

Modelo neuronal de Izhikevich

Ramiro Santamaria* and Lijandy Jiménez Armas†

*Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires and
Instituto de Matemática Aplicada del Litoral, Santa Fe Capital*

(Dated: February 5, 2024)

Existen varias estructuras de ecuaciones matemáticas que pretenden modelar el comportamiento de las neuronas artificiales pulsantes en respuesta al voltaje que reciben: Integrate-and-fire, FitzHugh-Nagumo, Hindmarsh-Rose, Hodgkin-Huxley, Izhikevich, entre otros [1]. Para la realización de este trabajo se utiliza el modelo de Izhikevich, nombrado en honor al matemático ruso Eugene Izhikevich. Es una herramienta ampliamente utilizada para simular eficientemente el comportamiento de un gran grupo de neuronas. Este modelo se deriva de una simplificación del modelo de Hodgkin & Huxley, el cual involucra cuatro ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas. En contraste, el modelo de Izhikevich consta solamente de dos ecuaciones, lo que lo hace más accesible y manejable para estudiar y simular la actividad neuronal.

I. INTRODUCCIÓN

Para comprender como funciona el cerebro, debemos combinar estudios experimentales de sistemas nerviosos de animales y humanos con la simulación numérica de modelos cerebrales a gran escala [2]. En el artículo a estudiar se presenta un modelo de emisión de impulso sencillo, en el análisis que se realizó se detectaron que depende de cuatro parámetros, el modelo reproduce el comportamiento de emisión de impulsos y explosiones de los tipos conocidos de neuronas corticales. El análisis matemático del mismo se hizo haciendo uso del modelo neuronal Izhikevich.

Como parte de las metodologías de bifurcación, estas nos permiten reducir muchos modelos neuronales biológicamente precisos del tipo Hodgkin-Huxley a un sistema bidimensional (2-D) de ecuaciones diferenciales ordinarias de la forma:

$$v' = 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I \quad (1)$$

$$u' = a(bv - u) \quad (2)$$

Con el siguiente reseteo de las variables si se cumple:

$$\text{si } v \geq 30 \text{ mV, entonces } \begin{cases} v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d \end{cases} \quad (3)$$

Acá, v y u son variables dimensionales, y a , b , c y d son parámetros adimensionales, y $' = d/dt$, donde t es el tiempo.

En la EC. 1 v representa el potencial de membrana de la neurona. Y en la EC. 2 u representa una variable de recuperación de membrana que tiene en cuenta la activación de corrientes iónicas y la inactivación de corrientes iónicas, y proporciona retroalimentación negativa a v .

Después de que el impulso alcanza su punto máximo (30mV), el voltaje de membrana y la variable de recuperación se restablecen según la EC. 3.

En este trabajo se reprodujo las siguientes respuestas excitatorias neuronales:

- Regular spiking (RS).
- Intrinsically bursting (IB)
- Chattering (CH)

Así también como la respuesta de células inhibitorias:

- Fast spiking (FS).
- Low-threshold spiking (LTS)

Adicionalmente el modelo puede reproducir el comportamiento de células del sistema talamocortical y respuesta resonadoras:

- Thalamo-cortical (TC).
- Resonator (RZ)

Para lograr los diferentes tipos de respuestas neuronales con el modelo se tomaron diferentes valores para los parámetros a , b , c y d , que se muestran en FIG.1 así como también el tipo de corriente I con la que se estimuló al sistema.

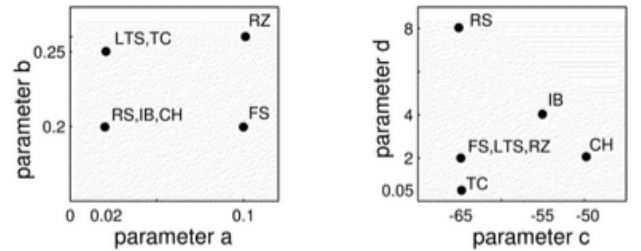


FIG. 1. Parámetros utilizados para lograr los diferentes tipos de respuestas neuronales.

II. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Dinámicas Neuronales

Las neuronas neocorticales en el cerebro de mamíferos se pueden clasificar en varios tipos según el patrón de disparo y explosión observado en registros intracelulares. Todas las células corticales excitatorias se dividen en diferentes clases.

A continuación reproducimos los resultados de la evolución del voltaje (en verde) para los diferentes tipos de neuronas variando los parámetros según la FIG. 1, con distintos tipos de corrientes I (en rojo).

