

# Experimentos con “neuronas” electrónicas (modelo analógico discreto con acoplamiento “sináptico” inhibitorio)

## Experiments with electronic “neurons” (discrete analog model with “synaptic” inhibitory coupling)

N. Martínez <sup>a</sup>, G.A. Zarza <sup>b</sup>, R.R. Deza <sup>b,\*</sup>, G.V. Savino <sup>c</sup>, C.M. Formigli <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Dto. de Física – Fac. de Cs. Exactas y Naturales – Univ. Nac. de Mar del Plata (UNMdP)  
Deán Funes 3350 – (B7602AYL) Mar del Plata – Prov. Buenos Aires – Argentina

<sup>b</sup> Instituto de Investigaciones Físicas de Mar del Plata IFIMAR (UNMdP-CONICET)  
Deán Funes 3350 – (B7602AYL) Mar del Plata – Prov. Buenos Aires – Argentina

<sup>c</sup> Dto. Electricidad, Electrónica y Computación – Fac. de Cs. Exactas y Tecnología – Univ. Nac. de Tucumán  
Av. Independencia 1800 – (4000) San Miguel de Tucumán – Argentina

Recibido: 14/11/14; aceptado: 21/10/15

Verificamos experimentalmente en un análogo electrónico nuestros resultados teóricos previos, en los que unidades con dinámica de FitzHugh–Nagumo y acoplamiento inhibitorio (o excitatorio antifase) *se autoorganizan espaciotemporalmente* en presencia de una señal subumbral, *por efecto del ruido y del acoplamiento*.

*Palabras clave:* FitzHugh–Nagumo, autoorganización espaciotemporal.

We experimentally verify in an electronic analogue our previous theoretical results, in which units with FitzHugh–Nagumo dynamics and inhibitory (or excitatory antiphase) coupling *self-organize spatiotemporally* in the presence of a subthreshold signal, *by effect of noise and coupling*.

*Keywords:* FitzHugh–Nagumo, spatiotemporal self-organization.

### I. INTRODUCCION

El objetivo de este trabajo es verificar experimentalmente el resultado de las Refs. <sup>1–5</sup>. Para ello nos valemos del circuito patentado y estudiado en las Refs. <sup>6–8</sup> cuya dinámica—al explotar la alinealidad del régimen de avalancha de los transistores bipolares NPN BC547 y otros—resulta análoga a la de FitzHugh–Nagumo.

Estudiamos experimentalmente la curva  $I-V$  del BC547 en régimen de avalancha, y luego acoplamos inhibitoriamente dos “neuronas” para observar el fenómeno predicho <sup>1–5</sup>.

### II. MÉTODOS

#### Modelo de neurona

Las ecuaciones del circuito de la Fig. 1 son

$$\begin{aligned} C_1 \dot{V}_1 &= i_1 - i_{NL}, \quad (\text{nodo}) \\ L \dot{i}_{NL} &= V_1 - V_{NL}(i_{NL}), \quad (\text{malla}) \end{aligned}$$

De aquí resulta que la corriente de emisor  $i_{NL}$  se comporta cualitativamente como la variable “activador” del modelo de FitzHugh–Nagumo, y  $V_1$  como la variable de recuperación o “inhibidor”.

#### Curva $I-V$ de avalancha del BC547

Para obtener dicha curva, se estudia el circuito en ausencia del capacitor  $C_1$  (Fig. 2). Además, con el

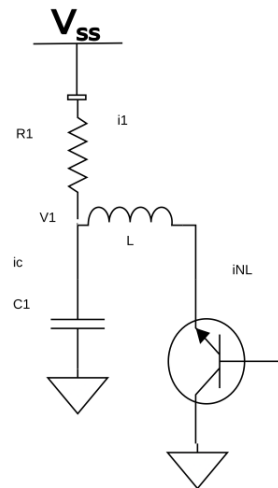


Figura 1: Circuito con dinámica análoga a la de FitzHugh–Nagumo.

objeto de mejorar la precisión, se excita el circuito con un diente de sierra.

La Fig. 3 muestra la curva  $I-V$  obtenida experimentalmente (captura de osciloscopio en modo X-Y).

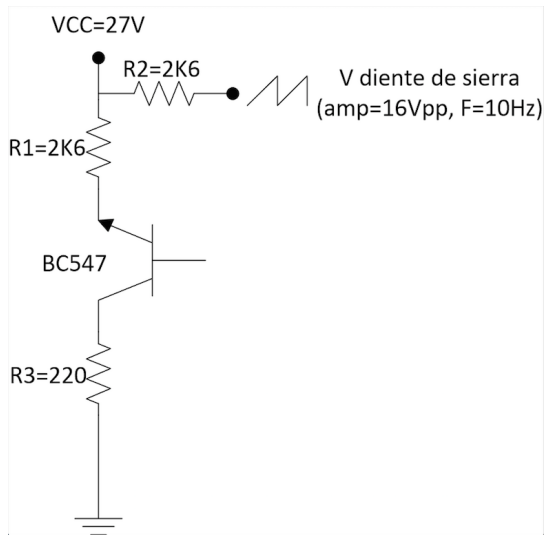


Figura 2: Circuito utilizado para obtener la curva I-V del BC547 en régimen de avalancha.

