

---

# Un Oscilador Electrónico Analógico de Ráfagas

Guillermo V. Savino, Carlos M. Formigli y Ana M. Juarez Fernández

*Utilizando la no linealidad del viejo y “conocido” transistor bipolar es posible reproducir las oscilaciones complejas de los potenciales eléctricos de las neuronas.*

Se describe el funcionamiento de un circuito electrónico analógico (*burster*) que principalmente oscila en forma de ráfagas (*bursting*) de manera estable y segura, y también como un oscilador astable, en forma pulsante (*spiking*) y como un oscilador excitable, para lo cual utiliza la no linealidad de dos transistores bipolares como únicos elementos activos. El circuito ha sido pensado como un modelo electrónico de las oscilaciones en forma de ráfagas de los potenciales de las neuronas. Aventaja a los modelos electrónicos conocidos por su sencillez lo que permitiría identificar y entender los mecanismos electrofisiológicos que generan las oscilaciones de ráfagas. Este circuito también podría constituirse en la unidad básica para armar redes neuronales.

Palabras clave: oscilación de ráfaga, sistema dinámico no lineal, bifurcaciones, sistema excitable, neurona.

---

## *An Analog Electronic Bursting Oscillator*

*We show experimentally that bursting oscillator circuits can be greatly simplified by using the nonlinear characteristics of only two bipolar transistors. Our circuit oscillates as an intrinsic, stable and safe burster in a broad range of the parameters, and also as a relaxation (astable), spiking and excitable oscillator. Since the circuit qualitatively mimics neurons bursting activity with adaptation, perhaps it is not only a caricature but a realistic model, helpful for the understanding of the bursting electrophysiological mechanism and as the basic unit for building neural networks.*

*Key words: burster, nonlinear oscillator, excitable system, neuron model*

## Introducción

Aunque las oscilaciones en forma de ráfagas (ODR) o *bursting* deben haber sido observadas en algunos circuitos no se conocen aplicaciones electrónicas o que hayan sido relacionadas con los potenciales de las neuronas. Hay varios tipos de neuronas, por ejemplo las del hipocampo, de la figura 1A, **Rinzel and Ermentrout** (1989), cuyo potencial de membrana, por motivos aún desconocidos, oscila en ráfaga lo que sería fundamental en el procesamiento de la información que realiza el cerebro para sus funciones cognitivas y de control **Rinzel and Ermentrout** (1989). En el año 2004 se publicó en libro, **Coombes and Bressloff** (2005), totalmente dedicado a las oscilaciones de ráfagas en el cerebro, sus modelos matemáticos y electrónicos y los

mecanismos electrofisiológicos involucrados. En la ODR, como las mostradas en las figuras 1 y 3, alternan casi periódicamente un tren de pulsos rápidos espaciados  $T_s$ , durante el tiempo  $T_r$  y un tiempo  $T_d$  de inactividad u oscilaciones muy pequeñas y lentas, **Wang and Rinzel** (1995). Los cambios de los intervalos  $T_s$  durante la ráfaga, observados en las neuronas y sus modelos, figura 1, se denominan efecto o fenómeno de *adaptación*. Los actuales osciladores de ráfagas o *bursters* electrónicos analógicos utilizados para modelar las oscilaciones del potencial de las neuronas son implementaciones electrónicas de modelos matemáticos. Para realizar las operaciones matemáticas utilizan amplificadores, sumadores, multiplicadores, etc. por lo que sus

circuitos resultan complicados, voluminosos y faltos de analogías con los elementos de la neurona real, **Simoni et al.** (2004), **Laflaquière et al.** (1997), **Le Masson et al.** (1999). Aunque estos circuitos reproducen fielmente las ODR, no son adecuados para identificar y explicar los mecanismos dinámicos que la producen. Por este motivo, un circuito electrónico sencillo que reproduzca sólo cualitativamente las ODR de la figura 1 pero que permita entender cómo se originan, sería un modelo de la neurona mejor que los actuales, **Izhikevich** (2000).

En este trabajo presentamos y explicamos el funcionamiento de un oscilador electrónico analógico sencillo, que utiliza la característica no lineal de dos transistores para generar oscilaciones de ráfagas con adaptación.

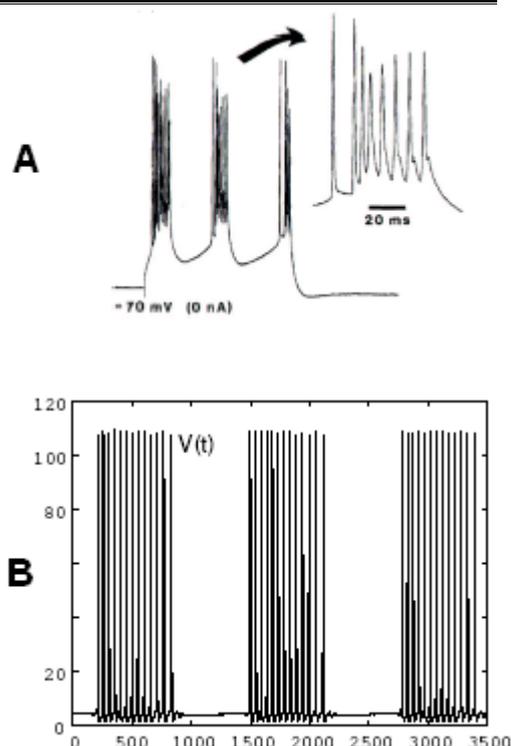


Fig. 1 Actividad u oscilaciones de ráfaga. **A.** El potencial de membrana de una “*thalamocortical relay neuron*”. **B.** Solución numérica del modelo matemático de **Hodgkin and Hukley** (1952) de la neurona. Figura modificada de **Izhikevich** (2004)

