



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Informe Técnico

Estudio del efecto de los retardos axónicos en una columna tectal

**José Luis Pérez Silva
Antonio Garcés Madrigal**

17 de febrero de 2014

Modelos electrónicos de neuronas

Estudio del efecto de los retardos axónicos en una columna tectal

José Luis Pérez Silva, Antonio Garcés Madrigal

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico

Resumen

El interés que en la actualidad surge en torno de las redes neuronales artificiales, considerándolas como sistemas con capacidades computacionales, ha impulsado el estudio de la dinámica de este tipo de sistemas. Uno de los fenómenos que presenta un mayor interés de estudio es el fenómeno de memoria a corto plazo. El interés se debe a que la presencia de este fenómeno puede ser fácilmente asociada a la capacidad computacional de las redes neuronales, representada a través de los cambios en el comportamiento dinámico del estado interno de las neuronas ante perturbaciones externas. La memoria a corto plazo ha sido asociada con fenómenos de histéresis, y estos últimos han sido asociados con comportamientos dinámicos multiestables en los sistemas neuronales, los cuales pueden ser asociados a la respuesta del proceso computacional desarrollado, por lo que la capacidad computacional de los sistemas que presentan este fenómeno se ve enriquecida enormemente.

Ya hemos mostrado que en una neurona que presenta una inhibición propia, es decir, que su salida se conecte a la entrada sináptica, es posible lograr con cierta facilidad que se presente el fenómeno de memoria a corto plazo, sin embargo, al introducir un retardo en la respuesta de la neurona, las posibilidades del comportamiento dinámico de la respuesta de la neurona se diversifican, al introducir nuevas formas de comportamiento y permitiendo de alguna manera tener una forma modificar estos comportamientos, lo que representa el incrementar aún más la capacidad computacional de estos dispositivos.

En este reporte se presentan los resultados de los experimentos para conocer la importancia que tienen los retardos, entre las neuronas, en la estructura de la columna tectal simplificada de Lara y Arbib.

Para nuestro estudio usamos dos tipos diferentes de columna tectal, diferenciándolas fundamentalmente por el tipo de función de activación que cada neurona de la columna tiene. La salida de las neuronas serán ráfagas parabólicas.

Lo que se encontró fueron fundamentalmente que en apariencia existe un intercambio de los planos fases ante un intercambio de los retardos entre las neuronas, y que la razón de par o impar en los tiempos de retardo es una manera de cambiar los tipos de plano fase, el tipo de plano fase entre retardos pares y diferente que el tipo de plano fase entre los retardos par-impar.

Índice

Introducción	4
1. Estudio de la neurona con función de activación sigmoide	5
2. Resultados del estudio de la neurona con función de activación sigmoide e inhibición propia	7
3. Resultados del estudio de la neurona con función de activación sigmoide y respuesta con ráfagas.	12
4. Resultados del estudio de la neurona con función de activación sigmoide y respuesta con ráfagas con inhibición propia.	15
5. Resultados del estudio de la neurona con función de activación sigmoide y respuesta con ráfagas parabólicas con inhibición propia.	19
6. Modelo de columnas tectales empleadas	23
7. Columna tectal con funciones de activación sigmoide y rampa	25
8. Columna tectal con funciones de activación escalón	30
9. Columna tectal con funciones de activación rampa	37
Conclusiones	43
Referencias	43

Introducción

En una gran serie de experimentos realizados con diferentes estructuras de columnas tectales, los retardos axónicos se han empleado para definir los estados de memoria, ya que producen ciclos de histéresis, en las respuestas de las neuronas, lo que a su vez se ven como planos fase, o memorias a corto plazo. De entre los parámetros neuronales nos interesa estudiar el efecto del retardo axónico en el fenómeno de memoria a corto plazo (José Luis Pérez Silva *et al*, 2014). Cada parámetro neuronal es capaz de producir diferentes efectos en la respuesta neuronal. En el caso del retardo axónico (E. Mateos Santillán, J. L. Pérez Silva, 2009), produce cambios en la amplitud y la rapidez con que cambia la respuesta, así como en el retardo total de la respuesta y en la tendencia a oscilar de la misma.

Se han estudiado los efectos de las configuraciones de las funciones de activación de las neuronas y sus efectos en los procesos de memoria a corto plazo y evocación de las columnas tectales, pero no se ha estudiado los efectos de los retardos axónicos (A. Gamundí, G. *et al*, 2005) en estos procesos.

El retardo axónico es fundamental en ciertas interconexiones neuronales, ya que puede representar la distancia entre las neuronas de la columna tectal (Lara R, *et al*, 1982), así a mayor distancia tendremos mayor tiempo de retardo de las señales entre las neuronas, y a menor retardo una mayor cercanía entre ellas. De esta forma, ¿cual será la relación que existe entre los retardos y los efectos de memoria? Para estudiar esto usamos tres columnas tectales (J. L. Pérez Silva *et al*, 2012), la primera con funciones de activación sigmoide y escalón, en las neuronas, la segunda con las dos neuronas con función de activación escalón, y la tercera con funciones de tipo rampa en las dos neuronas. En ninguno de los casos las neuronas fueron integradoras. Esto se realizó para poder descartar en cualquier momento que las funciones de activación fueran las causantes de los efectos. Para enriquecer la información se emplearon funciones de respuesta de ráfagas parabólicas, es decir respuestas en forma de ráfagas de pulsos moduladas en amplitud por formas de onda cuadráticas. (S. M. Baer, *et al*, 1995).

Como consecuencia de la modificación del retardo axónico en la neurona los cambios en la respuesta generan cambios en la forma de la histéresis, la cual tiene efecto importante en el fenómeno de memoria a corto plazo.

Al realizar los experimentos nos percatamos de que existía un aparente intercambio de tipo de plano fase al intercambiar los retardos axónicos. Es decir, la razón entre los retardos cambia, el tipo de plano fase cambia. Para poder explorar lo anterior con mayor control, pusimos el retardo de la primera neurona en un valor alto y fuimos creciendo el valor del retardo de la segunda de una en una unidad, comenzando en un milisegundo, hasta alcanzar el valor del retardo de la primera neurona; lo mismo se realizó con la segunda neurona.

Entre los resultados encontrados tenemos que la razón de par o impar en los tiempos de retardo es una manera de cambiar lo tipos de plano fase, el tipo de plano fase entre retardos pares y diferente que el tipo de plano fase entre los retardos par-impar. Estudiamos también lo que pasaba cuando tenemos impar-par, o impar-impar.

En este reporte presentamos los resultados de nuestros experimentos.

1. Estudio de la neurona con función de activación sigmoide

Para que sea claro lo que vamos a analizar empezaremos por realizar el estudio de una neurona no integradora con función de activación sigmoide y respuesta todo o nada (Mc Culloch W.S., Pitts W.A., 1943). Vamos a dividir nuestro estudio en dos partes de interés, que son: El estudio de la neurona tal cual es, es decir tendremos una entrada triangular de periodo largo y será la única entrada de excitación de la neurona, y el segundo estudio contemplará una neurona en la cual se tiene una inhibición propia, entendido esto como que la neurona se auto inhibe, es decir su salida está conectada a una sinapsis inhibitoria..

En la figura 1 se muestra el diagrama esquemático de la neurona no integradora con función de activación sigmoide y respuesta todo o nada.

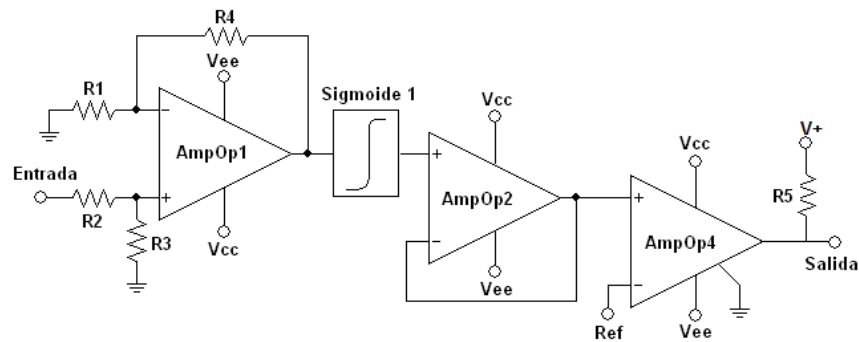


Figura 1. Diagrama esquemático de la neurona con función de activación sigmoide.

El esquemático que nos muestra la función de activación sigmoide contenida en el cuadro de la figura 1, se muestra en la figura 2.

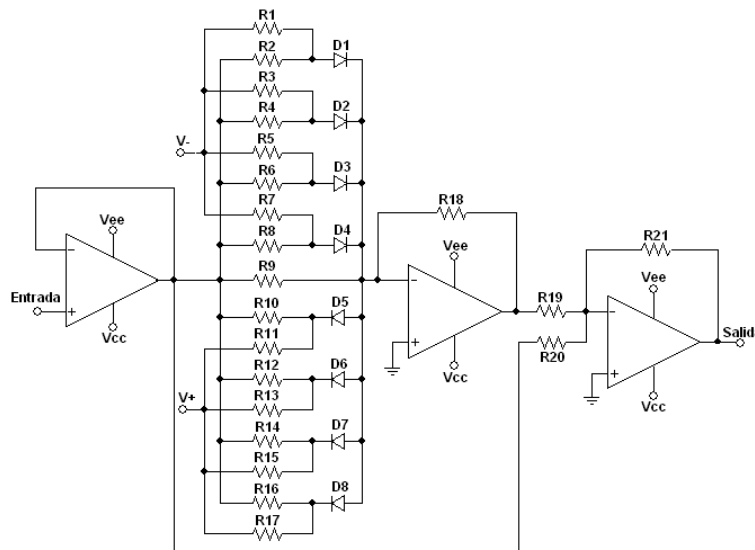


Figura 2. Esquemático de la función de activación sigmoide a trazos.

En la figura 3, se muestra el diagrama esquemático de la neurona no integradora, con función de activación sigmoide y una inhibición propia.

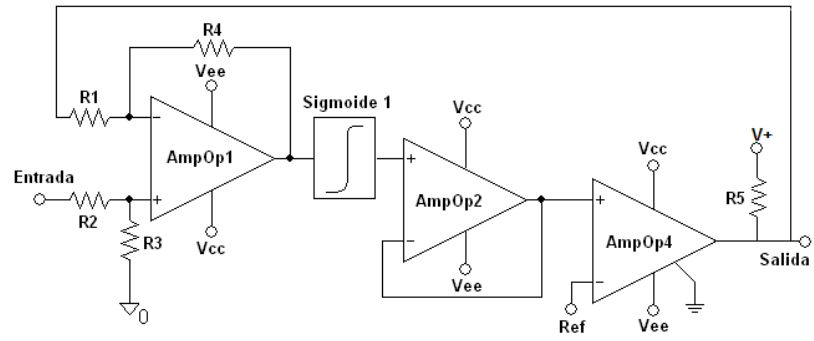


Figura 3. Diagrama esquemático de la neurona no integradora, con función de activación sigmoide y una inhibición propia.

2. Resultados del estudio de la neurona con función de activación sigmoide e inhibición propia

Para el estudio que vamos a realizar del modelo de neurona tenemos dos parámetros que podemos controlar en sus valores: La pendiente de la sigmoide y el tiempo de retardo de la inhibición propia. Otro elemento que podemos controlar es la forma de la función de salida es decir si tiene o no ráfagas parabólicas. Para realizar el estudio lo que tendremos son los siguientes elementos: la función de entrada será una triangular, la pendiente de la neurona será 0, y el retardo axónico será de 1ms. Los resultados obtenidos para este experimento se muestran en la figura 4.

Estos resultados se presentan de la siguiente manera: la primera gráfica corresponde a la señal de la Sigmoide, la segunda a la señal de salida y la tercera gráfica al espacio fase.

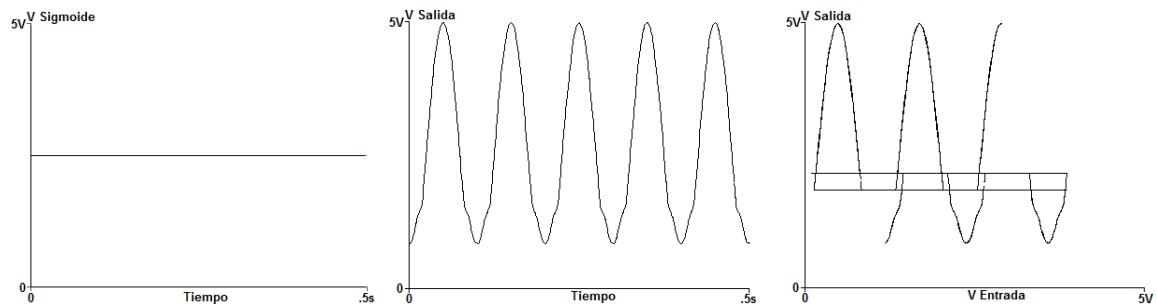


Figura 4. Resultados del primer experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de cero, y salida sin ráfagas parabólicas.