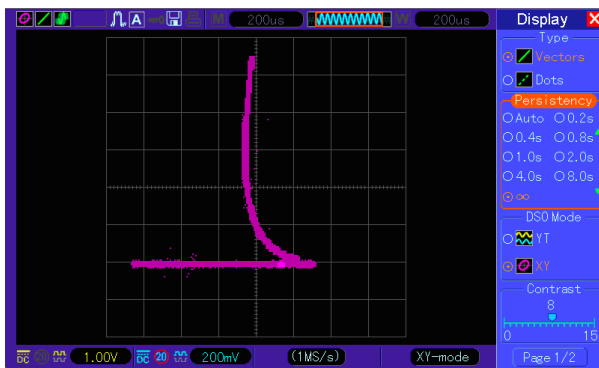


Figura 3: Curva I-V de avalancha del BC547.

### Acoplamiento inhibitorio de dos “neuronas”

El acoplamiento inhibitorio de dos “neuronas” se logra mediante la resistencia  $R_3$  de la Fig. 4. El generador representa la señal subumbral. En los mismos puntos se inyectan ruidos gaussianos blancos independientes de igual varianza.

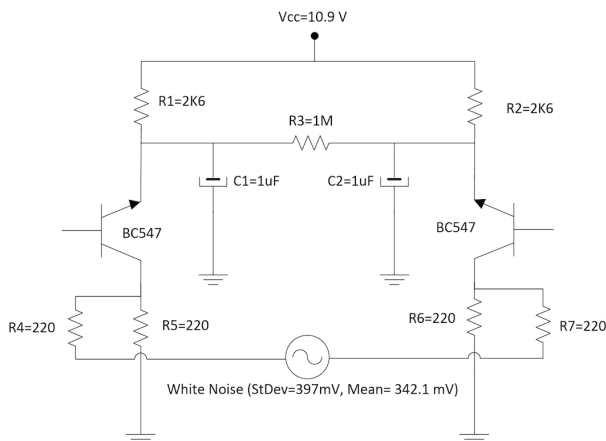


Figura 4: Acoplamiento inhibitorio de dos “neuronas”.

La *autoorganización espaciotemporal* por efecto del ruido y del acoplamiento se evidencia en el hecho de que en cada ciclo de la señal subumbral *dispara uno solo de los transistores* (Fig. 5).

La coherencia de este fenómeno es máxima para una intensidad óptima de ruido, estimada teóricamente en las Refs. <sup>1-5</sup> por medio del “potencial de no-equilibrio” (NEP).

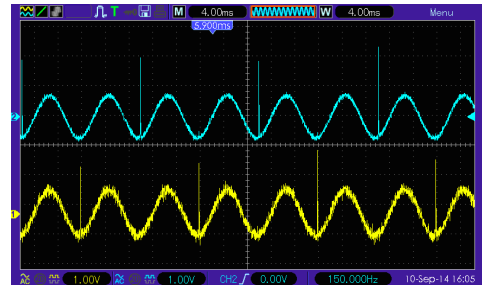


Figura 5: Autoorganización espaciotemporal de las “neuronas”.

La Fig. 6 muestra cómo varía el NEP (calculado en los estados uniforme y alternado, y en la barrera que los separa) al seguir adiabáticamente a la señal.

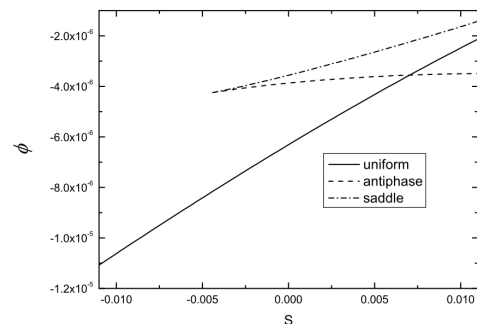


Figura 6: Variación adiabática del NEP con la señal.

Cuando la señal está cerca del máximo, es posible la transición del estado uniforme al alternado. El sistema regresa luego determinísticamente al estado uniforme de reposo.

### Conclusiones

El circuito de las Refs. <sup>6-8</sup>, que apela a transistores de unión bipolar inversamente polarizados (una conexión inusual), nos ha permitido verificar experimentalmente el resultado de las Refs. <sup>1-5</sup>.

Por su diseño compacto y consumo de energía muy bajo (en el rango de 10  $\mu$ J por disparo o “espiга”), el circuito de las Refs. <sup>6-8</sup> proporciona un bloque elemental para el diseño de redes neuronales VLSI neuromórficas (o para cualquier otra aplicación específica) que serán masivamente paralelas, analógicas, adaptables y de baja potencia, y que (debido a su simplicidad) impliquen pequeña área de silicio.

### III. REFERENCIAS

- 1 - Izús, G.G., R.R. Deza y A.D. Sánchez, AIP Conf. Proc. **887**, 89 (2007). <http://dx.doi.org/10.1063/1.2709590>
- 2 - Izús, G.G., R.R. Deza y A.D. Sánchez, Physica A **388**, 967 (2009). <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2008.11.031>
- 3 - Sánchez, A.D. y G.G. Izús, Physica A **389**, 1931 (2010). <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2010.01.013>
- 4 - dellErba, M.G., G. Cascallares, A.D. Sánchez y G.G. Izús, Eur. Phys. J. B **87**, 82 (2014). <http://dx.doi.org/10.1140/epjb/e2014-41029-2>
- 5 - Sánchez, A.D, G.G. Izús, M.G. dellErba y R.R. Deza, Phys. Lett. A **378**, 1579 (2014). <http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2014.03.048>
- 6 - Savino, G.V. y C.M. Formigli, AIP Conf. Proc. **913**, 170 (2007). <http://dx.doi.org/10.1063/1.2746743>
- 7 - Savino, G.V., C.M. Formigli y R.R. Deza, RPIC **12** (2007).
- 8 - Savino, G.V. y C.M. Formigli, BioSystems **97**, 9 (2009). <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystems>.