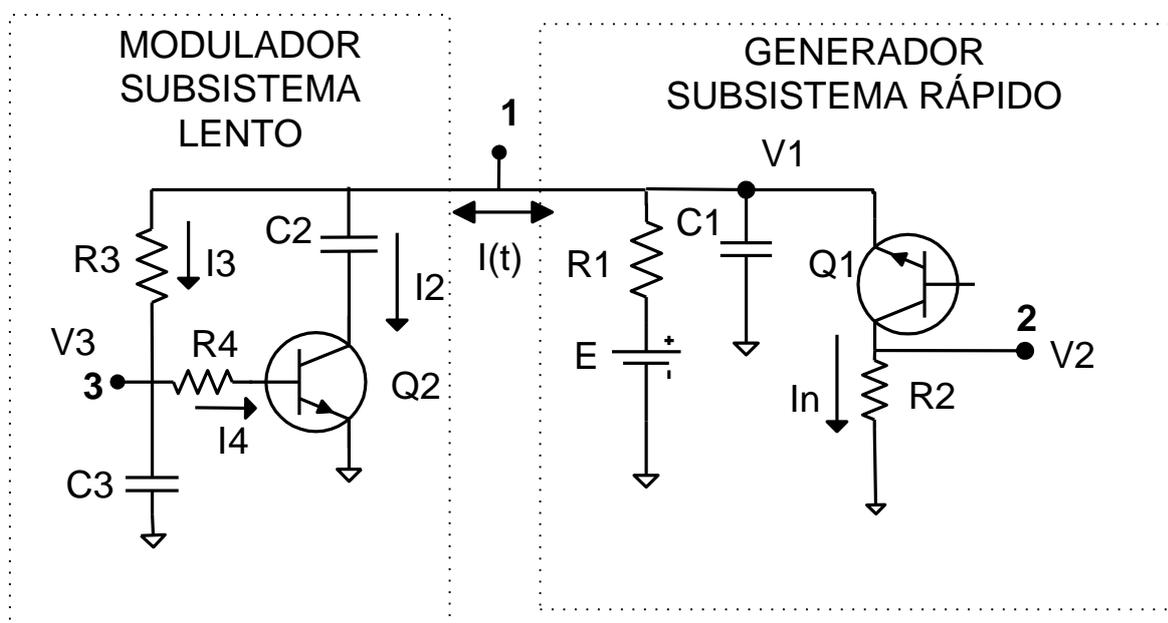


Fig. 2 Circuito del oscilador electrónico de ráfagas o “*burster*”, resistores en  $K\Omega$  y capacitores en  $\mu F$ .  $E=11 V$ ,  $R2=0.1$ ,  $C1= 1$ ,  $R1=33$ ,  $Q1$  y  $Q1$  transistor BC547,  $C2=10$ ,  $R3=200$ ,  $R4= 3.3$ ,  $C3= 2.2$

### Descripción general del circuito electrónico

El circuito oscilador de la figura 2 tiene dos bloques; el Generador y el Modulador. Las ondas de la figura 3 han sido medidas en los bornes 1, 2, 3 y el colector del transistor Q2. Todas indican que el circuito, armado con los componentes de la figura 2, autooscila en forma de ráfagas como un "burster" intrínseco para  $100 < R_3 < 300 \text{ K}\Omega$ . También puede oscilar como un astable para  $R_3 > 500 \text{ K}\Omega$ , en forma pulsante (spiking) para  $50 < R_3 < 100 \text{ K}\Omega$  y como un oscilador excitable de período infinito (responde con una oscilación a cada pulso externo supraumbral) para  $R_3 < 50 \text{ K}\Omega$ . La forma de las ondas y el rango de  $R_3$  en que se produce cada tipo de oscilación o comportamiento del circuito se muestran en las figura 5 y 6.