En los siguientes experimentos vamos a ir creciendo el valor de la pendiente de la sigmoide, por lo que en el siguiente tendremos un valor de 1. Los demás parámetros de la neurona se mantienen sin cambios. Los resultados se muestran en la figura 5.

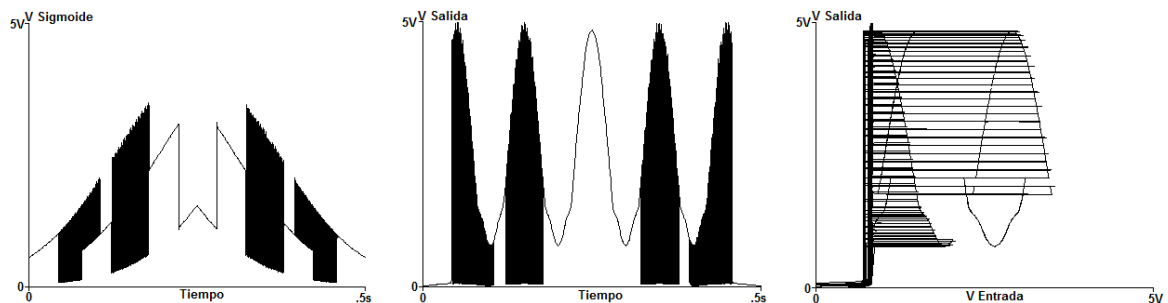


Figura 5. Resultados del primer experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de uno, y salida sin ráfagas parabólicas.

Seguimos creciendo el valor de la pendiente de la neurona, por lo que en el siguiente tendremos un valor de 2. Los demás parámetros de la neurona se mantienen constantes. Los resultados se muestran en la figura 6.

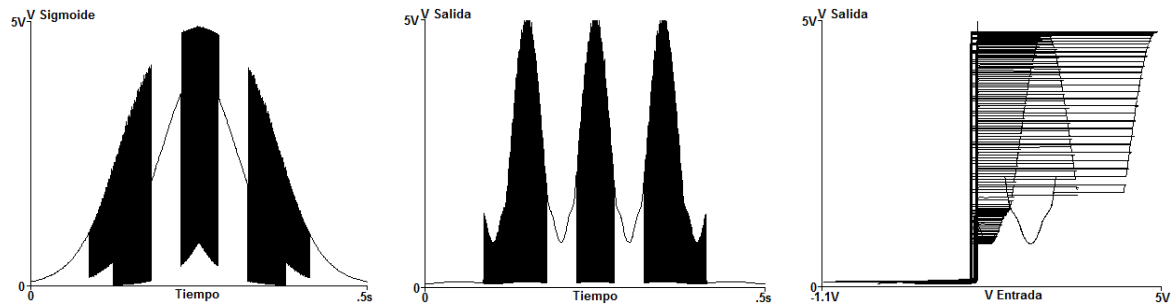


Figura 6. Resultados del primer experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de dos, y salida sin ráfagas parabólicas.

En el siguiente tendremos un valor de 3 para la pendiente. Los demás parámetros de la neurona se mantienen constantes. Los resultados se muestran en la figura 7.

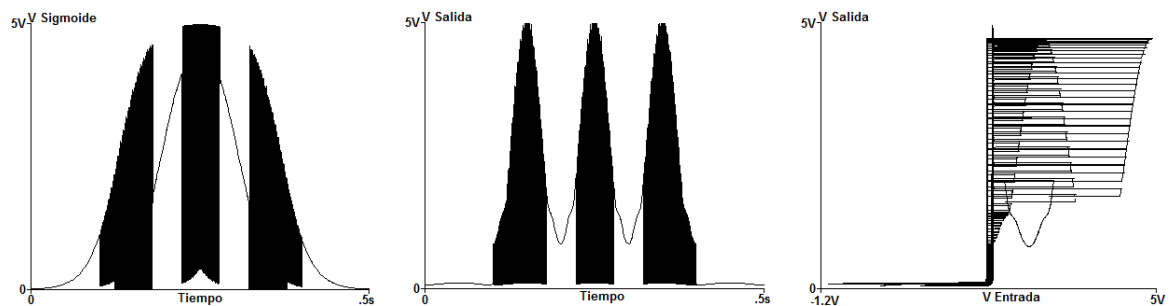


Figura 7. Resultados del primer experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de tres, y salida sin ráfagas parabólicas.

Seguimos creciendo el valor de la pendiente de la neurona y ahora tendremos un valor de 4. Los demás parámetros de la neurona se mantienen constantes. Los resultados se muestran en la figura 8.

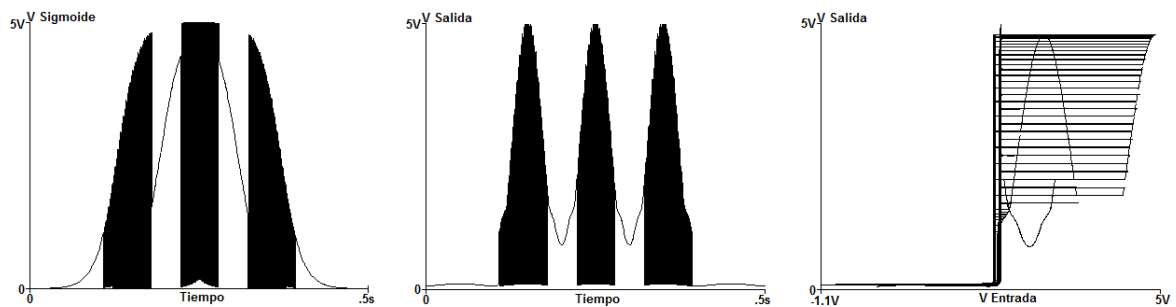


Figura 8. Resultados del primer experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de cuatro, y salida sin ráfagas parabólicas.

En los siguientes experimentos vamos a hacer la pendiente de la sigmoide negativa. En nuestro primer experimento la pendiente tendrá un valor de -1. Los resultados se muestran en la figura 9.

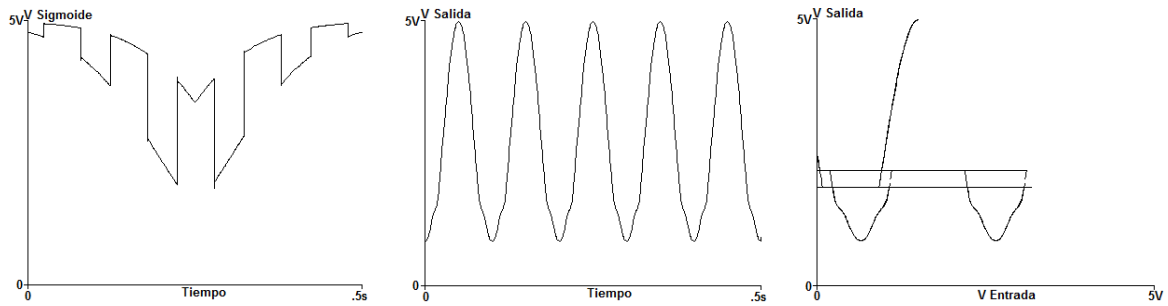


Figura 9. Resultados del experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de -1, y retardo de 1ms.

En nuestro siguiente experimento la pendiente tendrá un valor de -2. Los resultados se muestran en la figura10.

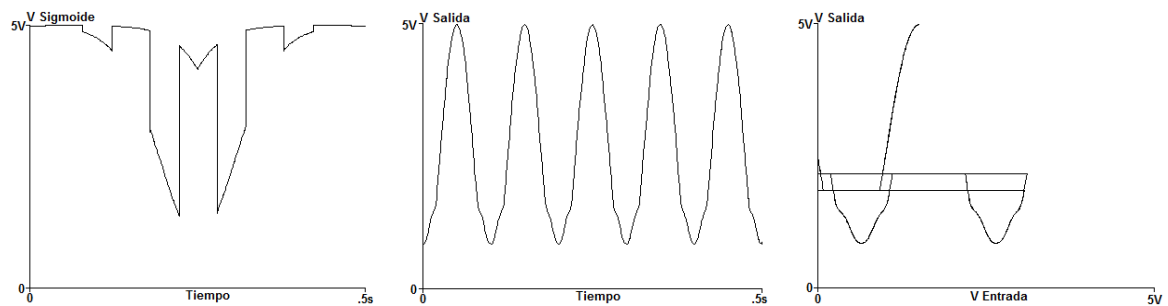


Figura 10. Resultados del experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de -2, y retardo de 1ms.

En nuestro siguiente experimento la pendiente tendrá un valor de -3. Los resultados se muestran en la figura11.

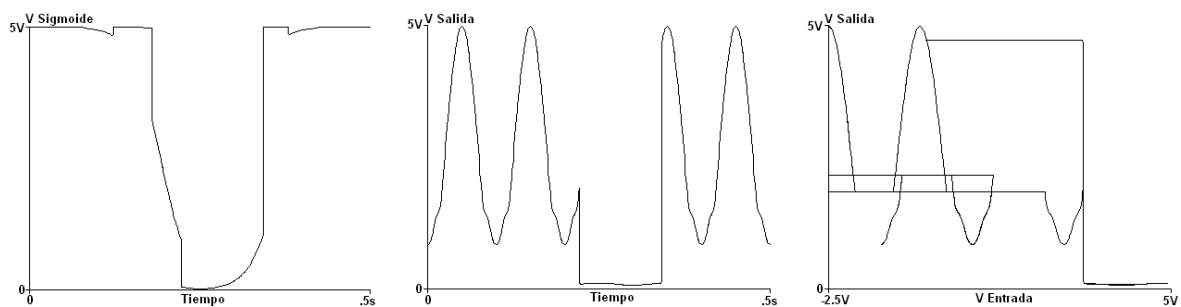


Figura 11. Resultados del experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de -3, y retardo de 1ms.

En nuestro siguiente experimento la pendiente tendrá un valor de -4. Los resultados se muestran en la figura12.

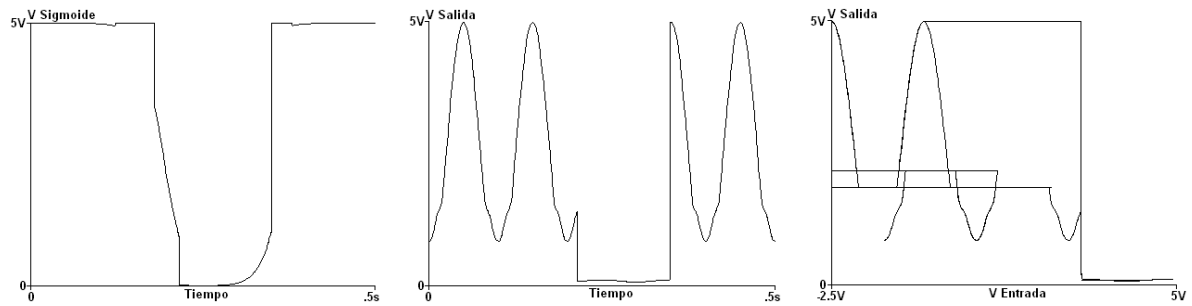


Figura 12. Resultados del experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de -4, y retardo de 1ms.

Vamos a analizar lo que sucede con la neurona con una sinapsis propia cuando cambia el retardo. Para realizar lo anterior con la menor influencia de la función de activación sigmoide vamos a elegir el valor de la pendiente en 1. Lo que vamos a hacer ahora es cambiar el valor del retardo sin modificar ningún otro parámetro de la neurona. Los datos para un valor de retardo de 1ms se muestran en la figura 13.

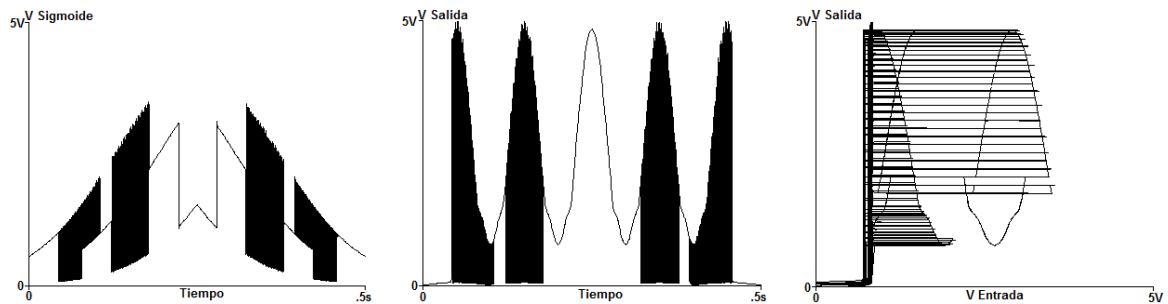


Figura 13. Resultados del primer experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de uno, y retardo 1ms.

