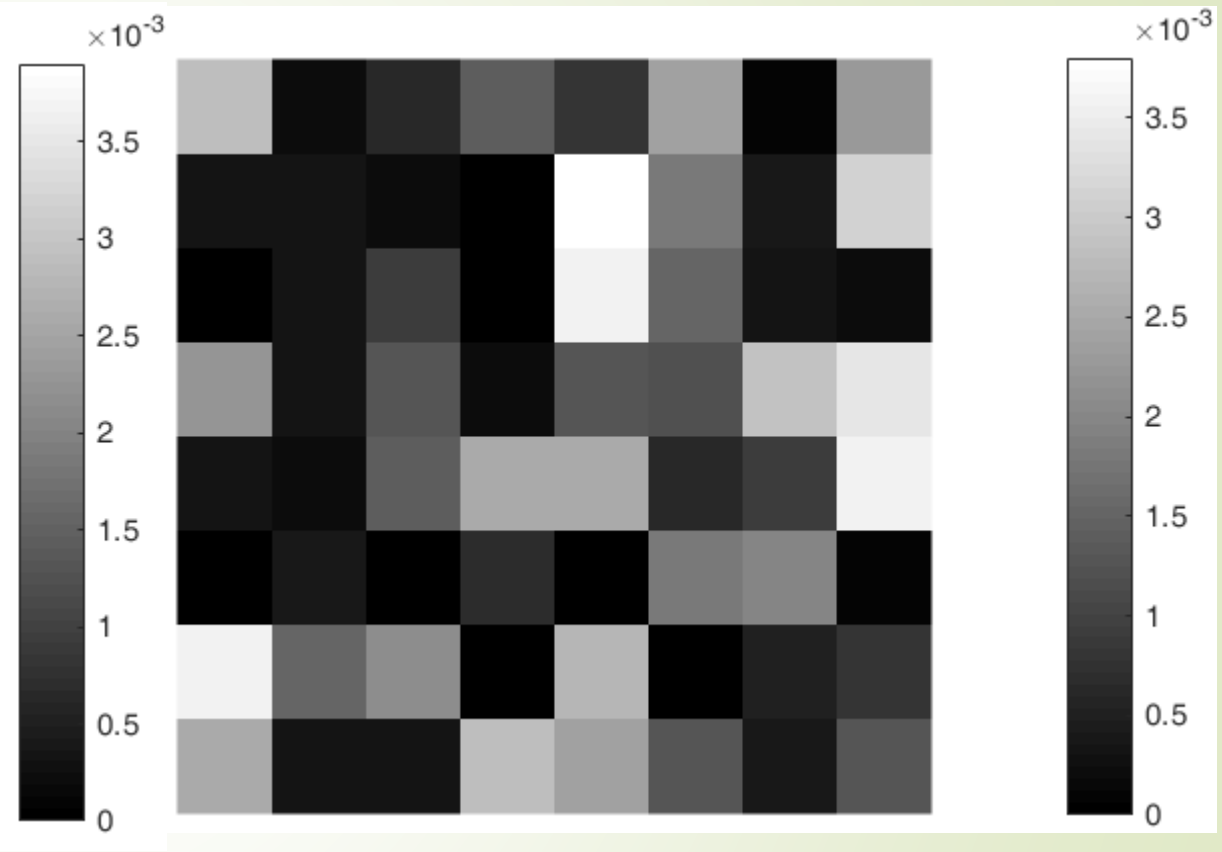


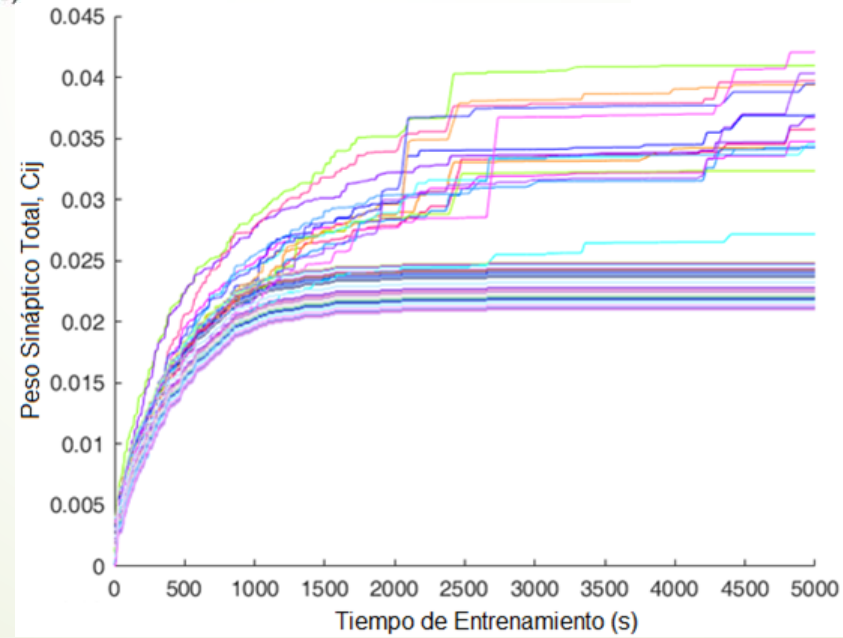