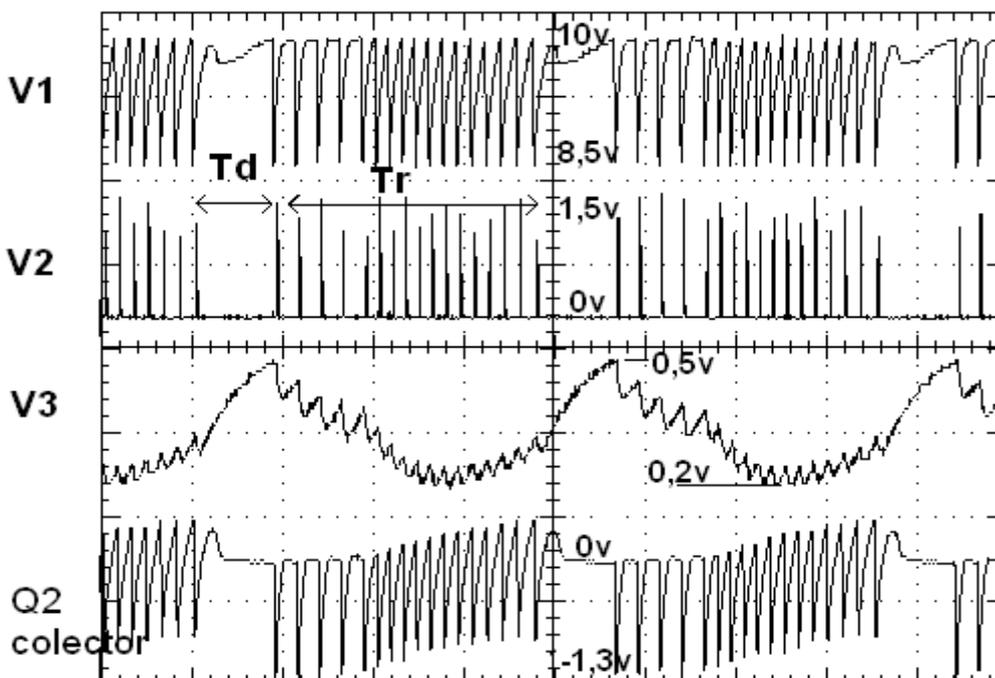


Fig. 3 Oscilaciones de ráfaga (*bursting*) del circuito de la figura 2, medidas en los bornes 1, 2, 3 y el colector del transistor Q2. Las tensiones están indicadas en voltios y la escala de tiempo 25 ms/div. Notar que los intervalos entre descargas dentro de la ráfaga no son iguales, su cambio se denomina fenómeno de *Adaptación* y ha sido observado en las neuronas reales formando diferentes patrones.

### El subsistema rápido o Generador

Este circuito es un típico oscilador de resistencia negativa u oscilador de relajación, descrito en la literatura electrónica desde los tiempos de las válvulas de vacío e inicios del transistor **Strauss** (1960). En este caso la resistencia negativa está implementada por la ruptura en baja tensión o disparo por avalancha del transistor Q1, que trabaja polarizado inverso, en el tercer cuadrante de su curva característica tensión-corriente de colector-emisor de la figura 4A, donde,  $V_{th}$  es la tensión emisor-colector umbral de avalancha e  $I_m$  es la corriente umbral de corte o corriente mínima para mantener el estado de conducción por avalancha del transistor. El Generador puede ser analizado como un sistema dinámico bidimensional, igual que el oscilador de Van der

Pol o el modelo matemático de FitzHugh-Nagumo, **FitzHugh** (1961), **Nagumo et al.** (1962), **Binczak et al.** (2006). Su dinámica y su funcionamiento puede entenderse geoméricamente en el plano de las fases de la figura 4C, ubicando y caracterizando la estabilidad de los equilibrios y ciclos límites.

Con el Generador aislado del Modulador, la corriente  $I(t)=0$  y no hay modulación. Para simplificar más el análisis consideramos que  $R_2=0$  ( $R_1 \gg R_2$ ) con lo que resulta  $V_1=V_{ec}$ . Además, la curva característica tensión-corriente ( $V_{ec}$  vs  $I_n$ ) de Q1, permanece fija porque el terminal de la base está desconectado. Así, la corriente de avalancha  $I_n$  solamente es función de la tensión  $V_1$ .

En estas condiciones, el Generador puede autooscilar debido a las singularidades de la curva ( $V_{ec}$  vs  $I_n$ ) y basta una sola ecuación diferencial no lineal para describir su dinámica, ecuación que resulta de sumar las tres corrientes en el nodo 1,  $I_c(t) = I_1(t) - I_n(V_1)$  que valen

$$C_1 \frac{dV_1(t)}{dt} = \frac{(E - V_1(t))}{R_1} - I_n(V_1) \quad (1)$$

Donde  $V_1$  e  $I_n$  son las variables dinámicas, los equilibrios del sistema dinámico se obtienen

para la condición  $C \frac{dV_1(t)}{dt} = 0$ .

De la (1) resulta:

$$I_n(V_1) = \frac{E}{R_1} - \frac{1}{R_1} V_1(t) \quad (2)$$

trabajando en el tercer cuadrante, que se han medido para dos transistores comunes y están mostradas en la figura 4A. El miembro de la derecha es una recta con pendiente  $-1/R_1$  y ordenada en el origen  $E/R_1$ . Un esquema ampliado del plano de las fases ( $V_1$  vs  $I_n$ ) del sistema dinámico (1) se muestra en la figura 4C, donde la tensión  $V_1$  de la ecuación (2) queda en función de la corriente  $I_n$ . Las intersecciones de la recta y la curva del transistor en el plano indican el número y posición de los equilibrios y los ciclos límites del sistema dinámico no lineal (1). En estas condiciones, tanto los equilibrios como los ciclos límites y su estabilidad solo estarán determinados por la posición de la recta, también llamada recta de carga,

$$V_1(t) = E - R_1 \cdot I_n(t) \quad (3)$$

El miembro izquierdo es la curva característica tensión-corriente ( $V_{ec}$  vs  $I_n$ ) del transistor Q1