Para ver la influencia del retardo en la neurona con inhibición propia, vamos a ir creciendo el retardo axónico, por lo que para este experimento el retardo será de 2ms y los demás parámetros de la neurona no se modifican. Los resultados para este experimento se muestran en la figura 14.

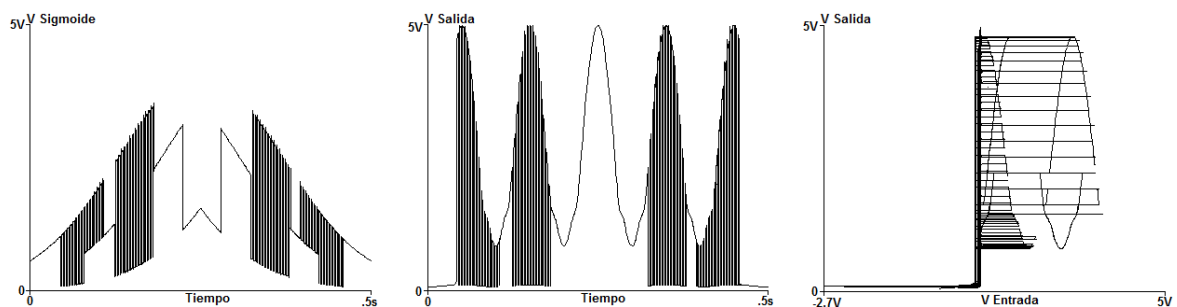


Figura 14. Resultados del primer experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de uno, y retardo 2ms.

Para el siguiente experimento el retardo será de 5ms, y los demás parámetros de la neurona no se modificaran. Los resultados para este experimento se muestran en la figura 15.

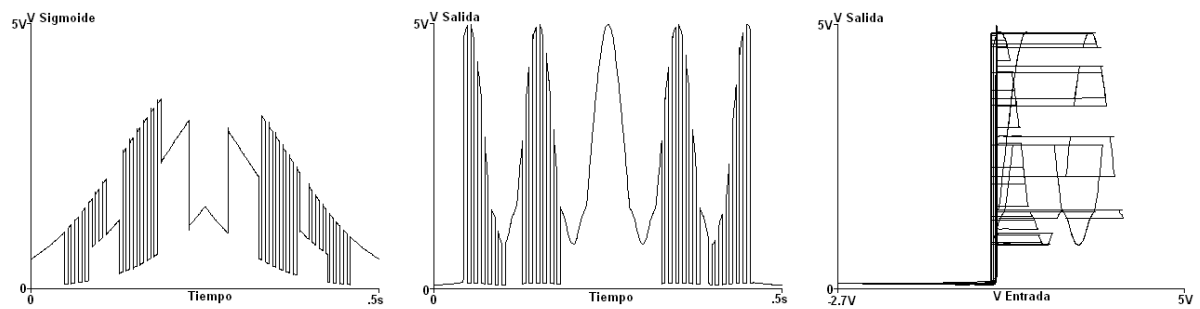


Figura 15. Resultados del primer experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de uno, y retardo 5ms.

Si analizamos los resultados de las gráficas del espacio fase, nos damos cuenta de que el efecto de los retardos es fundamentalmente una ampliación de los ciclos internos de oscilación en el espacio fase. Esto lo que implica es que aunque tenemos efecto de memoria de forma, es decir estados en los cuales se mantiene la forma del espacio fase, pero cambia la frecuencia de las oscilaciones internas.

No aparece en ninguno de los casos estudiados una evocación absoluta. Lo anterior es claro en las figuras de la 4 a la 15.

Lo anterior se relaciona con el hecho de que las respuestas de ráfagas en el sistema nervioso son causantes de movimientos incontrolados, o perturbaciones del sistema nervioso.

3. Resultados del estudio de la neurona con función de activación sigmoide y respuesta con ráfagas.

En esta sección vamos a estudiar la neurona modificada en su función de activación, de manera tal que la salida de la neurona nos entregue ráfagas.

Para nuestro primer experimento vamos a tener la neurona sin inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de cero y salida sin ráfagas parabólicas. La función de entrada será una triangular de periodo muy grande. Los resultados obtenidos para este experimento se muestran en la figura 16. Estos resultados se presentan de la siguiente manera: la primera gráfica corresponde a la señal de la Sigmoide, la segunda gráfica a la señal de salida, la tercera gráfica al espacio fase.

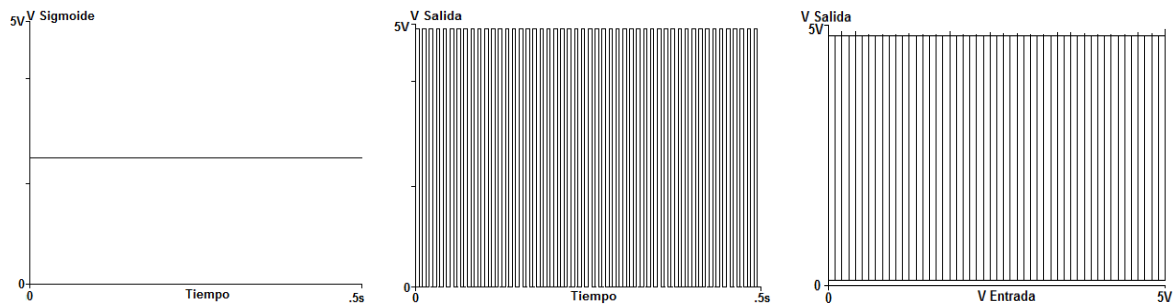


Figura 16. Resultados del primer experimento de la neurona sin inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de cero, y salida sin ráfagas parabólicas.

En el segundo experimento vamos a tener la neurona sin inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de uno y salida sin ráfagas parabólicas. La función de entrada será una triangular de periodo muy grande. Los resultados obtenidos para este experimento se muestran en la figura 17.

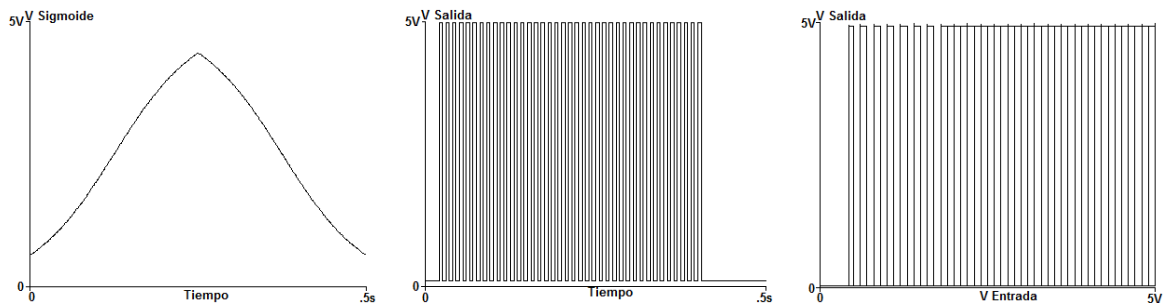


Figura 17. Resultados del segundo experimento de la neurona sin inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de uno, y salida sin ráfagas parabólicas.

Si con las mismas condiciones del segundo experimento elevamos la pendiente de la sigmoide a dos, los resultados que obtuvimos se muestran en la figura 18.

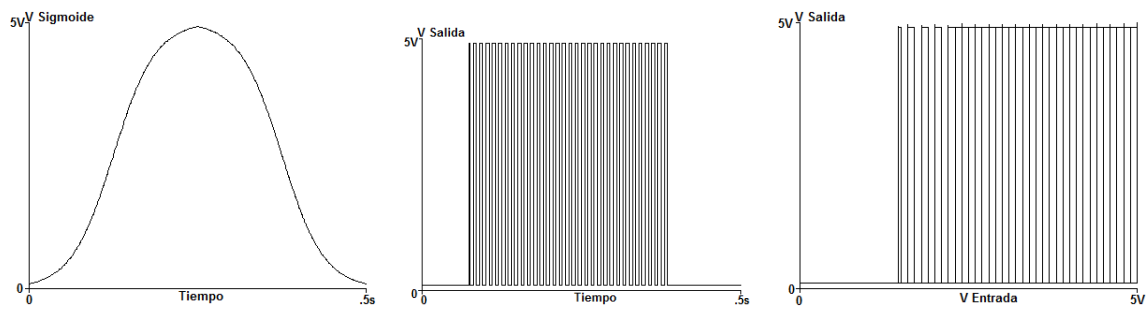


Figura 18. Resultados del tercer experimento de la neurona sin inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de dos, y salida sin ráfagas parabólicas.

Vamos a llevar la pendiente a valores más altos en el caso que vamos a estudiar a continuación los valores de la neurona son los mismos que en los experimentos anteriores pero con la diferencia de que la pendiente tendrá un valor de tres. Los resultados de este experimento se muestran en la figura 19.

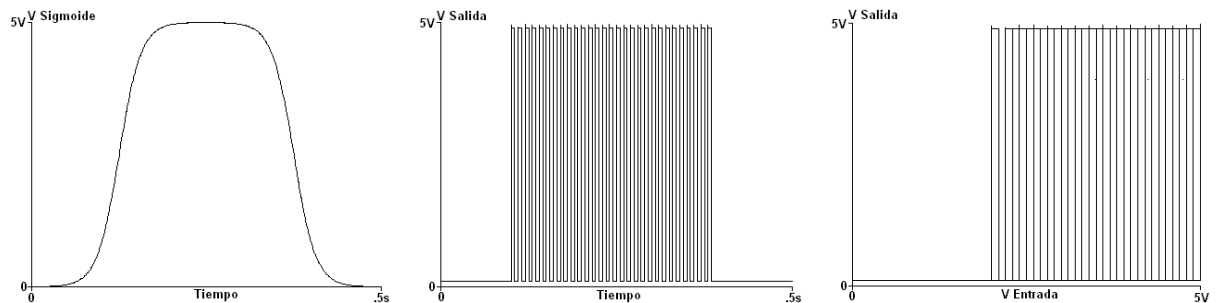


Figura 19. Resultados del cuarto experimento de la neurona sin inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de tres, y salida sin ráfagas parabólicas.

Continuamos elevando la pendiente, los valores de la neurona y no se encuentra mayor cambio en la salida por lo que decidimos dar valores negativos a la pendiente. En este nuevo experimento los parámetros de la neurona son los mismos que en los experimentos anteriores pero con la diferencia de que la pendiente tendrá un valor de menos uno. Los resultados se muestran en la figura 20.

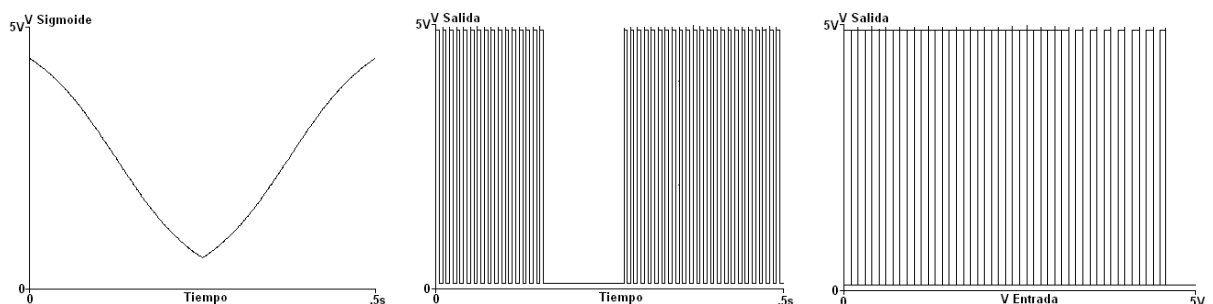


Figura 20. Resultados del quinto experimento de la neurona sin inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de menos uno, y salida sin ráfagas parabólicas.

En nuestro siguiente experimento los parámetros de la neurona son los mismos que en los experimentos anteriores pero con la diferencia de que la pendiente tendrá un valor de menos dos. Los resultados se muestran en la figura 21.