1. Neuronas RS

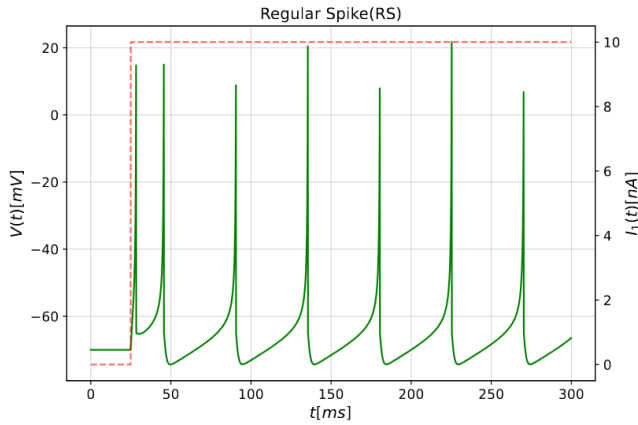


FIG. 2. Representación de las neuronas RS (regular spiking).

En la representación de la FIG. 2 se puede notar que cuando se les presenta un estímulo prolongado, las neuronas disparan algunos impulsos con períodos cortos entre ellos, posteriormente se observa que el período entre impulsos aumenta. Llegando a obtener una adaptación de la frecuencia de disparo, donde si se aumenta la intensidad de la corriente continua aumentando la frecuencia entre los impulsos. Pero esta frecuencia no llega a ser alta debido a hiperpolarizaciones significativas que ocurren después de los disparos de potencial.

2. Neuronas IB

En la FIG. 3. se encuentra la representación del comportamiento de las neuronas IB, las mismas disparan un estallido estereotipado de impulsos seguido por impulsos individuales repetitivos. Todo esto es referente al restablecimiento del voltaje alto y a un gran salto posterior del impulso. En el estallido inicial, se acumula una variable que finalmente cambia la dinámica de las

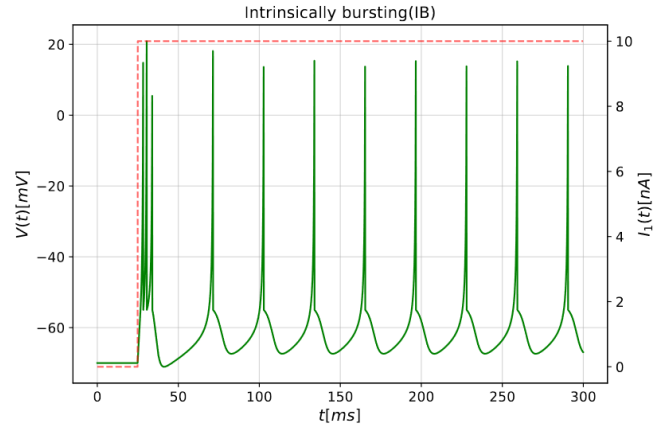


FIG. 3. Representación de las neuronas IB (intrinsically bursting).

neuronas, de la actividad de estallido a la actividad de disparo único.

3. Neuronas CH

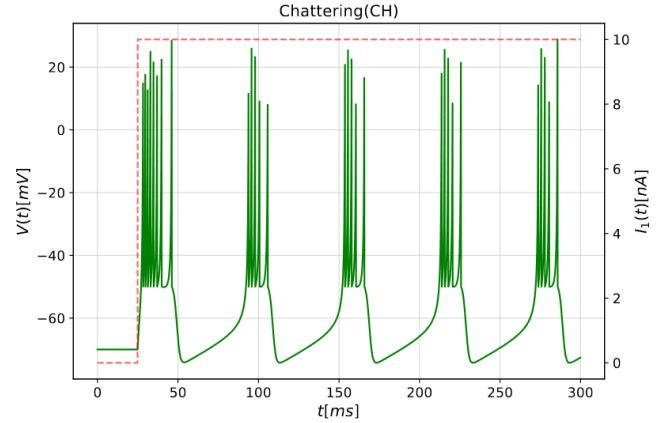


FIG. 4. Representación de las neuronas CH (chattering).

En la FIG. 4 se encuentra la representación del comportamiento de las neuronas CH, estas permiten disparar ráfagas estereotipadas de impulsos cercanos entre sí. Dichas ráfagas pueden ser hasta de 40Hz, en dicho modelo, esto se corresponde con un restablecimiento de voltaje muy alto y un salto posterior al impulso moderado.