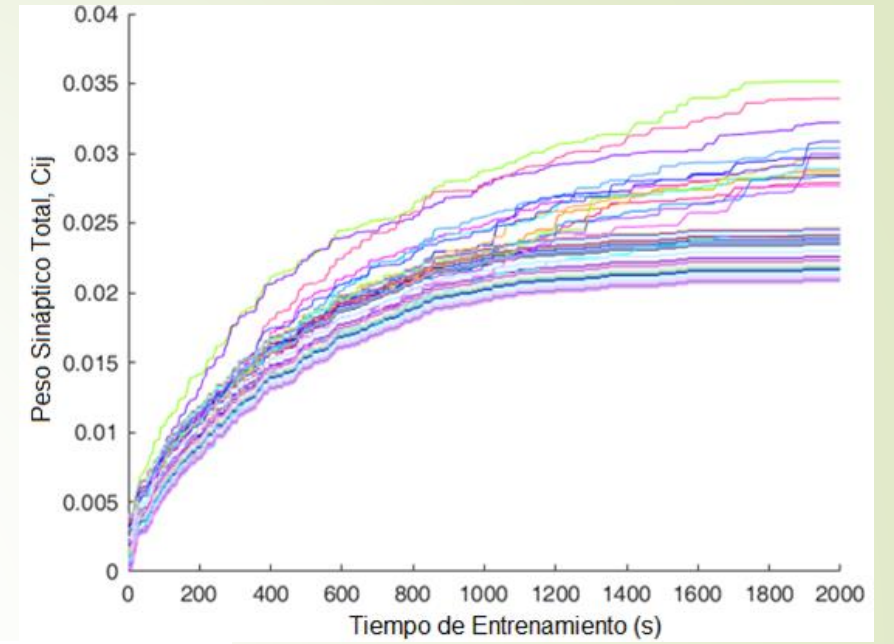
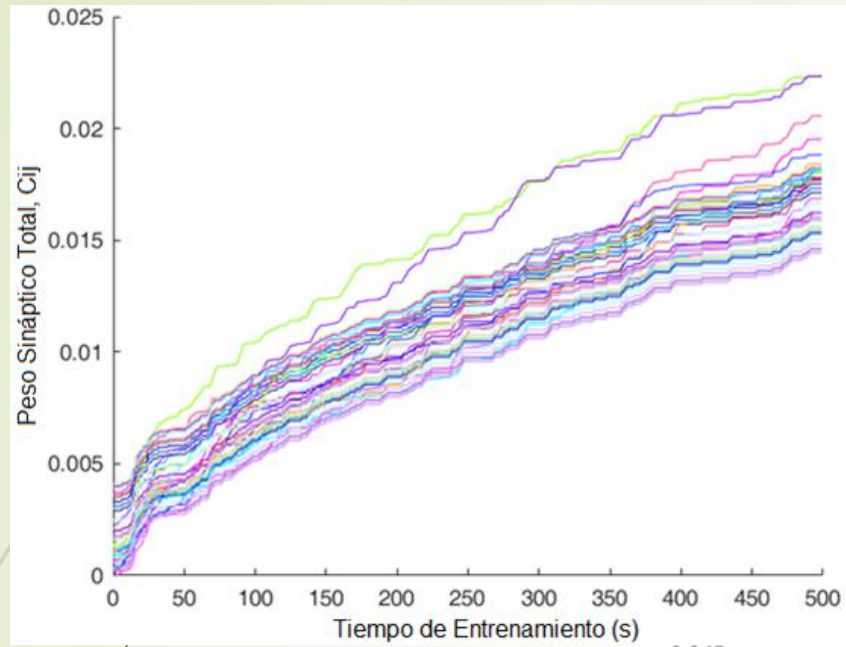