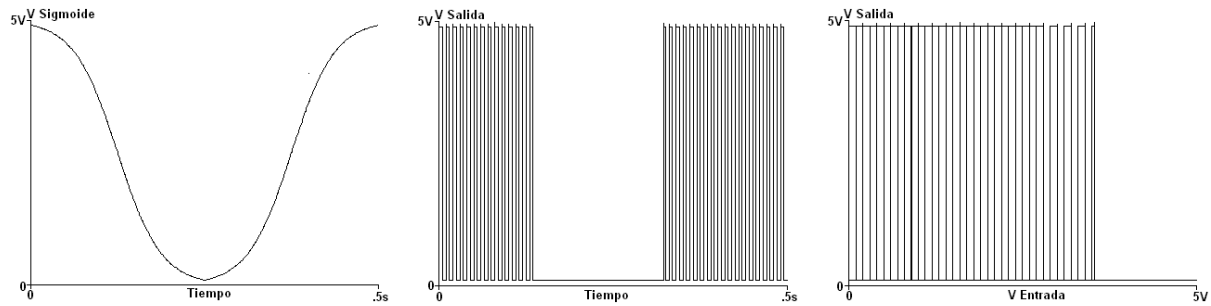


Figura 21. Resultados del sexto experimento de la neurona sin inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de menos dos, y salida sin ráfagas parabólicas.

En nuestro último experimento de esta serie los parámetros de la neurona son los mismos que en los experimentos anteriores pero con la diferencia de que la pendiente tendrá un valor de menos cuatro. Los resultados se muestran en la figura 22.

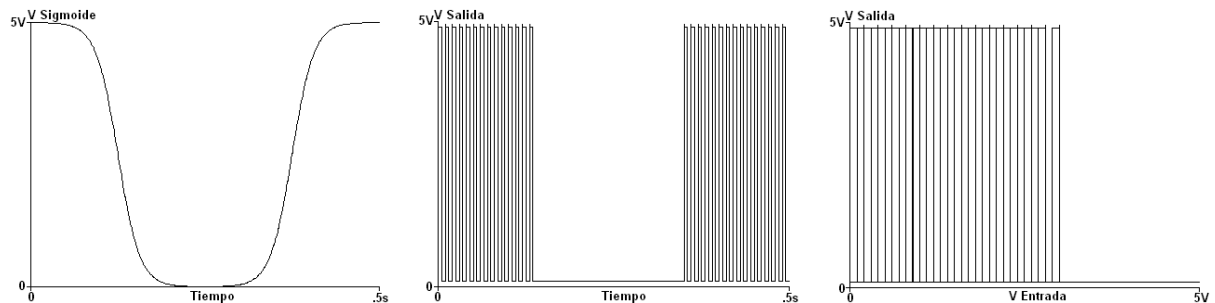


Figura 22. Resultados del séptimo experimento de la neurona sin inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de menos cuatro, y salida sin ráfagas parabólicas.

En este estudio nos encontramos con el hecho de evocación de la red. Lo podemos ver en las figuras 16 y 20. Vemos que el cambio en la pendiente de la sigmoide produce un recorte en la oscilación de salida tanto en entradas de pequeña amplitud como en la parte de señales de entrada de gran amplitud. En el primer caso tenemos que el recorte de oscilaciones para valores positivos crecientes de la pendiente de la sigmoide existe un creciente recorte de la oscilación en bajas amplitudes de la señal de entrada. Aparenta un filtro de amplitudes la respuesta de la neurona que cambia con la pendiente de la sigmoide, lo que se puede observar en la figura de la 16 a la 19.

En las figura 20 a la 22 vemos que ahora la red parece comportarse como un filtro pasa bajas amplitudes, ya que el recorte de las oscilaciones para mayores amplitudes aumenta cuando la pendiente de la sigmoide es más negativa.

Esto es de mucho interés, ya que podemos controlar la forma de respuesta de la red a partir de la pendiente de la sigmoide.

4. Resultados del estudio de la neurona con función de activación sigmoide y respuesta con ráfagas con inhibición propia.

Nuestros siguientes experimentos serán con una neurona idéntica a la anterior pero que cuenta con una inhibición propia y un retardo axónico. El valor inicial de la pendiente será cero. La función de entrada es una triangular de periodo de .5s. El valor del retardo será de 1 ms. Los resultados obtenidos para este experimento se muestran en la figura 23.

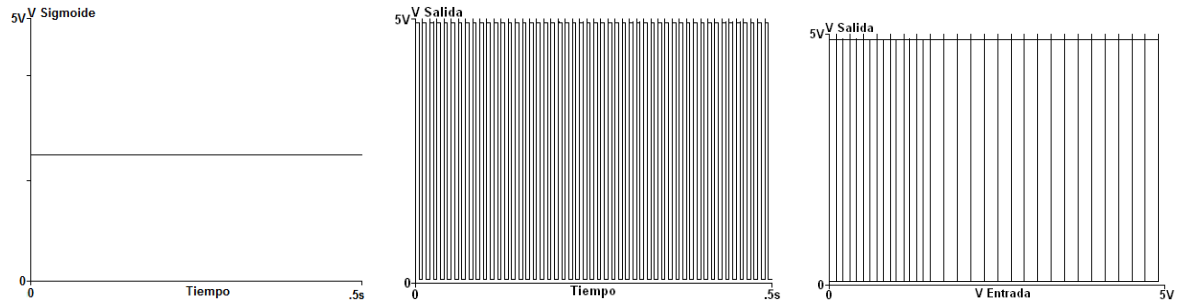


Figura 23. Resultados del primer experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de cero, retardo de 1ms, y salida sin ráfagas parabólicas.

Vamos ahora a empezar a modificar hacia valores mayores el valor de la pendiente, la cual en este caso tomara el valor de 1. Los demás parámetros de la neurona se quedan con los mismos valores. En la figura 24 se muestran los resultados.

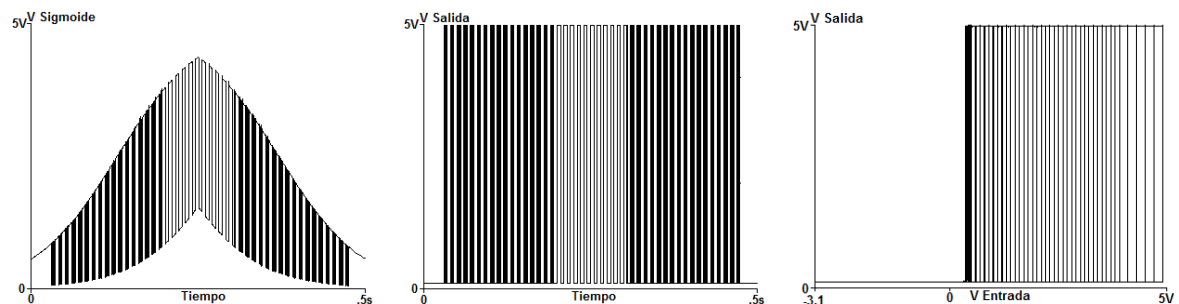


Figura 24. Resultados del segundo experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de 1, retardo de 1ms, y salida sin ráfagas parabólicas.

En nuestro siguiente experimento vamos a aumentar la pendiente a 2 y los demás parámetros de la neurona se mantienen sin variar. En la figura 25 se muestran los resultados obtenidos.

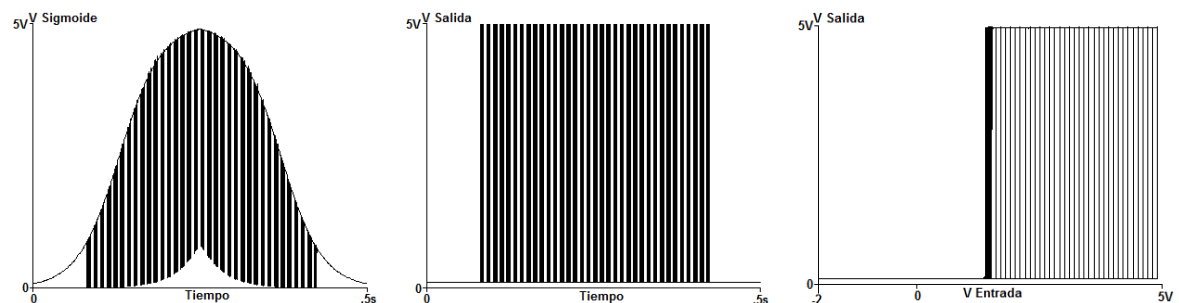


Figura 25. Resultados del tercer experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de 2, retardo de 1ms, y salida sin ráfagas parabólicas.

Vamos a aumentar la pendiente a 4 y los demás parámetros de la neurona se mantienen sin variar. En la figura 26 se muestran los resultados obtenidos.

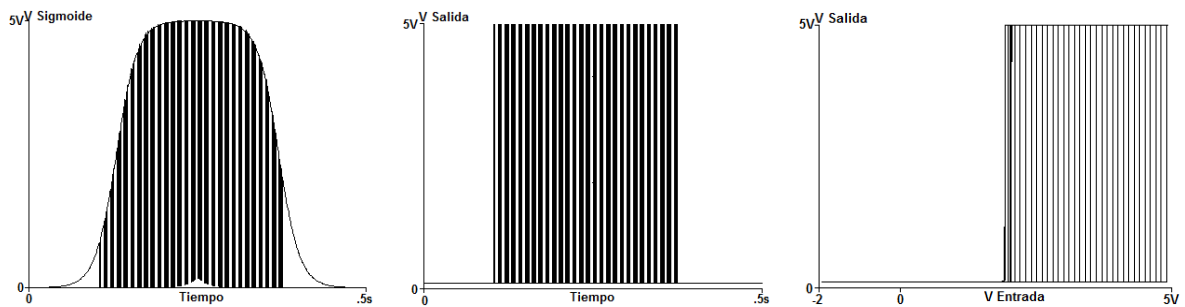


Figura 26. Resultados del cuarto experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de 4, retardo de 1ms, y salida sin ráfagas parabólicas.

Vamos a aumentar la pendiente en sentido negativo y en este experimento la pondremos de -1, mientras los demás parámetros de la neurona se mantienen sin variar. En la figura 27 se muestran los resultados obtenidos.

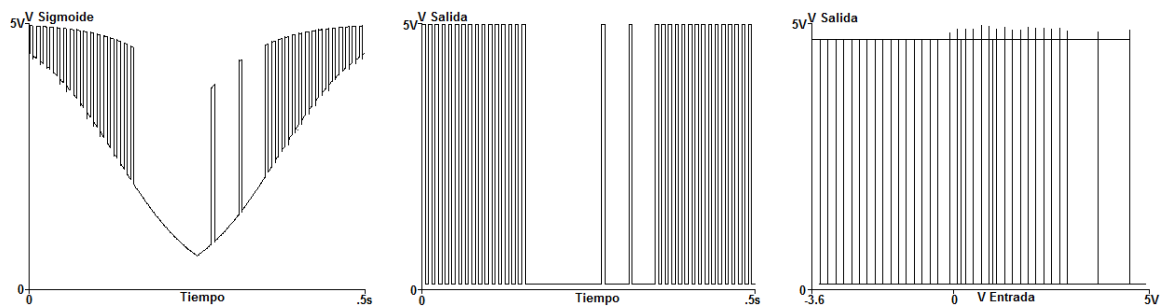


Figura 27. Resultados del quinto experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de -1, retardo de 1ms, y salida sin ráfagas parabólicas.

Si aumentamos negativamente la pendiente a -2 sin modificar los demás parámetros de la neurona obtenemos los resultados que se muestran en la figura 28.

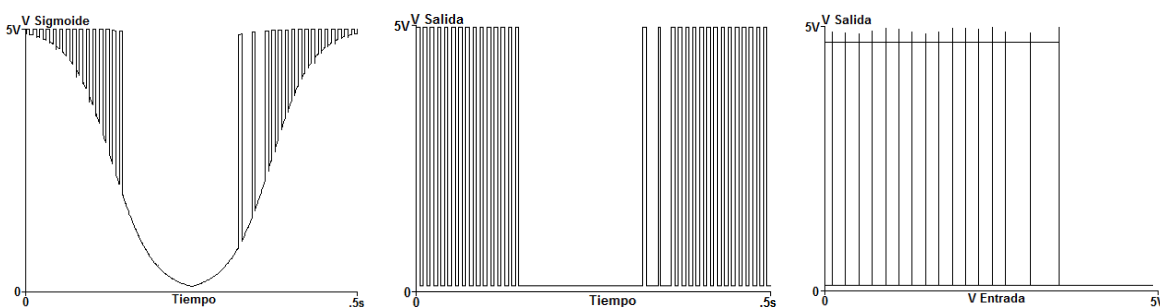


Figura 28. Resultados del sexto experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de -2, retardo de 1ms, y salida sin ráfagas parabólicas.