4. Neuronas FS

En la FIG. 5 se puede observar el comportamiento de las neuronas FS, las mismas pueden disparar trenes periódicos de potenciales de acción con una frecuencia extremadamente alta, prácticamente sin ninguna

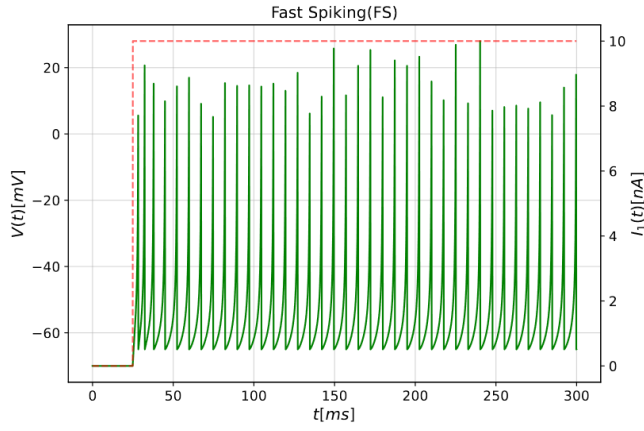


FIG. 5. Representación de las neuronas FS(fast spiking).

adaptación (ralentización). En la observación el modelo muestra una recuperación rápida, esto significa que estas neuronas son capaces de disparar con una alta frecuencia y no experimentan una disminución significativa en su tasa de disparo, lo que las hace especialmente adecuadas para ciertas funciones en el sistema nervioso.

5. Neuronas LTS

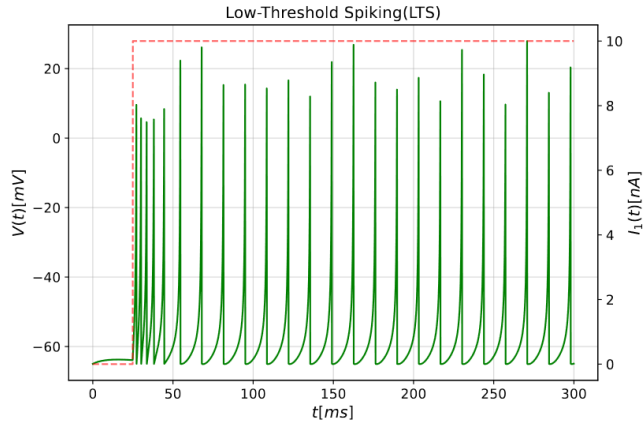


FIG. 6. Representación de las neuronas LTS(low-threshold spiking).

En la FIG.6 lo que podemos observar en este tipo de neuronas es que también puede disparar trenes de potenciales de acción a alta frecuencia, pero se observa una notable adaptación en la frecuencia de disparo. Lo que también podemos notar es que estas neuronas tienen umbrales de disparos bajos, lo cual se tiene en cuenta en la aplicación del modelo.

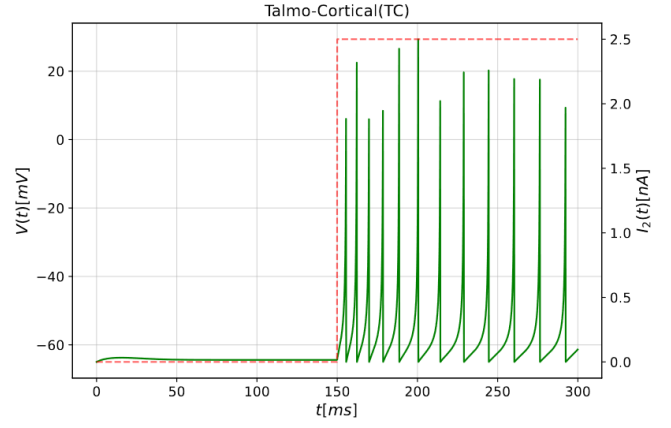


FIG. 7. Representación de las neuronas TC (thalamo-cortical).

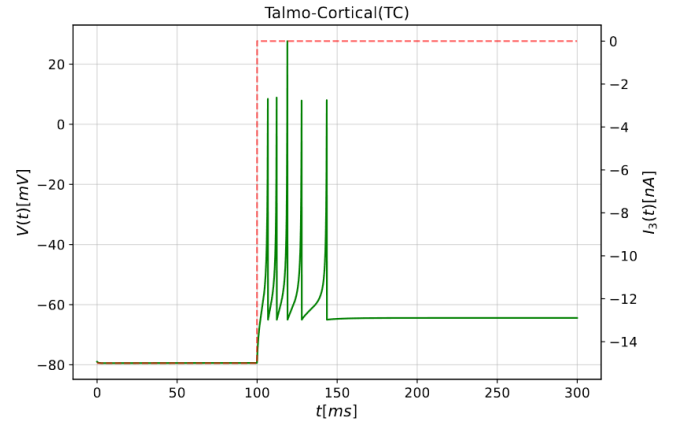


FIG. 8. Representación de las neuronas TC (thalamo-cortical).