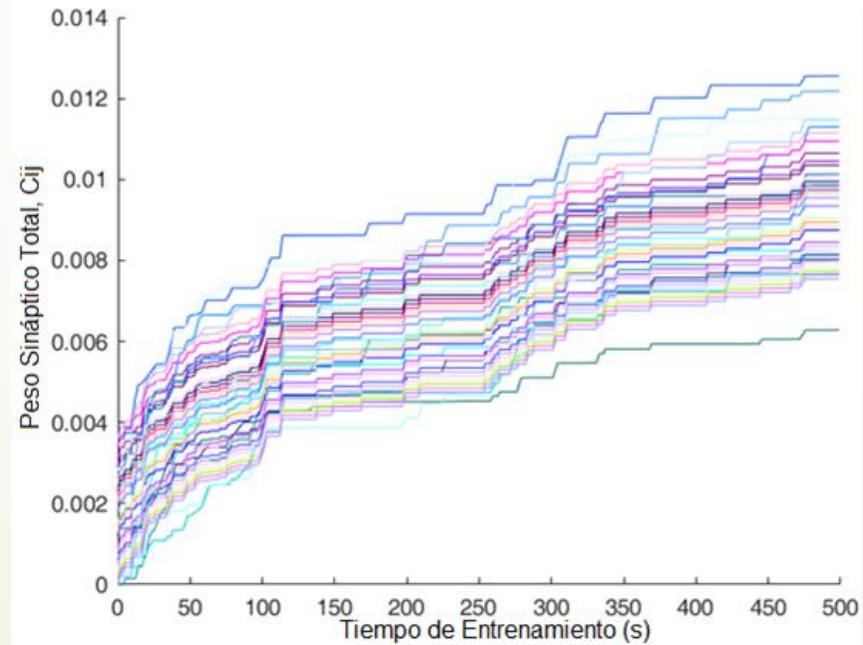
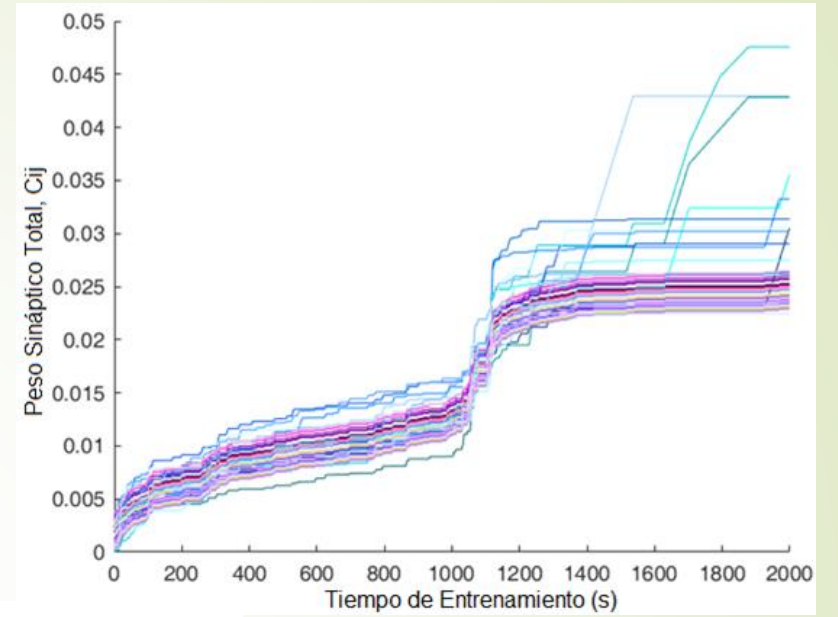
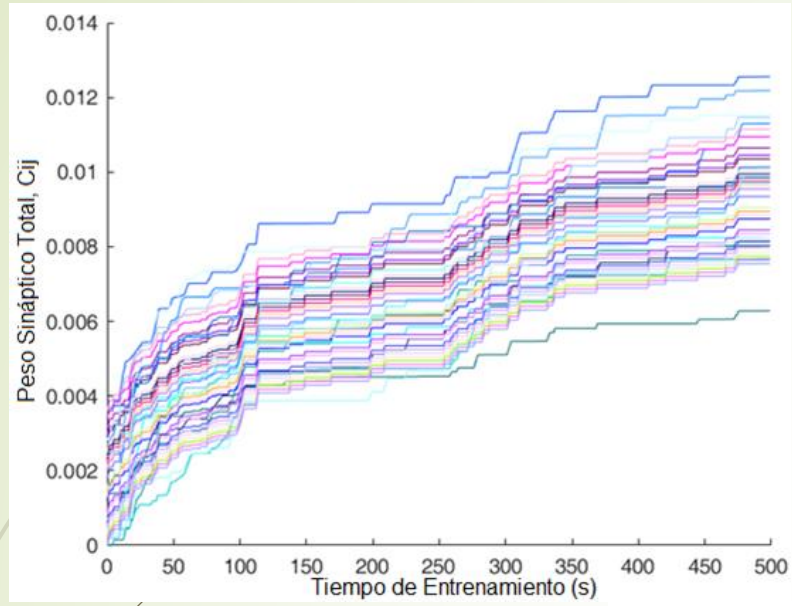
Matriz de pesos para patrones horizontales