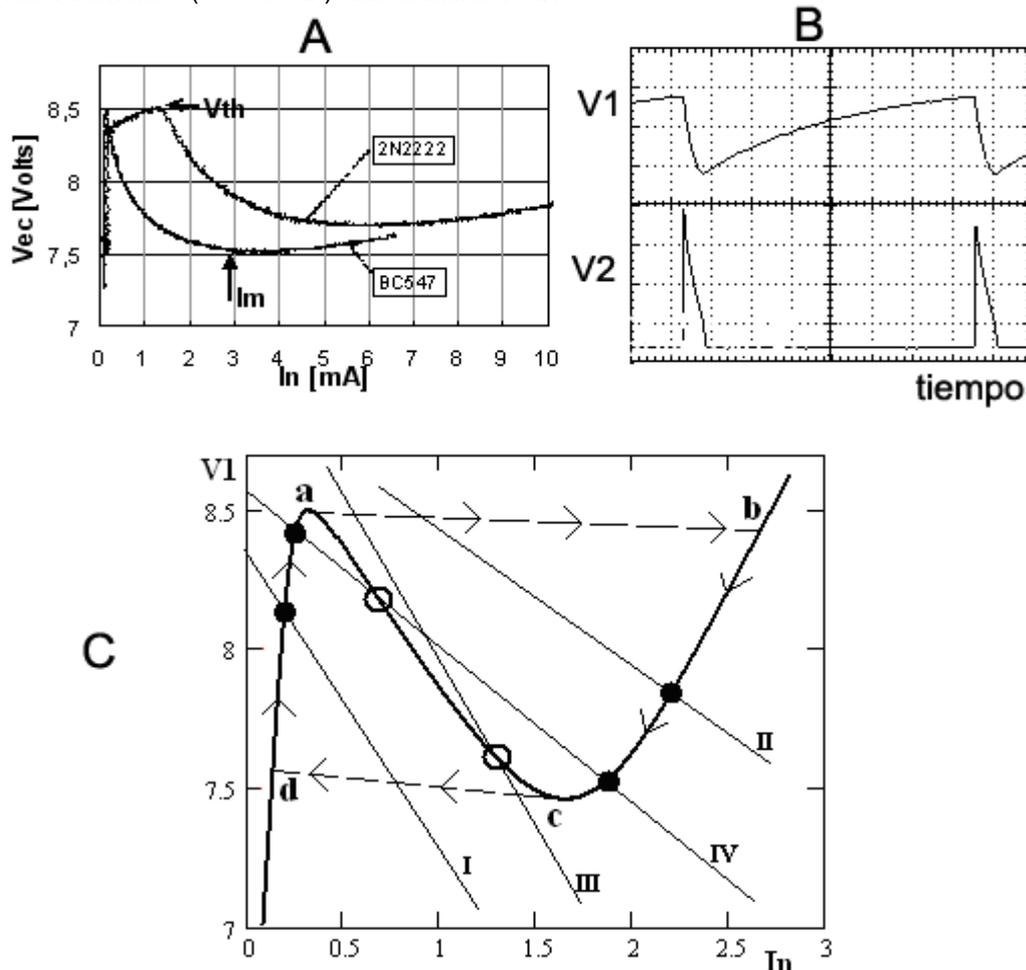


Fig. 4 Dinámica bidimensional del Generador. En **A** curvas tensión emisor-colector vs corriente de colector medidas para los transistores bipolares 2N2222 y BC547.  $V_{th}$  tensión de disparo por avalancha y corriente  $I_m$  mínima para sostener la avalancha de Q1. **B:** oscilador de resistencia negativa (astable), recorre el ciclo límite **abcd** esquematizado en el retrato de las fases (phase

portrait) de la figura C. Las intersecciones marcadas con círculos llenos corresponden a equilibrios estables y las vacías a equilibrios inestables.

Es evidente que, solamente dos parámetros, la tensión de la batería E y la resistencia R1 controlan la posición de la recta (3) y con ello la dinámica del Generador. En la figura 4C se muestran cuatro rectas que determinan cuatro comportamientos, dinámicas o formas de oscilar del Generador. Experimentalmente se ha comprobado que los equilibrios de las rectas I y II son estables cuando no están cerca de los codos de la curva y en ambos casos el circuito se comporta como un oscilador excitable: para la recta I el transistor Q1 está en corte (no

conduce) y para la recta II en conducción por avalancha. Para la recta III el único equilibrio es inestable y el circuito oscila con período  $T_s$  por el ciclo límite estable indicado como **abcd**. En el caso de la recta IV hay tres equilibrios, lejos de los codos de la curva los equilibrios externos son estables y el del medio inestable; en este caso el circuito se comporta como biestable, esto es: aplicando pulsos externos adecuados puede pasar y permanecer en uno de los equilibrios.