Vamos a crecer negativamente más la pendiente a -4, mientras los demás parámetros de la neurona se mantienen sin variar. En la figura 29 se muestran los resultados obtenidos.

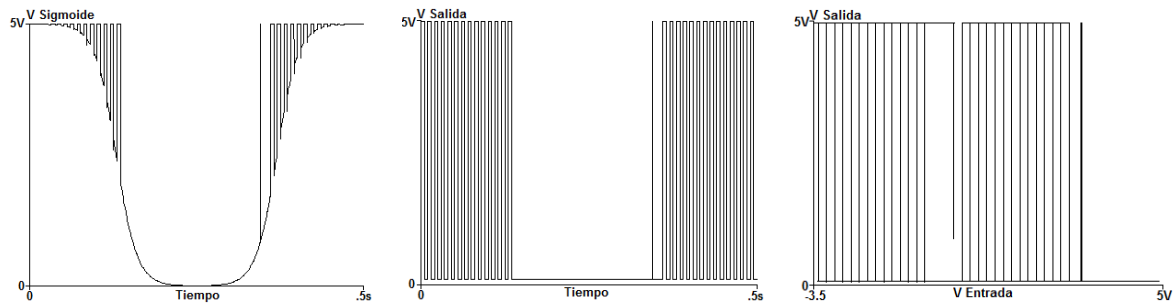


Figura 29. Resultados del séptimo experimento de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de -4, retardo de 1ms, y salida sin ráfagas parabólicas.

Vamos a analizar lo que sucede con la neurona con una sinapsis propia cuando cambia el retardo. Para realizar lo anterior con la menor influencia de la función de activación sigmoide vamos a elegir el valor de la pendiente en 1. Lo que vamos a hacer es solamente cambiar el valor del retardo sin modificar ningún otro parámetro de la neurona. Los datos para un valor de retardo de 1ms se muestran en la figura 30.

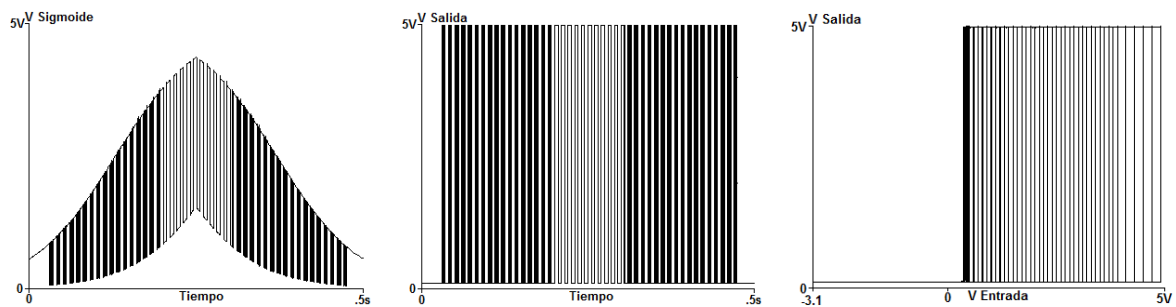


Figura 30. Resultados del experimento de la modificación del retardo de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de 1, retardo de 1ms, y salida sin ráfagas parabólicas.

Los datos para un valor de retardo de 2ms se muestran en la figura 31.

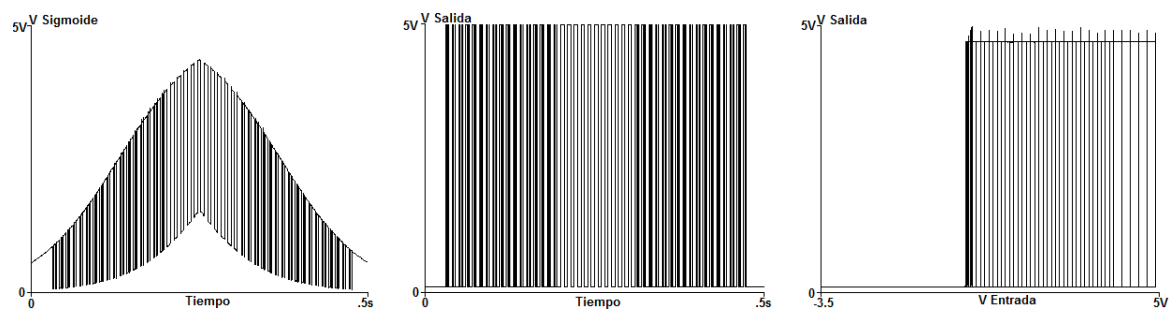


Figura 31. Resultados del experimento de la modificación del retardo de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de 1, retardo de 2ms, y salida sin ráfagas parabólicas.

Crearemos más el retardo de forma tal que en este experimento tenga un valor de 5ms. Los datos los presentamos en la figura 32.

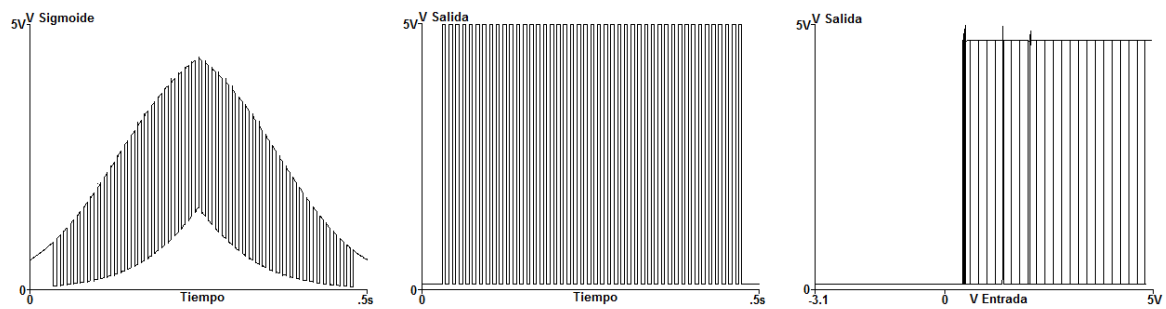


Figura 32. Resultados del experimento de la modificación del retardo de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de 1, retardo de 5ms, y salida sin ráfagas parabólicas.

Para un retardo de 10ms, sin variar ningún otro parámetro de la neurona, mostramos los datos en la figura 33.

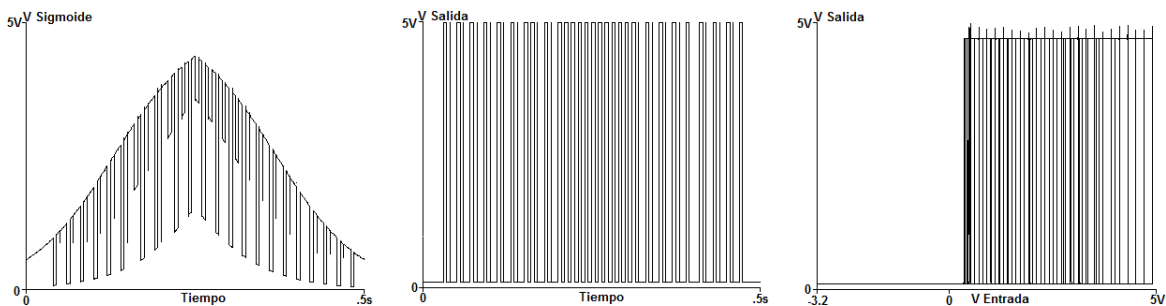


Figura 33. Resultados del experimento de la modificación del retardo de la neurona con inhibición propia, con pendiente de la sigmoide de 1, retardo de 10ms, y salida sin ráfagas parabólicas.

De los experimentos realizados con la neurona con función de activación sigmoide vemos claramente que tanto la pendiente de la sigmoide como el retardo axónico cambian la respuesta y el plano fase.

Si mantenemos en nuestros experimentos en retardo constante pero variamos la pendiente de la sigmoide, lo que observamos en el punto 3 se replica, pero si mantenemos la pendiente de la sigmoide fija y variamos en retardo, lo que encontramos es un cambio en las oscilaciones de las ráfagas.

No encontramos efectos evocados, pero si memoria de forma.

Lo anterior se ve muy claramente en las figuras 29 y 30, así como en las figuras 26 y 27.

5. Resultados del estudio de la neurona con función de activación sigmoide y respuesta con ráfagas parabólicas con inhibición propia.

Vamos ahora a considerar mayor complejidad en la neurona y para esto le incluiremos una respuesta tipo ráfagas parabólicas. El diagrama de bloques de nuestra neurona se presenta en la figura 34.

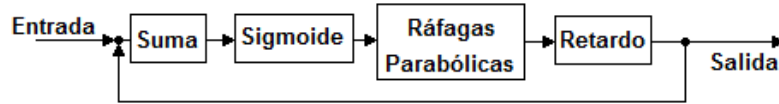


Figura 34. Diagrama de bloques de la neurona con salida de ráfagas parabólicas.

Para nuestro primer experimento vamos a considerar que la pendiente de la sigmoide es cero, el retardo es de 1ms, y la entrada es una triangular con periodo de .5s. Los datos de este experimento se muestran en la figura 34.

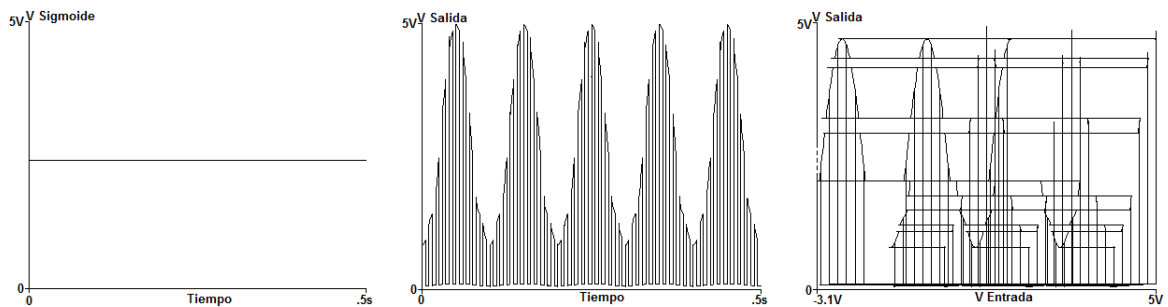


Figura 35. Resultados del experimento con la pendiente de la sigmoide 0, el retardo de 1ms, y la entrada una triangular con periodo de .5s.

Vamos como en nuestros anteriores experimentos a crecer la pendiente de la sigmoide a 1, dejando todos los demás parámetros de la neurona con sus mismos valores. Los resultados se muestran en la figura 36.

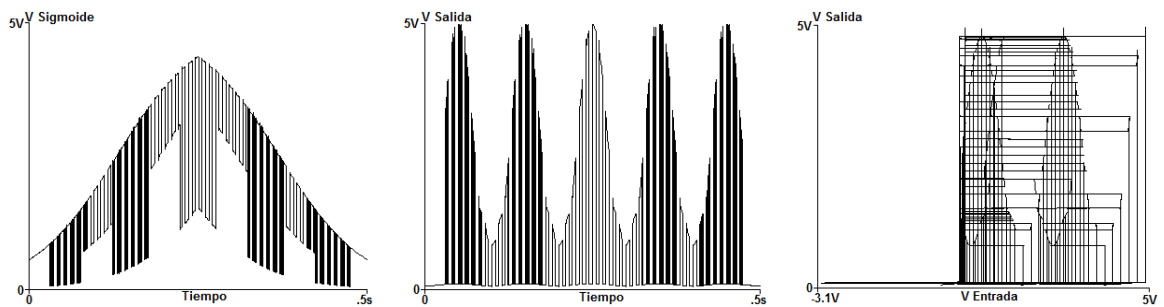


Figura 36. Resultados del experimento con la pendiente de la sigmoide 1, el retardo de 1ms, y la entrada una triangular con periodo de .5s.

Vamos a continuar creciendo la pendiente de la sigmoide a 2, dejando todos los demás parámetros de la neurona con sus mismos valores. Los resultados se muestran en la figura 37.

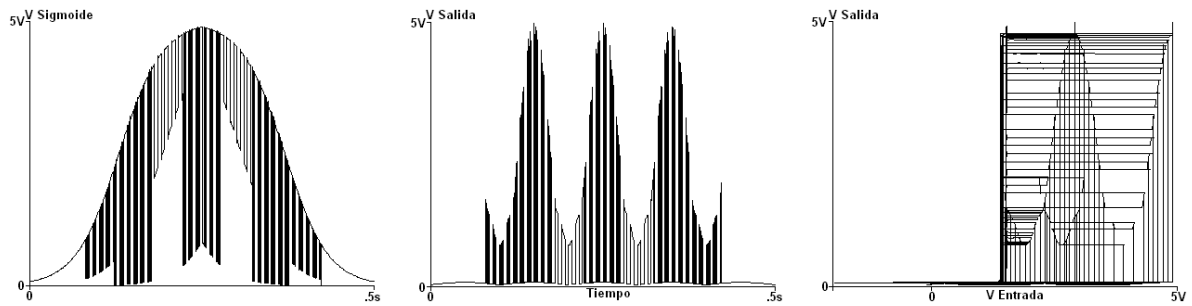


Figura 37. Resultados del experimento con la pendiente de la sigmoide 2, el retardo de 1ms, y la entrada una triangular con periodo de .5s.