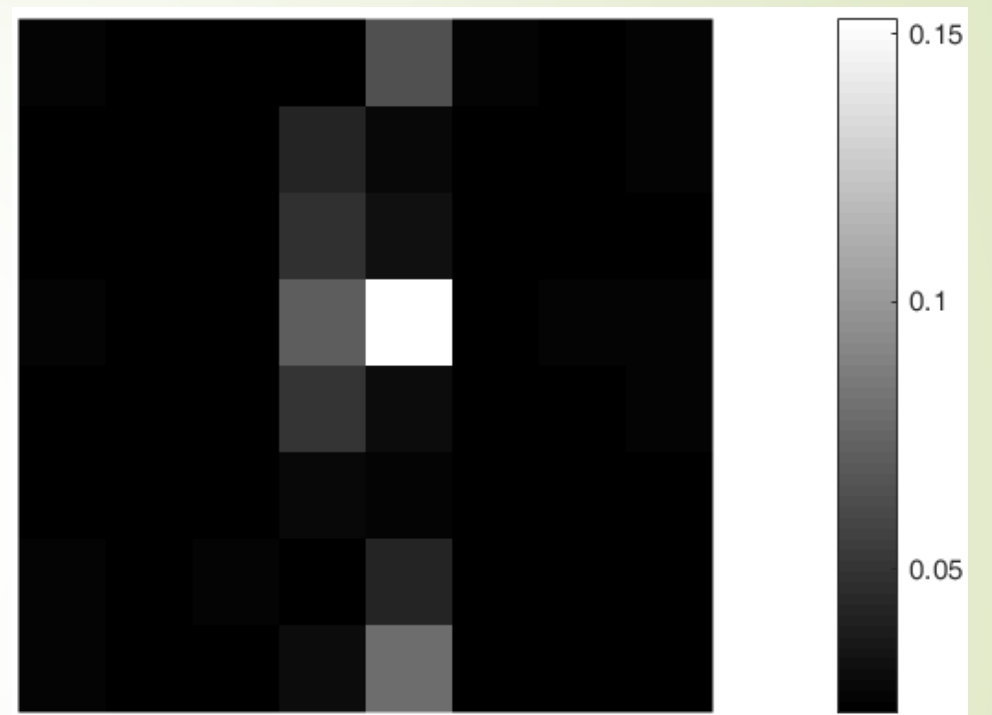
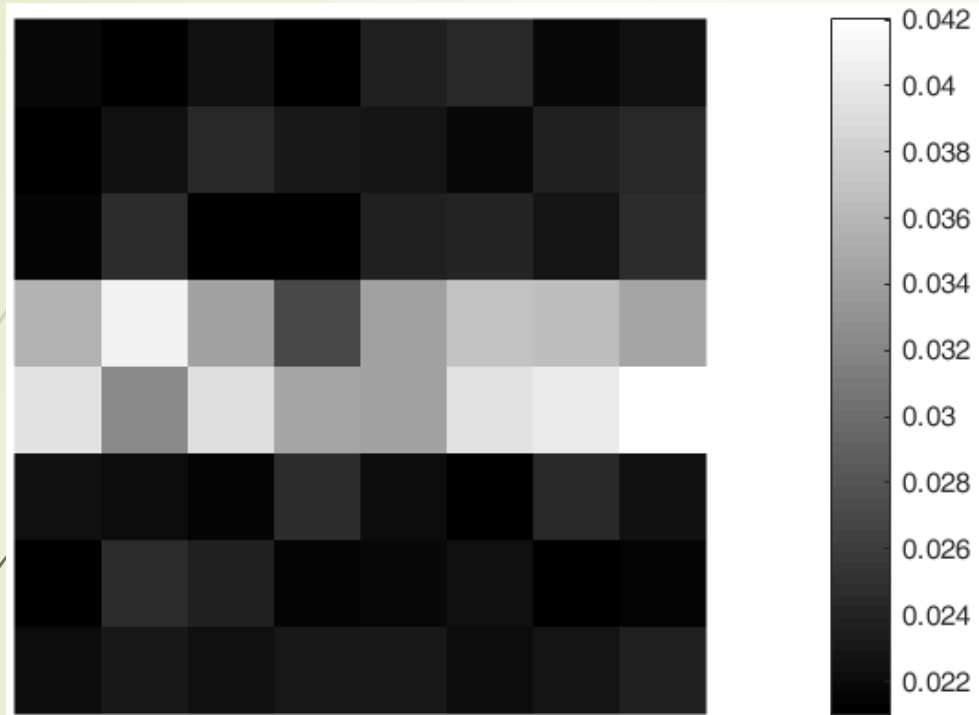