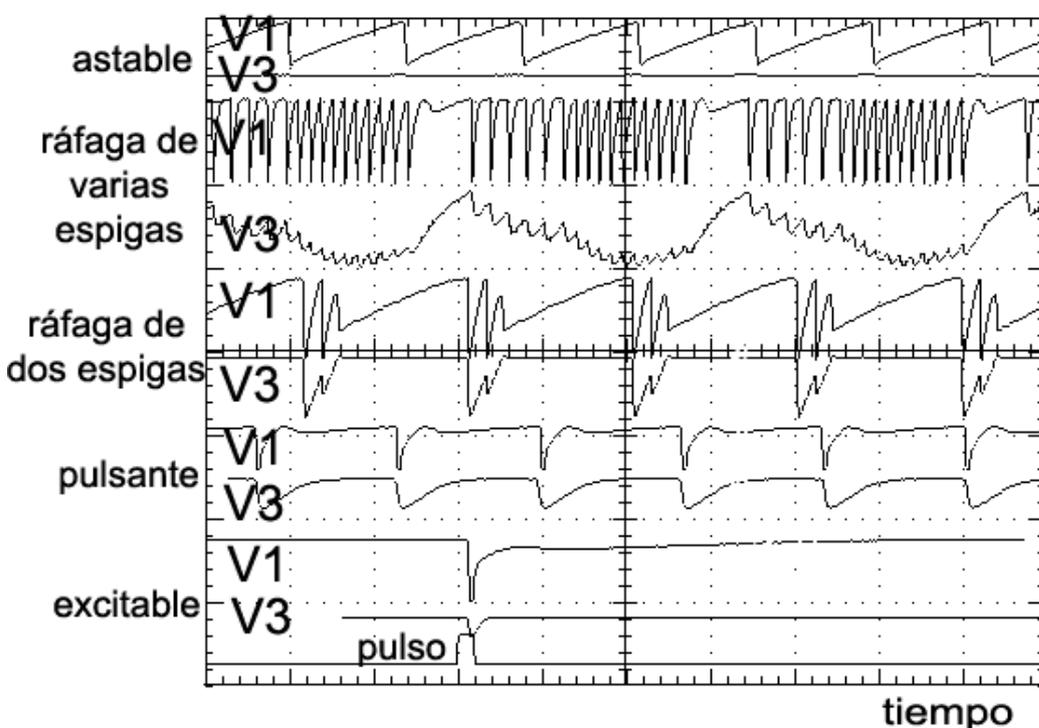


Fig. 5 Ondas V1 y V3 de los diferentes modos de oscilar del circuito, obtenidas variando la resistencia R3 en el rango  $20K\Omega < R3 < 400K\Omega$ . El pulso supraumbral mostrado para el caso de oscilador excitable dispara solamente una oscilación

### El subsistema lento o Modulador

En otros osciladores de ráfaga del tipo *fast-slow burster* Hoppenstead (1997) como es el circuito de Kanazawa (2004) un oscilador lento modula a uno rápido. Lo que hace a nuestro circuito radicalmente diferente de estos es que el bloque Modulador no es un oscilador, ya que aislado no puede autooscilar. Sin embargo, conectado con el Generador interaccionan oscilando en forma de ráfagas con adaptación. La interacción no es trivial, sino propia de la dinámica no lineal del circuito, puesto que no sólo se limita a intercalar la pausa  $T_d$  en las oscilaciones del Generador,

sino que además produce la *adaptación*, esto es, los intervalos  $T_s$  entre las descargas de la ráfaga no son iguales y pueden seguir patrones de adaptación. Como se dijo antes, la *adaptación* es un fenómeno de las oscilaciones de ráfagas de las neuronas y sus modelos matemáticos.

La interacción entre ambos bloques se realiza mediante la corriente moduladora  $I(t) \neq 0$ . Visto el circuito como un sistema dinámico, el efecto modulador de la corriente  $I(t)$  se debe a que adiciona dos variables dinámicas, la tensión en el

capacitor C2 y la tensión V3. La dimensión del sistema aumenta de dos a cuatro, lo que hace posible que el circuito oscile de forma más compleja como son las ráfagas con adaptación. Ahora, la ecuación (1) queda:

$$C \frac{dV_1}{dt} = \frac{(E - V_1)}{R1} - I_n + I(t) \quad (4)$$

Donde  $I(t) = I_3(t) + I_2(t)$ ,  $I_3(t)$  es la corriente por R3 y  $I_2(t)$  la corriente por C2 y como ambas son funciones de las tensiones V1 y V3 y del tiempo, el análisis geométrico antes realizado en el plano de la figura 4C ya no es posible. Sin embargo, habiendo entendido el funcionamiento del Generador aislado y haciendo algunas simplificaciones, es posible entender cualitativamente una cuestión fundamental de las ODR, esto es: que la ráfaga empieza por un mecanismo “**voltaje dependiente**” y termina por un mecanismo “**tiempo dependiente**” ambos debidos a la modulación. Para entender la diferencia de estos mecanismos,

experimentalmente se ha observado que la corriente

$$I_3(t) = (V_1 - V_3) / R_3 \quad (5)$$

Es aproximadamente constante y suficientemente pequeña ( $I_3(t) \approx 20 \mu A \ll I_1(t)$ ) como para que sola no cambie la forma de oscilar del Generador. De las ondas “colector de Q2” y V1 en la figura 3, puede deducirse que durante todo el intervalo de pausa  $T_d$  el transistor Q2 permanece saturado (tensión colector emisor casi cero). Pero durante el intervalo de ráfaga  $T_r$ , el estado de Q2 depende de Q1, esto es: queda inverso o cortado (dependiendo de la carga en C2) mientras Q1 conduce en avalancha, y cortado cuando Q1 no conduce. Por lo tanto, durante la pausa C2 se carga en paralelo con C1 por R1, siendo la constante de tiempo  $(C_1 + C_2) \cdot R_1$ . Pero durante la ráfaga, C2 queda desconectado de masa y solamente puede descargarse parcialmente durante cada pulso de la ráfaga por el lazo que llamamos la “**mallá de adaptación**”, formada por C3, R4, la juntura base-colector de Q2, el transistor Q1 y la resistencia R2.