6. Neuronas TC

En las FIG. 7 y 8 se obtiene el resultado de los diferentes régimen de disparo para el modelo TC, en estas se observa que se encuentran en reposo con un potencial alrededor de los 60Hz y luego se despolarizan. En el otro caso la FIG.8 se aplica un paso de corriente negativa de manera que el potencial de membrana se hiperpolariza, dichas neuronas disparan un estallido de potenciales de acción de rebote.

7. Neuronas RZ

En la FIG. 9 se muestran las oscilaciones subumbrales amortiguadas o sostenidas, las mismas resuenan con entradas rítmicas que contienen una frecuencia adecuada, todo esto dependiendo de los valores de los parámetros del modelo.

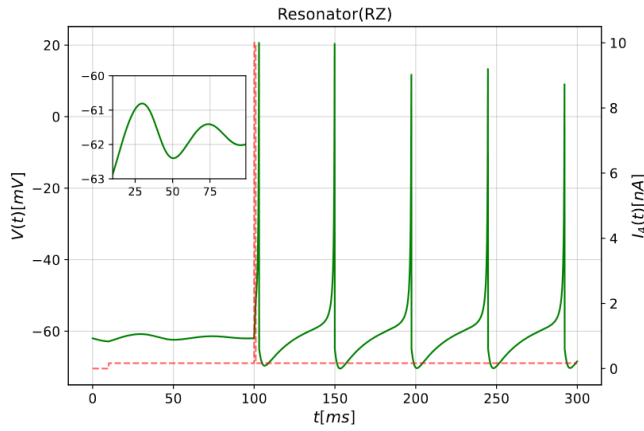


FIG. 9. Representación de las neuronas RZ(resonator).

B. Redes neuronales acopladas a pulsos

En este caso se reproduce el comportamiento de una red neuronal de neuronas Izhikievich, haciendo una reproducción de la figura 3 del artículo estudiado.

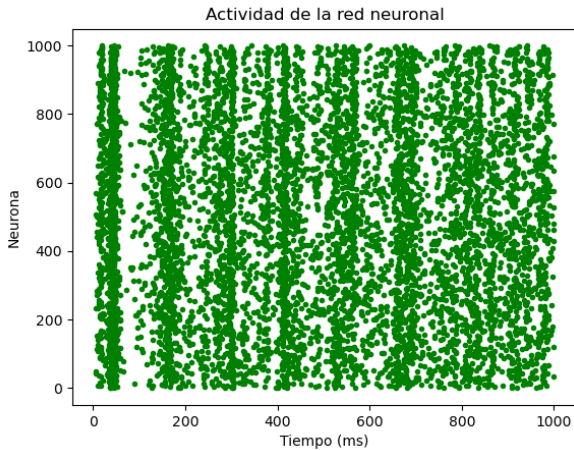


FIG. 10. Representación de la actividad de la red neuronal.

En la FIG. 10 se observa que a pesar de que la red está conectada de manera aleatoria y no hay plasticidad sináptica, las neuronas se auto-organizan en conjuntos y muestran un comportamiento rítmico colectivo en el rango de frecuencias que corresponde al de la corteza cerebral.

III. CONCLUSIONES

En el artículo estudiado de forma general se discute la dinámica de una red neuronal modelada mediante un modelo de emisión de impulsos simple. A partir de las observaciones realizadas en la red neuronal, se obtiene:

- Se lograron reproducir las respuestas neuronales realizadas en el trabajo de Izhikievich[2].
- A pesar de que la red está conectada de manera aleatoria y no se utiliza plasticidad sináptica, las neuronas tienen la capacidad de auto-organizarse en conjuntos y exhiben comportamiento rítmico colectivo.
- La simplicidad del modelo de emisión de impulsos utilizado no contradice la plausibilidad biológica, ya que es capaz de describir con precisión la dinámica de diversos tipos de neuronas corticales.
- La red muestra dinámicas asincrónicas similares a la corteza cerebral, donde las neuronas emiten impulsos de manera estocástica.

* rami.santamaria92@gmail.com

† lijandy92@gmail.com

- [1] C. Hernández-Becerra and M. Mejía-Lavalle, Clasificación de patrones mediante el uso de una red neuronal pulsante., Res. Comput. Sci. **116**, 81 (2016).
- [2] E. M. Izhikevich, Simple model of spiking neurons, IEEE Transactions on neural networks **14**, 1569 (2003).