Matriz de pesos para patrones verticales

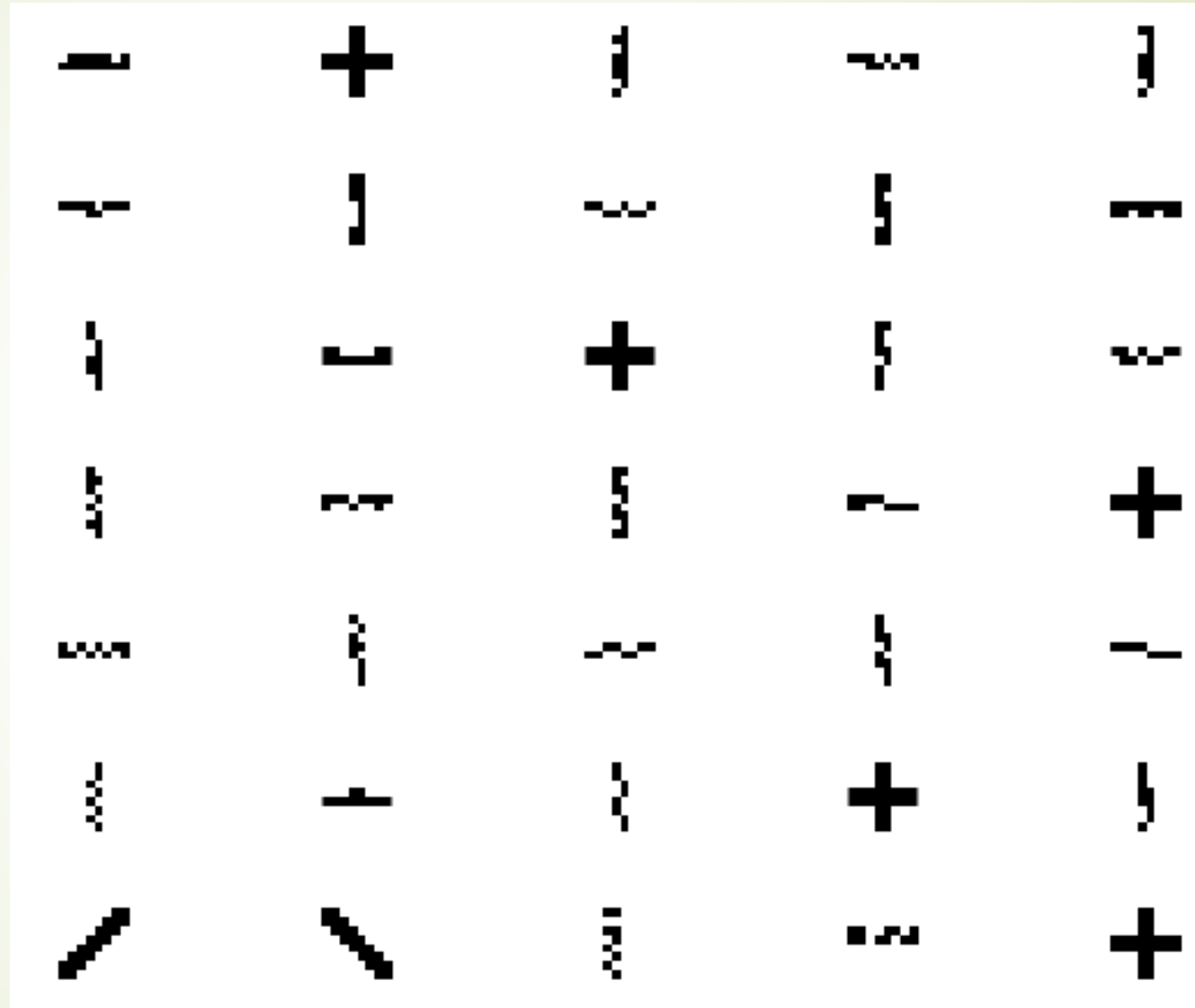


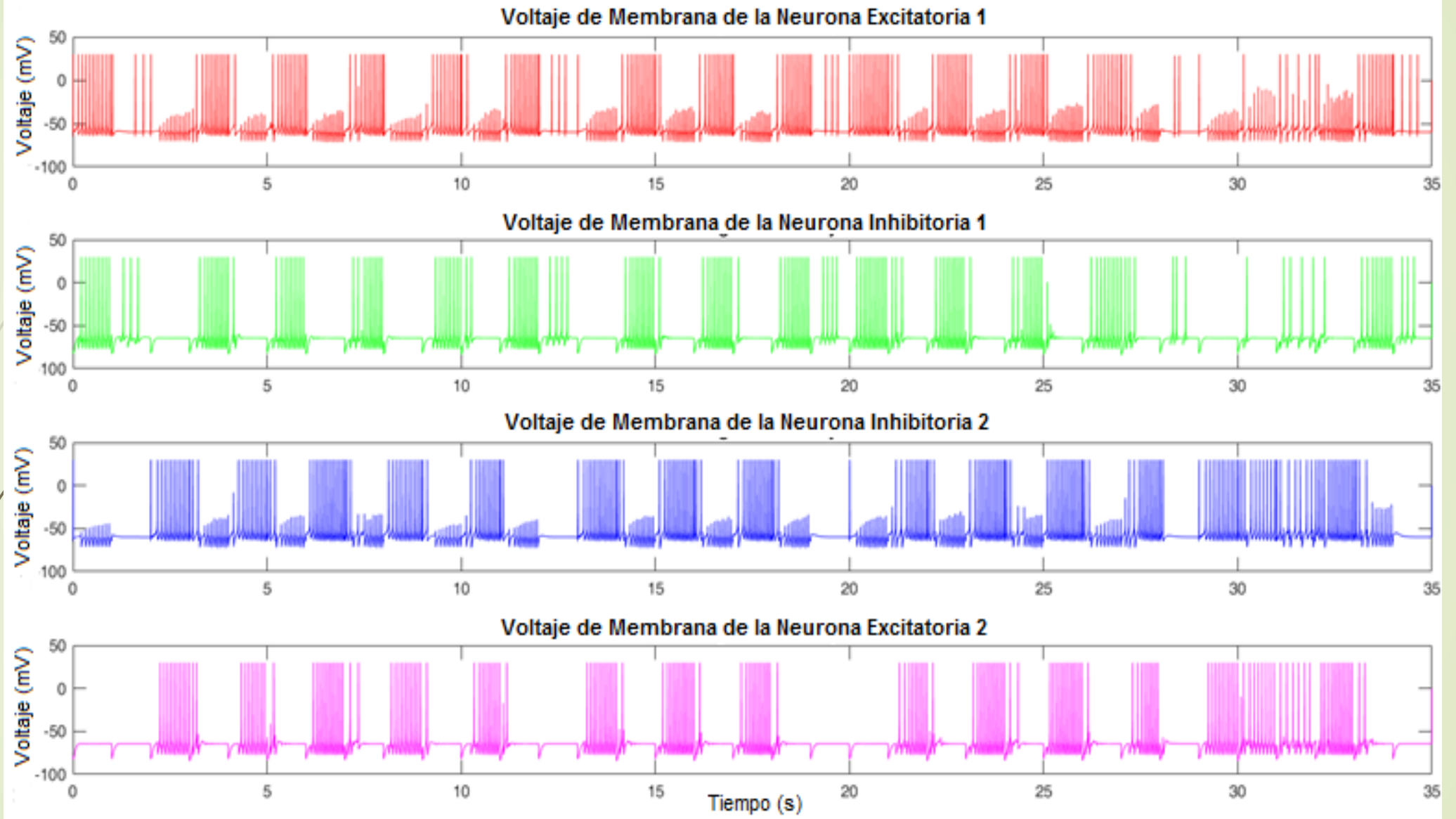




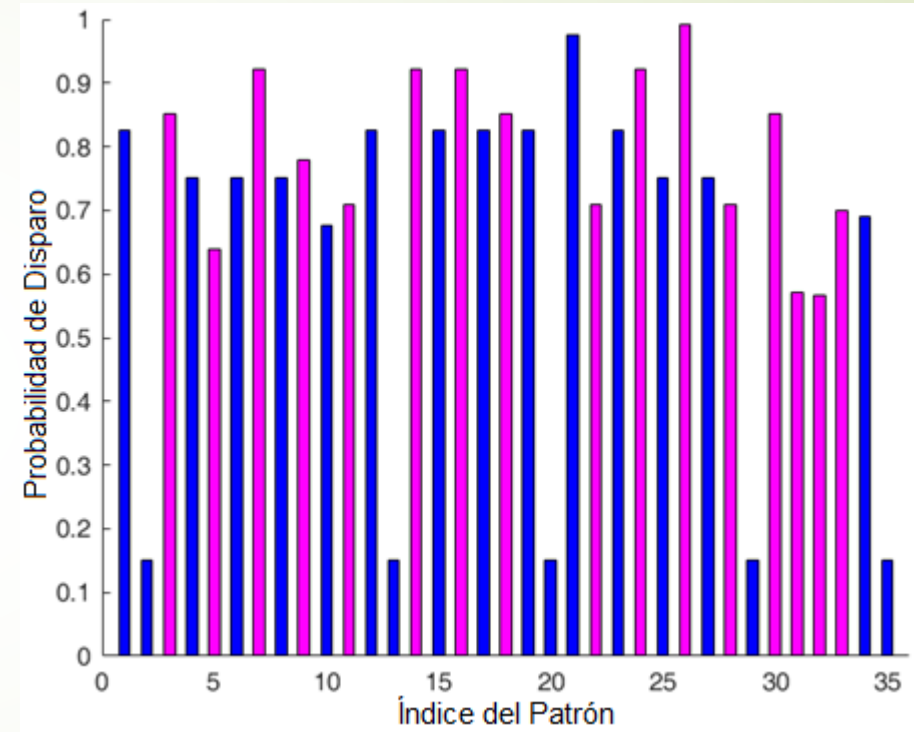
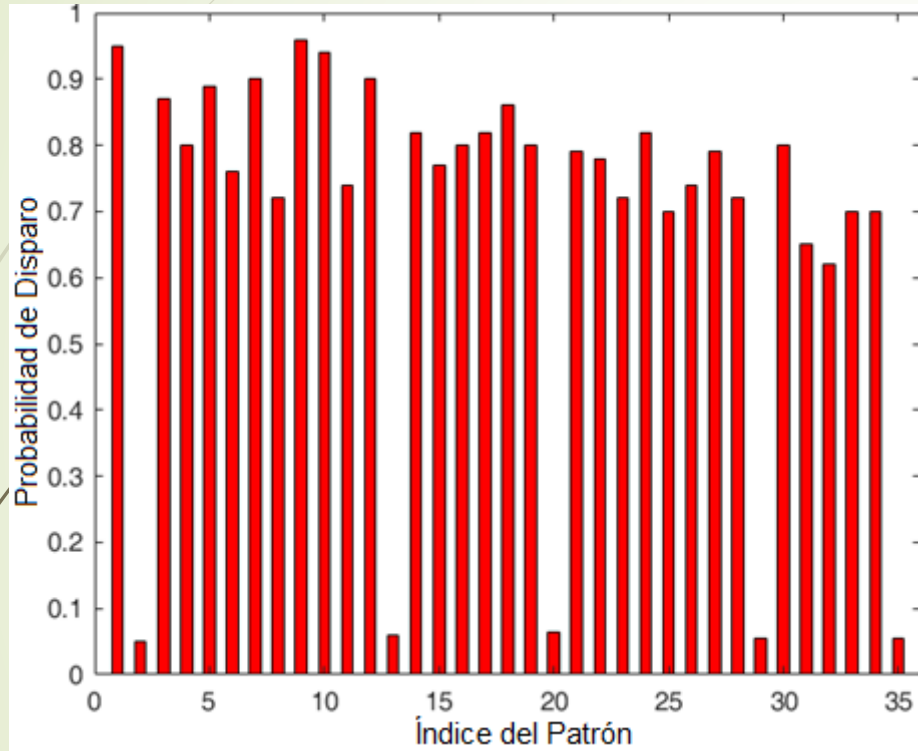


## Patrones de prueba









# CONTENIDO

- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS
- MARCO TEÓRICO
- DESARROLLO
- APORTES
- RESULTADOS
- **CONCLUSIONES**
- TRABAJO FUTURO