Nos plantearemos un nuevo análisis de la neurona con la pendiente de la sigmoide en un valor de 4. Los demás parámetros de la neurona no se modificaron. Los resultados se muestran en la figura 38.

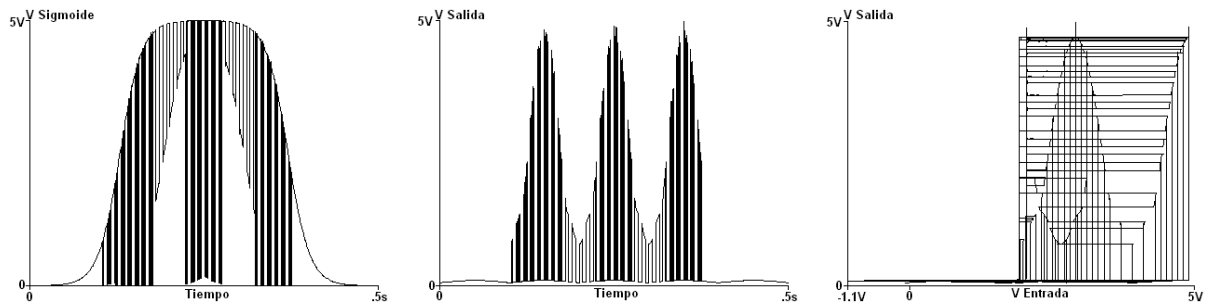


Figura 38. Resultados del experimento con la pendiente de la sigmoide 4, el retardo de 1ms, y la entrada una triangular con periodo de .5s.

En los siguientes experimentos vamos a hacer negativa la pendiente de la sigmoide. Los demás parámetros de la neurona no se modifican. Los resultados se muestran en la figura 39.

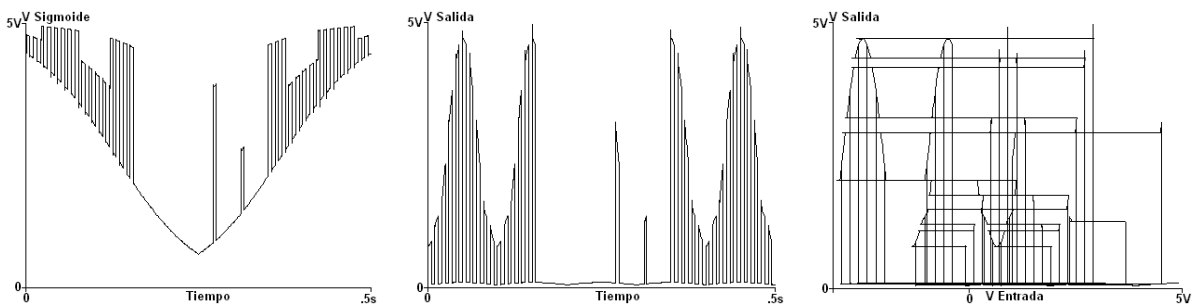


Figura 39. Resultados del experimento con la pendiente de la sigmoide -1, el retardo de 1ms, y la entrada una triangular con periodo de .5s.

En nuestro siguiente experimento el valor de la pendiente de la sigmoide será -2. Los resultados se muestran en la figura 40.

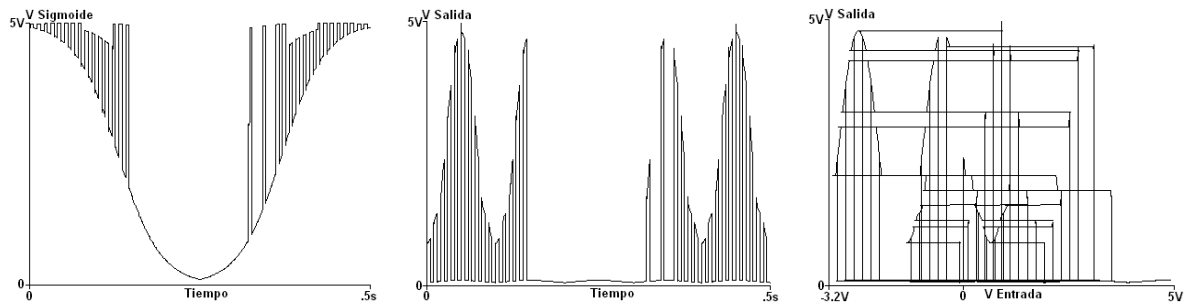


Figura 40. Resultados del experimento con la pendiente de la sigmoide -2, el retardo de 1ms, y la entrada una triangular con periodo de .5s.

En nuestro siguiente experimento el valor de la pendiente de la sigmoide será -4. Los resultados se muestran en la figura 41.

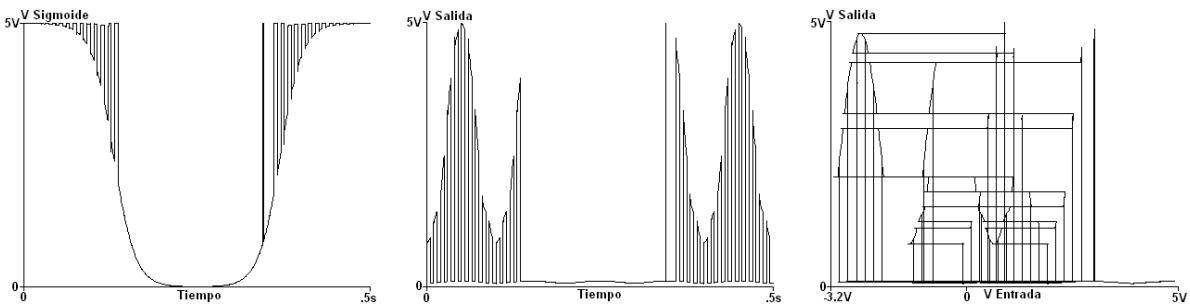


Figura 41. Resultados del experimento con la pendiente de la sigmoide -4, el retardo de 1ms, y la entrada una triangular con periodo de .5s.

Como en los casos anteriores ahora vamos a estudiar la dependencia de la respuesta y los planos fase de los retardos axónicos. Para esto tomamos la pendiente de la sigmoide con valor 1 y variaremos el valor del retardo a partir de 1 ms. Los datos del experimento se presentan en la figura 42.

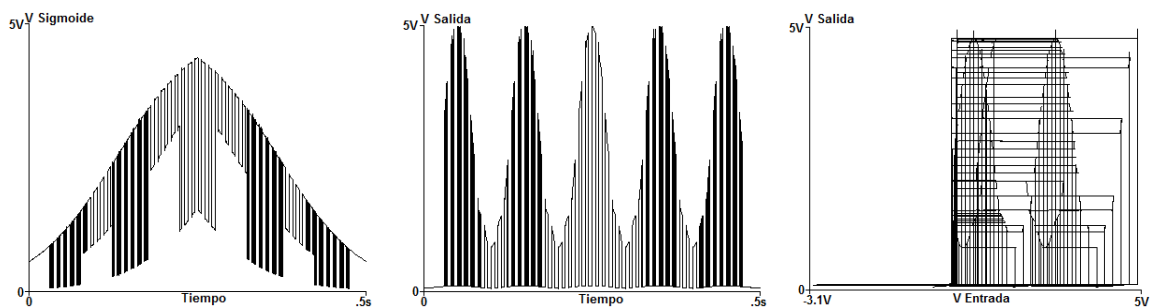


Figura 42. Resultados del experimento con la pendiente de la sigmoide 1, el retardo de 1ms, y la entrada una triangular con periodo de .5s.

Para nuestro segundo experimento con los retardos vamos a darle al retardo un valor de 2ms. Los demás datos permanecen sin cambio. Los resultados se muestran en la figura 43.

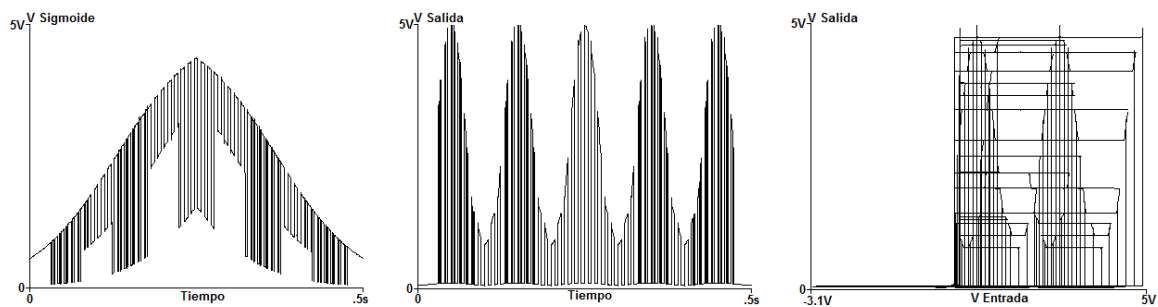


Figura 43. Resultados del experimento con la pendiente de la sigmoide 1, el retardo de 2ms, y la entrada una triangular con periodo de .5s.

De los experimentos de las figuras 29 y 30, podemos ver que no existe cambio en la forma general del espacio fase, aunque existen cambios interiores que si no son absolutamente claros existen por el retardo. En apariencia estamos ante la circunstancia de que el tipo de plano se mantiene independientemente del valor de los retardos. Vamos ahora a crecer el retardo a 5ms, para ver si la forma general se mantiene con tanto retardo. Los demás datos permanecen sin cambio. Los datos se muestran en la figura 44.

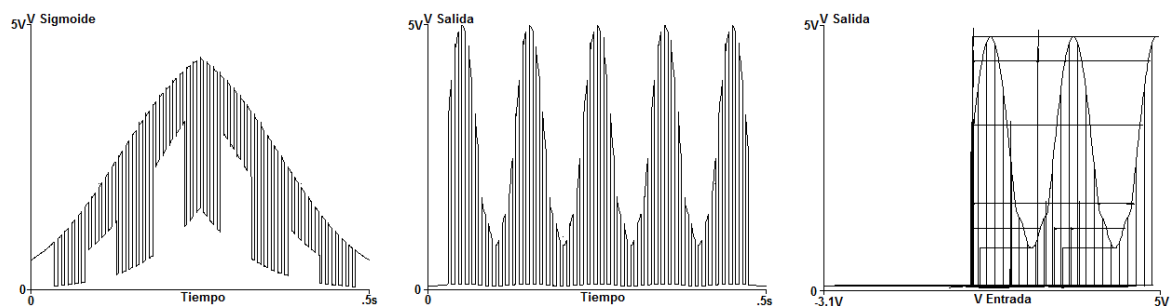


Figura 44. Resultados del experimento con la pendiente de la sigmoide 1, el retardo de 5ms, y la entrada una triangular con periodo de .5s.

Vamos ahora a crecer el retardo a 15ms, para ver si la forma general se mantiene con tanto retardo. Los demás datos permanecen sin cambio. Los datos se muestran en la figura 45.

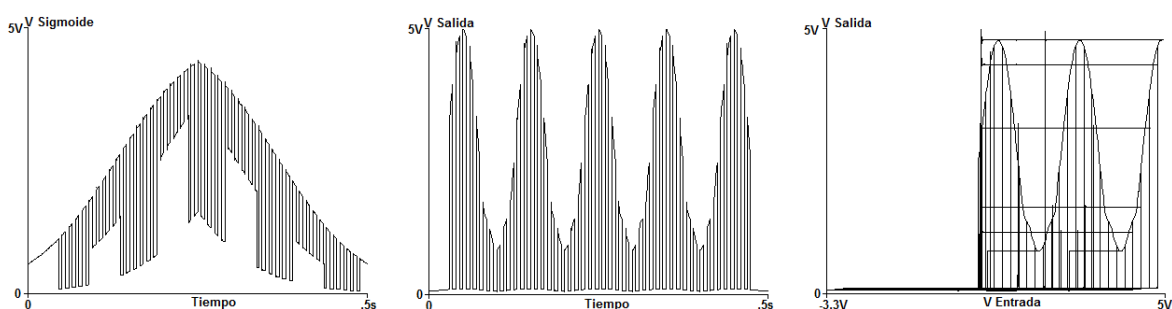


Figura 45. Resultados del experimento con la pendiente de la sigmoide 1, el retardo de 15ms, y la entrada una triangular con periodo de .5s.