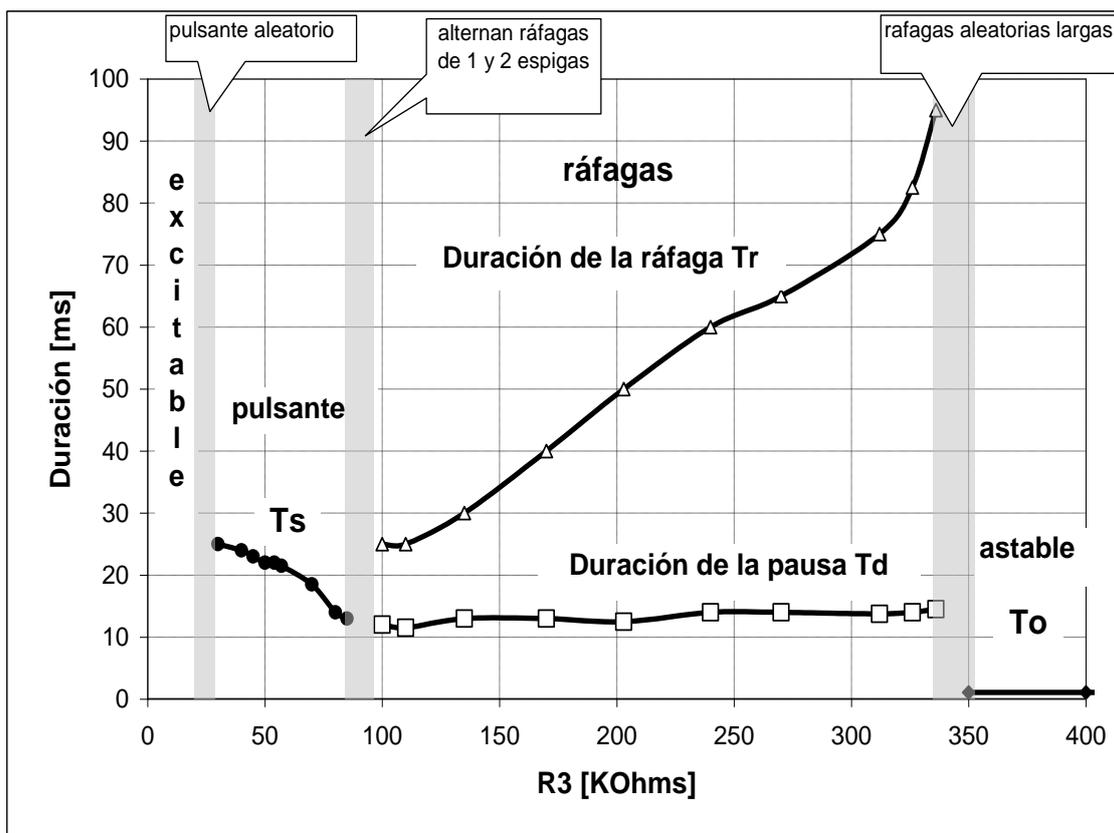


Fig. 6 Rangos de R3 correspondientes a las oscilaciones de la Figura 5. El período  $T_o \approx 2$  ms,  $T_r$  duración de la ráfaga,  $T_d$  duración de la pausa y  $T_s$  período del modo pulsante (spiking). En las zonas sombreadas la oscilaciones son inestables

Así, una ráfaga se inicia con la primera descarga cuando la tensión  $V_1(t)$  alcanza el umbral  $V_{th}$  de avalancha de  $Q_1$ , y es esta primera descarga o pulso la que disminuye la tensión  $V_3$  haciendo que el estado de  $Q_2$  cambie de saturado a inverso.  $Q_2$  permanecerá inverso o cortado hasta que la tensión  $V_3$  recupere (por  $R_3$ ) el valor de saturación poniendo fin a la ráfaga. Por lo tanto, el inicio de cada ráfaga está determinado por un fenómeno de umbral de tensión o “**voltaje dependiente**” como es la condición  $V_1 > V_{th}$ . Pero la ráfaga se mantiene mientras  $Q_2$  permanece inverso o cortado y termina cuando  $Q_2$  cambia a saturado lo que determina la terminación de la ráfaga. Esto ocurre cuando la tensión  $V_3$ , que disminuyó en la primera descarga sacando de saturación a  $Q_2$ , recupera el valor que tenía antes del inicio de la ráfaga saturando nuevamente a  $Q_2$ . Este es un mecanismo que depende del tiempo de recuperación de la tensión  $V_3$ , o sea es un fenómeno “**tiempo dependiente**” que pone fin a cada ráfaga. En el circuito es posible entender este mecanismo. Para que  $Q_2$  sature se deben cumplir dos condiciones: que esté polarizado directo y que la corriente por su base  $I_4(t)$  sea mayor que la corriente de colector dividida por la ganancia de corriente  $\beta$ , ( $I_4(t) > I_2(t)/\beta$ ). En la figura 3, de la onda “colector de  $Q_2$ ” durante la ráfaga se ve que la tensión del colector de  $Q_2$  es negativa mientras  $Q_1$  conduce y va disminuyendo monótonamente con cada pulso de la ráfaga hasta alcanzar valores positivos que polarizan directo a  $Q_2$  al final de la misma. Sin embargo  $Q_2$  permanece cortado, pasará a activo y luego a saturado según sea el valor de la corriente por su base que para los estados cortado y saturado es igual a  $I_4(t)$  y depende de la tensión  $V_3$  según