# CONCLUSIONES

- ▶ La red propuesta funciona de acuerdo a lo esperado y muestra un comportamiento bastante aproximado al biológico.
- ▶ La evolución de los pesos a lo largo de las épocas de entrenamiento proporciona información suficiente para determinar el desempeño del modelo STDP.
- ▶ La implementación en Simulink da una buena base para continuar el desarrollo en sistemas embebidos digitales (FPGAs).
- ▶ La estabilidad de la red resulta por encima de las expectativas.
- ▶ Los modelos estocásticos de los memristores propuestos tienen una correlación muy alta con los modelos deterministas.
- ▶ Es posible utilizar estos modelos para generar una simulación más detallada.

# CONTENIDO

- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS
- MARCO TEÓRICO
- DESARROLLO
- APORTES
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- **TRABAJO FUTURO**

# TRABAJO FUTURO

- ▶ Justificar desde un punto de vista de sistemas dinámicos, el comportamiento de las redes neuronales pulsadas.
- ▶ Diseñar la red para ser implementada en un circuito integrado analógico.
- ▶ Diseñar la estructura a bloques en Simulink para sintetizar la red en un sistema digital con FPGA.
- ▶ Aumentar la capacidad de la red para obtener una clasificación multiclase.
- ▶ Plantear un posible diseño de la red para implementar un método alternativo de entrenamiento como las Máquinas de Boltzmann (Boltzmann's Machines).