Si vemos los experimentos anteriores en los cuales tenemos ráfagas, nos daremos cuenta de que también en ellos vale lo anteriormente planteado. Como ejemplo de lo aquí presentado, podemos ver las figuras 19 y 20. Es interesante ver que son los retardos los causantes del cambio de forma de plano fase, por lo que vemos una alternancia en las memorias de forma. Es decir podemos pensar que para dos entradas, la forma de la respuesta cambia en función del retardo de la red.

6. Modelo de columnas tectales empleadas

Para realizar los experimentos empleamos dos columnas tectales que ya hemos presentado su estudio en otros reportes y que son la columna tectal formada por tipos diferentes de neuronas, en específico en este reporte fue la columna formada por neuronas con función de activación rampa y sigmoide y la columna tectal formada por neurona iguales, en nuestro caso de estudio por dos neuronas con función de activación tipo escalón.

En el segundo caso empleamos este tipo de neurona por ser todo o nada, lo que puede dar mucha información acerca de lo que queremos analizar.

La figura 46, nos muestra el diagrama de bloque de la columna tectal conformada por la primera neurona con función de activación sigmoide, y la segunda neurona con función de activación rampa.

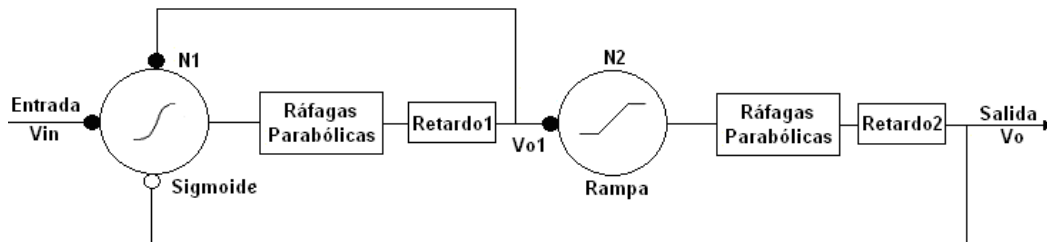


Figura 46. Diagrama de bloques de la columna tectal formada con neuronas con diferente funciones de activación.

En la figura 47 mostramos el diagrama esquemático de la de la columna tectal conformada por la primera neurona con función de activación sigmoide, y la segunda neurona con función de activación rampa.

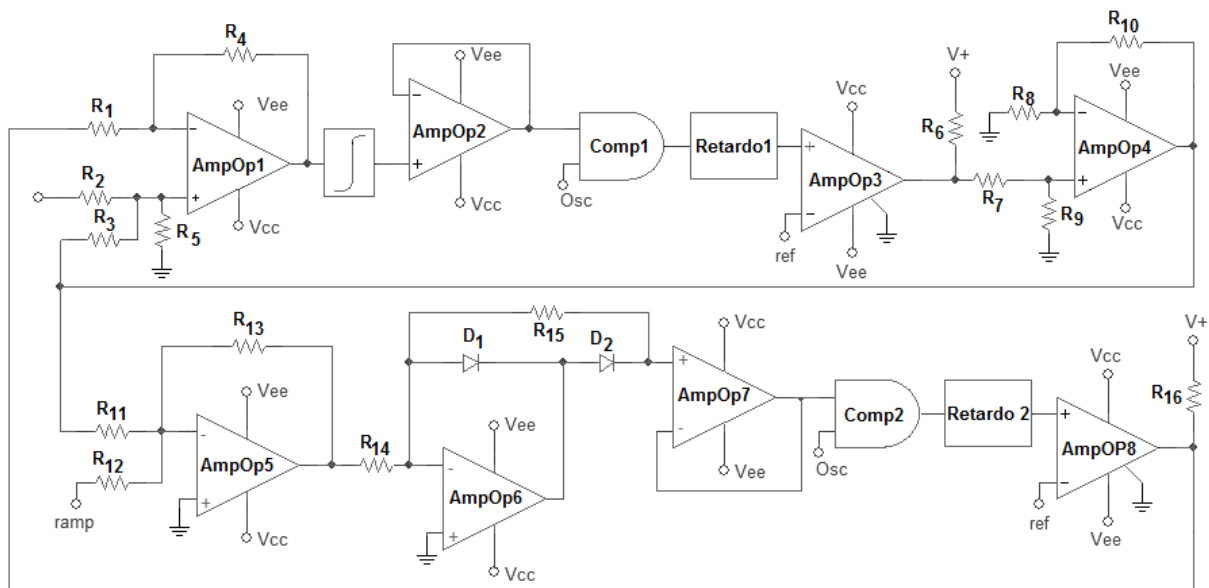


Figura 47. Diagrama esquemático de la de la columna tectal conformada por la primera neurona con función de activación sigmoide, y la segunda neurona con función de activación rampa.

La función escalón está formada por un comparador con un nivel de umbral y un valor de amplitud de salida. Esta función se mantiene en el valor de amplitud de salida si el valor de la señal de entrada es mayor o igual al valor del umbral, en otro caso, si es menor al valor del umbral, se mantiene en un valor de voltaje muy cercano a cero.

Con el modelo de la columna tectal de la figura 47, nos propusimos realizar una serie de experimentos jugando con los retardos axónicos de las neuronas de la columna tectal. Lo primero que experimentamos fue con los parámetros de las neuronas de tal forma que tuviéramos una respuesta interesante de la columna tectal. Una vez que obtuvimos los parámetros pusimos el retardo de la primera neurona en un valor alto, y fuimos creciendo el valor del retardo de la segunda de una en una unidad, comenzando en un milisegundo, hasta alcanzar el valor del retardo de la primera neurona; lo mismo se realizó con la segunda neurona.

7. Columna tectal con funciones de activación sigmoide y rampa

El primer experimento que presentaremos tiene los siguientes parámetros de las neuronas: Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = 2ms, Retardo 2 = .5ms. Los resultados en este caso se presentan en la figura 48.

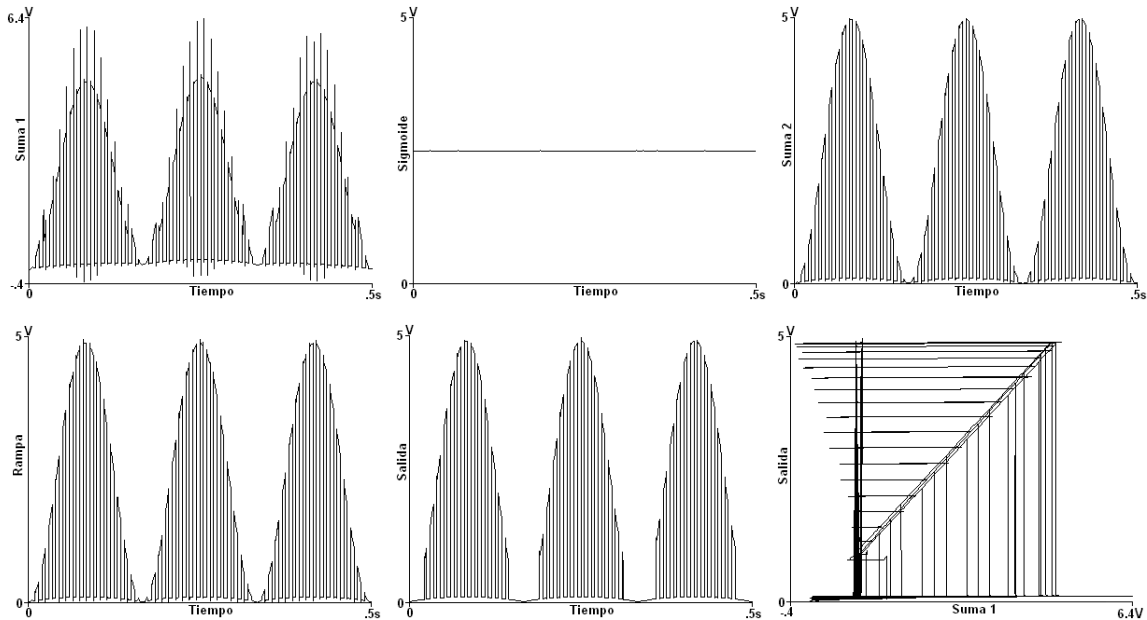


Figura 48. Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = 2ms, Retardo 2 = .5ms.

En el segundo experimento los parámetros de las neuronas fueron: Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = 2ms, Retardo 2 = .5ms. Los resultados se muestran en la figura 49.

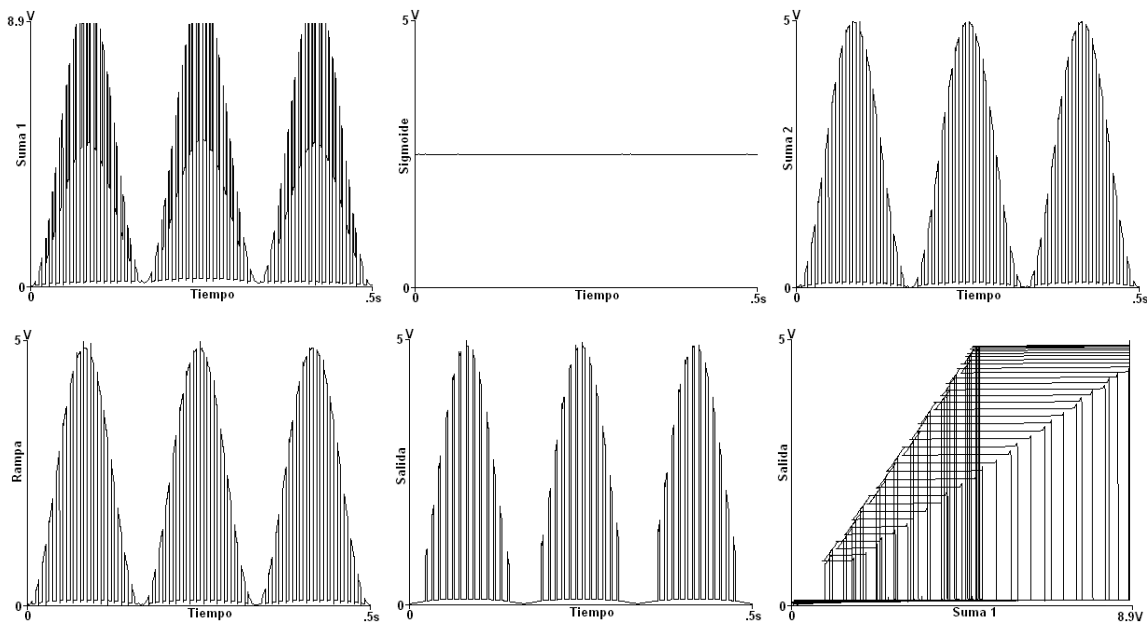


Figura 49. Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = 2ms, Retardo 2 = .5ms.

Vemos que sin cambiar parámetros en las neuronas de la columna tectal y sólo cambiando el valor de los retardos la respuesta de la columna tectal es muy diferente. A la pregunta respecto a los efectos en la memoria a corto plazo que planteamos en la introducción podemos contestar que es muy significativa, ya que cambia el plano fase de la red en forma apreciable. Para saber que tal significativo es el cambio nos planteamos otro experimento. En este experimento los parámetros de las neuronas fueron: Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = .5ms, Retardo 2 = 2ms. Los resultados se muestran en la figura 50.

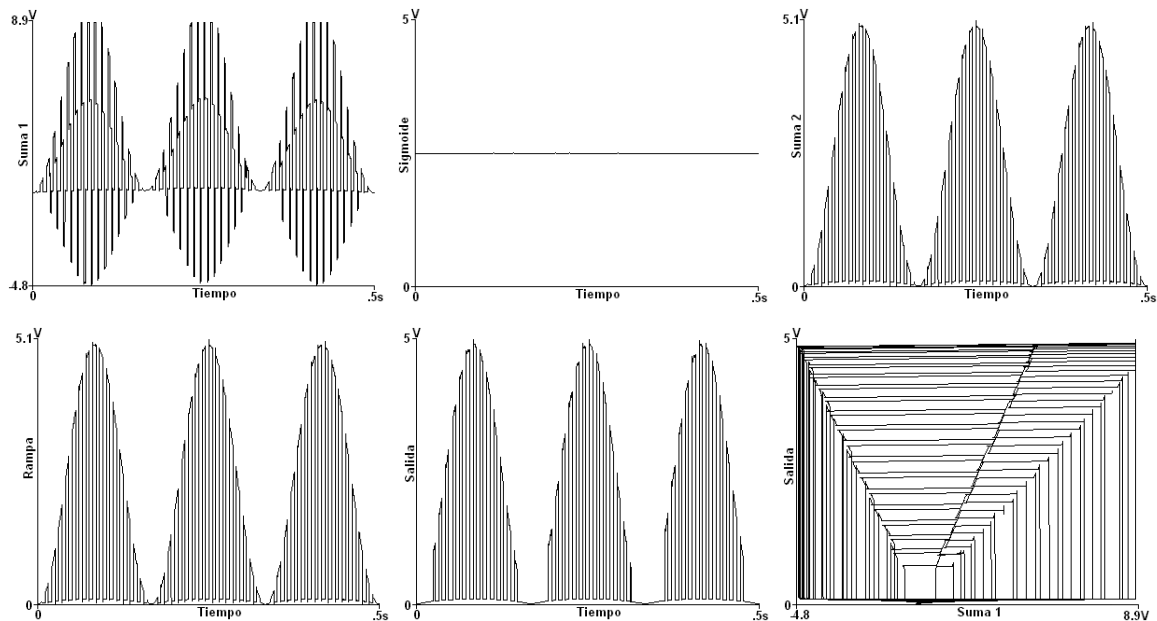


Figura 50. Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = .5ms, Retardo 2 = 2ms.