$$I_4(t) = (V_3 - 0.2)/R_4 \quad (6)$$

La tensión  $V_3$  tiene la forma escalonada mostrada en la figura 3 y cada escalón se corresponde con cada pulso de la ráfaga. Así, cuando  $Q_1$  conduce en avalancha  $Q_2$  queda polarizado inverso habilitando la “**mallá de adaptación**” por la que  $C_3$  se descarga parcialmente haciendo que  $V_3$  disminuya casi verticalmente un escalón. Pero cuando  $Q_1$  no conduce  $Q_2$  queda polarizado directo pero en corte y  $C_3$  recupera carga por  $R_3$  haciendo que  $V_3$  aumente casi linealmente ( $I_3 \sim 20 \mu\text{Amp}$  constante). En las primeras descargas de la ráfaga, la tensión  $V_3(t)$  disminuye desde aproximadamente de 0.5 V hasta 0.2 V porque  $C_3$  pierde (por la mallá adaptación) más carga de la que recupera por  $R_3$ . Esto se invierte después del punto de inflexión y  $V_3(t)$  aumenta porque  $C_3$  recupera (por  $R_3$ ) más carga de la que pierde (por la mallá adaptación). Así  $V_3$  aumenta hasta alcanzar el valor inicial de aproximadamente 0.5 V

para saturar a  $Q_2$  poniendo fin a la ráfaga. De este modo, como el tiempo que dura la onda  $V_3(t)$  depende del balance de las corrientes  $I_3$  y  $I_4$ , este es el proceso “**tiempo dependiente**” que determina la duración de la ráfaga.

Los resultados muestran que el circuito de la figura 2, **oscila en forma de ráfagas por su dinámica no lineal intrínseca**, no por la interacción de dos osciladores como es el caso de **Kanazawa** (2004) o por alguna excitación externa. La resistencia  $R_3$  resulta un parámetro importante que regula el grado de interacción entre el Generador y el Modulador produciendo los distintos comportamientos o formas de oscilar de la figura 5.

Aunque las propiedades de excitabilidad de la neurona son reproducidas por numerosos modelos bidimensionales, las complejas oscilaciones de ráfagas solamente son reproducidas por los modelos más complicados, como el de **Hodgkin and Huxley** (1952) y el de **Hindmarsh and Rose** (1982). Aunque nuestro circuito no reproduce fielmente la forma de los potenciales de acción de la neurona como los dos modelos matemáticos citados, sí reproduce cualitativamente las ráfagas, y lo hace preservando la dinámica del modelo **Hodgkin and Huxley** (1952). Además como nuestro circuito ha sido pensado desde la electrónica resulta electrónicamente más simple que todas las implementaciones electrónicas de los modelos matemáticos. Para estudios teóricos se puede utilizar el modelo matemático de nuestro circuito que simplemente son las ecuaciones de cada mallá, el ajuste de una función matemática para la curva tensión-corriente medida, figura 4<sup>a</sup>, del transistor  $Q_1$  y la utilización el modelo de **Ebers and Moll** (1954) para el transistor  $Q_2$ .

## Conclusiones

El circuito descrito es un nuevo tipo de oscilador electrónico aplicable en el modelado de la dinámica eléctrica de la neurona y otros sistemas excitables. Tiene la ventaja de ser simple y robusto, en el sentido que no hace falta sintonizar los componentes para que oscile en ráfagas de manera estable y segura. Ha mostrado insensibilidad a los niveles normales de ruido eléctrico en el laboratorio y a los cambios de los componentes (parámetros) por variaciones de la temperatura ambiente. Sin embargo, la característica que hace a nuestro oscilador de ráfagas diferente a todos los conocidos es la interacción o modulación no trivial entre el bloque Modulador y el Generador, que no solamente produce el intervalo de pausa  $T_d$  entre ráfagas

sino que también hace que los intervalos entre espigas Ts dentro de la ráfaga tengan *Adaptación*, esto es; puedan alargarse, acortarse o ambas cosas (figura 3) como los observados en las neuronas reales (figura 1 A) y sus modelos (figura 1 B).

Nuestro circuito satisfaría, al menos parcialmente, una necesidad práctica; citando las palabras de **Izhikevich** (2006), “*al presente no hay un modelo físico de la neurona que permita explicar como se inicia y termina una ráfaga*”. Nuestro circuito hace posible entender que son mecanismos diferentes los que generan una ráfaga: se inicia (el primer pulso) por un fenómeno de umbral que tiene lugar solamente en el bloque Generador cuando  $V_1 > V_{th}$  y termina por un fenómeno temporal que ocurre solamente en el bloque Modulador cuando Q2 satura. La identificación y el entendimiento de los mecanismos “**voltaje y tiempo dependientes**” de las ODR facilitará el estudio del tipo de bifurcaciones involucradas **Strogatz** (1994). Quizás la misma dinámica observada en el circuito ocurre, en diferentes escalas de tiempo, corriente

y voltaje, en los fenómenos electrofisiológicos que determinan el inicio y el fin de la actividad de ráfagas de las neuronas reales.

Finalmente, nuestro oscilador de ráfagas podría ser la unidad básica para armar redes neuronales con tecnologías de integración en gran escala (VLSI) y estudiar fenómenos de sincronización, autoorganización y sincronización mediada por ruido. Sólo a modo de conjetura pueden plantearse analogías funcionales con la neurona y la arquitectura de red del cerebro. Al borne 1 del Generador (soma o núcleo de la neurona), pueden conectarse numerosos Moduladores (dendrita) y un cable (axón) desde el borne 2 para conectar a otros osciladores semejantes. En el cerebro, en promedio,  $10^4$  dendritas conectadas al soma modulan su actividad eléctrica. De la misma forma, en el circuito la corriente  $I(t)$  total aportada por múltiples moduladores (dendritas) modularía las oscilaciones del Generador (soma).

## Referencias

- Binczak, A. et al.** (2006) “Experimental study of electrical FitzHugh-Nagumo neurons with modified excitability”, *Neural Networks*, Vol. 19, pp. 662-670.
- Coombs**, (2005) *Bursting. The Genesis of Rhythm in the Nervous System*, edited by World Scientific Publishing Co., ISBN 981-256-506-X.
- Hebers, J.J. and Moll, J.L.** (1954) “Large-Signal Behavior of Junction Transistors”, *Proc. IRE*, Vol. 42, pp.1761-1772.
- Ermentrout, G.B. and Kopell, N.** (1986) “Sub-cellular Oscillations and Bursting”, *Mathematical Biosciences*, Vol 78, pp. 265-291.
- Ermentrout, G.B. and Kopell, N.** (1986) “Parabolic bursting in an excitable system coupled with a slow oscillation”. *SIAM-J.-Appl.-Math.*, Vol. 46, N° 2, pp. 233-253.
- FitzHugh, R.** (1961) “Impulses and physiological states in models of nerve membrane”. *Biophys. J.*, Vol. 1, pp. 445-466.
- Hindmarsh, J.L. and Rose R.M.** (1982) “A model of the nerve impulse using two first-order differential equations”. *Nature* Vol. 296, pp. 162-164.
- Hodgkin, A.L. and Huxley, A.F.** (1952) “A quantitative description of membrane current and application to conduction and excitation in nerve”. *Journal Physiol.*, Vol. 117, pp. 500-544.
- Hoppenstead, F.C. and E.M. Izhikevich** (1997) *Weakly Connected Neural Networks*, Springer-Verlag, New York.
- Izhikevich, E.M.** (2000) “Neural Excitability, Spiking and Bursting”. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 10, pp. 1171-1266.
- Izhikevich, E.M.** (2006) *Dynamical Systems in Neuroscience. The Geometry of Excitability and Bursting*, MIT, Cambridge, MA.
- Kanazawa, Y., Asai, T., Hirose and Amemiya, Y.** (2004) “A MOS circuit for bursting neural oscillators with excitable oregonators”, *IEICE Electronic Express*, Vol. 1, No 4, pp. 73-76.
- Laflaquière, A. et al.** (1997) “Analog circuit emulating biological neuron in real time experiment”, *Proc. IEEE/EMB*, oct. 30, nov. 2.
- Le Masson, S. et al.** (1999) “Analog Circuits for modeling biological neural networks: design an applications”. *IEEE Trans on Biomedical Eng.*, Vol 46, N° 6.
- Nagumo, J.S. et al.** (1962) “An active pulse transmission line simulating nerve axon”. *Proc. IRE*,

Vol. 50, pp. 2061-2070.

**Rinzel, J. and Ermentrout, G.B.** (1989) Analysis of neural excitability and oscillations, in: *Methods in Neuronal Modeling: From Synapses to Networks*, (eds., C. Koch and I. Segev), MIT Press, Cambridge, MA.

**Simoni, M.F. et al.** (2004) "A multiconductance silicon neuron with biologically matched dynamics", *IEEE, Trans on Biomed. Eng.*, Vol. 51, Nº 2.

**Strauss, L.** (1960) *Wave generation and shaping*, McGraw-Hill Co., Inc.

**Strogatz, S.H.** (1994) *Nonlinear Dynamics and Chaos*, ed. Addison-Wesley Pub. Co.

**Wang, X. and Rinzel, J.** (1995) Oscillatory and bursting properties of neurons, in: *Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, (ed., M.A.Arbib), MIT Press, Cambridge, MA. pp. 686-691.

---

Este trabajo se realizó en el Laboratorio de Técnicas Digitales, Cátedra de Sistemas Dinámicos no Lineales, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.

El presente artículo fue escrito en el mes de octubre de 2006.

---

### **Guillermo V. Savino**

Ingeniero Electricista Orientación Electrónica y Bachiller Universitario en Física graduado en la FACET, UNT. Actualmente Profesor Asociado, director del Laboratorio de Técnicas Digitales del Depto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, FACET, UNT. Investigador del CONICET, socio de la Asociación Física Argentina y miembro del IEEE.

[gsavino@herrera.unt.edu.ar](mailto:gsavino@herrera.unt.edu.ar).

### **Carlos Manuel Formigli**

Ingeniero Electrónico graduado en la FACET, UNT. Jefe de Trabajos Prácticos en la Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia de la UNT, Auxiliar Docente de Primera Categoría en el Laboratorio de Técnicas Digitales del Depto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, FACET, UNT.

[cmformigli@fbqf.unt.edu.ar](mailto:cmformigli@fbqf.unt.edu.ar).

**Ana María Juarez Fernández** Ingeniera Electrónica graduada en la FACET, UNT. Profesora Titular en la Universidad Tecnológica Nacional Regional Tucumán. Profesora Adjunta del Laboratorio de Técnicas Digitales del Depto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, FACET, UNT. Miembro del IEEE a cargo de la Rama Estudiantil de la UNT.

[ajuarezfernandez@herrera.unt.edu.ar](mailto:ajuarezfernandez@herrera.unt.edu.ar)