En este experimento tenemos una relación de retardos de la primera y la segunda neurona invertidos a los que teníamos en el experimento anterior, en el experimento de la figura 49, la razón de retardos era de 4 y en el de la figura 50 la razón es de $\frac{1}{4}$. De acuerdo con lo visto en los dos últimos experimentos es también muy significativa la razón ente los retardos, ya que los espacios fase son muy diferentes entre la razón de retardos de 4 y la de $\frac{1}{4}$.

Para poder ver si lo anterior es generalizable en el siguiente experimento mantendremos una relación de retardos de 4 pero con valores de retardo diferentes. Los parámetros de las neuronas en este experimento son: Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = 4ms, Retardo 2 = 1ms. Los resultados se muestran en la figura 51.

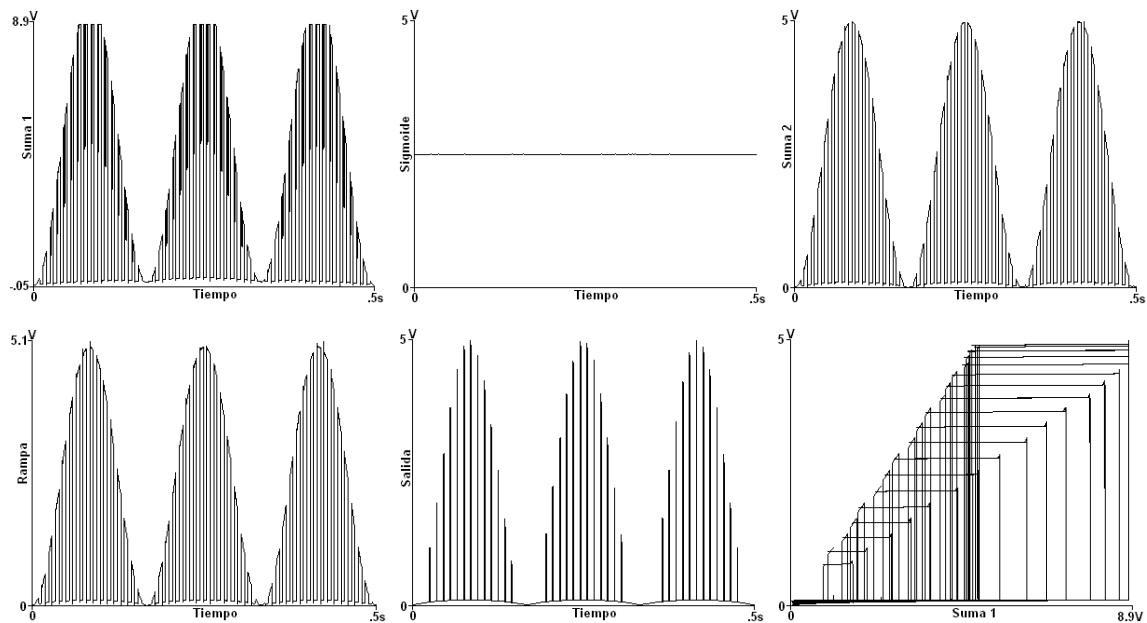


Figura 51. Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = 4ms, Retardo 2 = 1ms.

Es muy valioso el resultado obtenido, ya que como se ve la forma del plano fase se mantiene con respecto a la relación de retardos, ya que es la misma que la de la figura 49, la cual tiene también una relación entre retardos de 4. Aparentemente la relación entre los retardos nos marca un tipo de plano fase. Para poder afirmar lo anterior buscamos otro experimento con una relación $\frac{1}{4}$, y realizamos el siguiente experimento, en el cual los parámetros de las neuronas son los siguientes: Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = .8ms, Retardo 2 = 3.2ms. Los resultados se muestran en la figura 52.

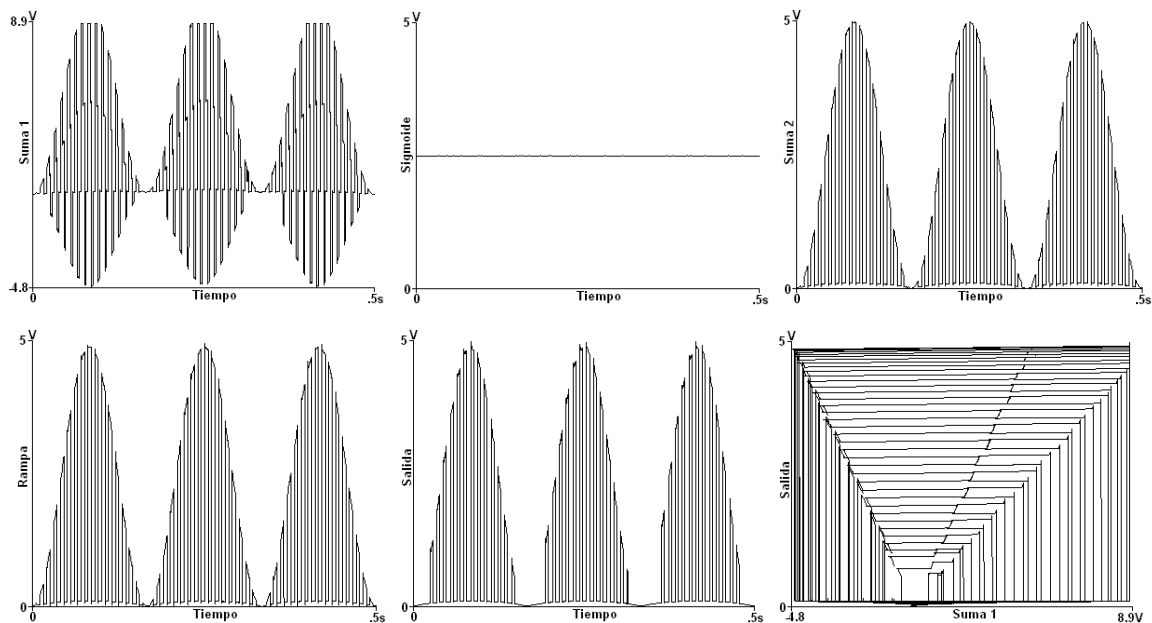


Figura 52. Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = .8ms, Retardo 2 = 3.2ms.

Nuestro experimento demostró que la forma del plano fase es la misma entre las figura 52 y 50, por lo que lo que vemos que se repite la forma del plano fase también en la relación entre retardos de 1/4, lo que fortalece la hipótesis de que la forma del plano fase cambia al cambiar la relación entre retardos ¿Qué pasaría si cambiamos la relación entre retardos digamos a 6? Pensemos por ejemplo que el primer retardo sea de 12ms y el segundo de 2ms. Para esto nos planteamos otro experimento dando esta relación entre retardos. Los parámetros para las neuronas son: Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = 12ms, Retardo 2 = 2ms. Los resultados se muestran en la figura 53.

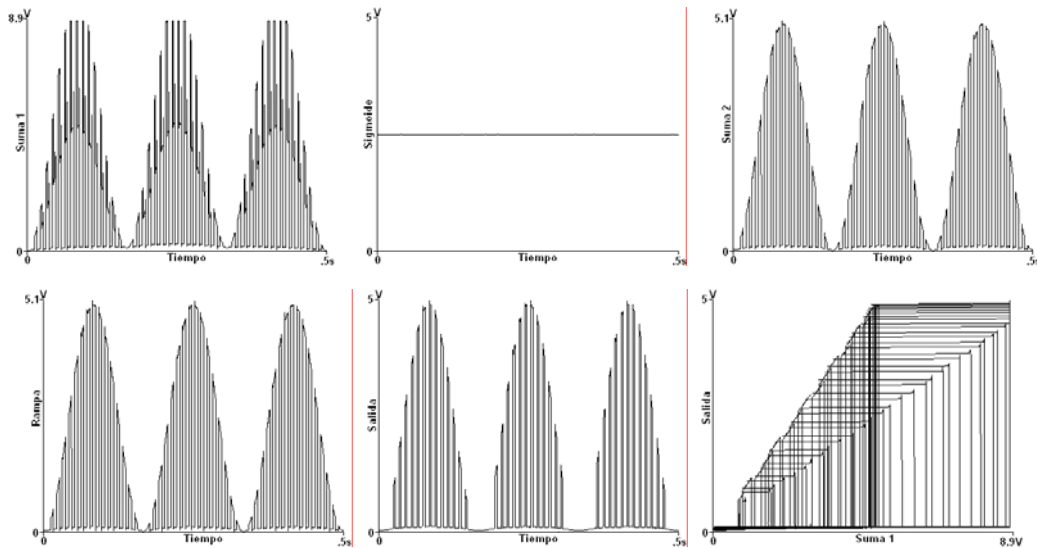


Figura 53. Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = 12ms, Retardo 2 = 2ms.

En nuestro siguiente experimento cambiamos la razón entre retardos a la razón inversa, es decir 1/6. Los parámetros de las neuronas fueron los siguientes: Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = 2ms, Retardo 2 = 12ms, umbral 1V. Los resultados se presentan en la figura 54.

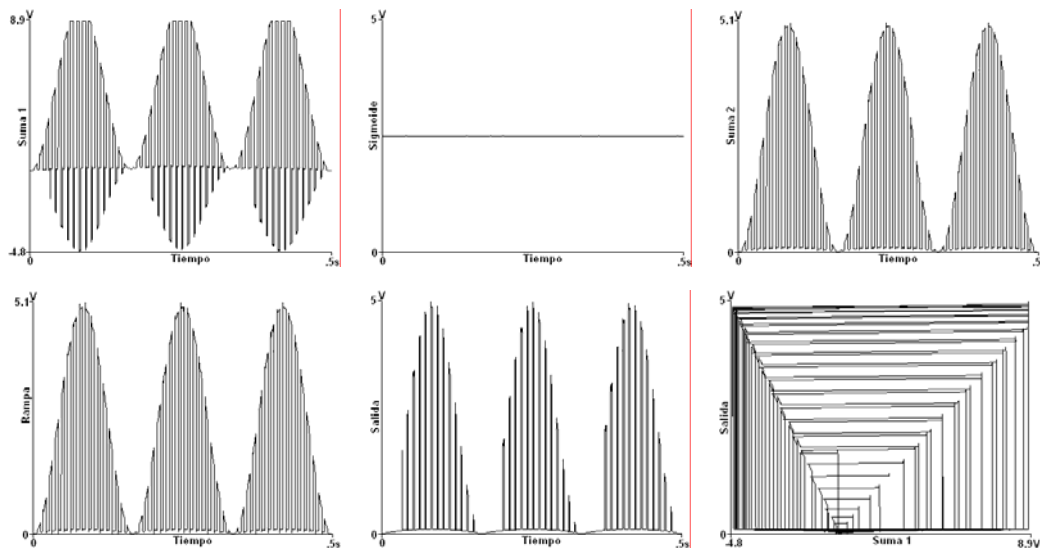


Figura 54. Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Pendiente = 0, Voltaje de la rampa = 0V, Retardo 1 = 2ms, Retardo 2 = 12ms

De nuevo se da la alternancia entre las dos formas de plano fase, lo que parece confirmar la regla, el cambio de forma entre dos formas de plano fase, se da de acuerdo a la relación entre retardos, como lo podemos ver entre las figuras 51 y 52 o 53 y 54.

8. Columna tectal con funciones de activación escalón

En esta sección vamos a analizar lo que sucede con una columna tectal con funciones de activación tipo escalón y salidas con ráfagas parabólicas. En la figura 55 se muestra el diagrama de bloques de la columna tectal.

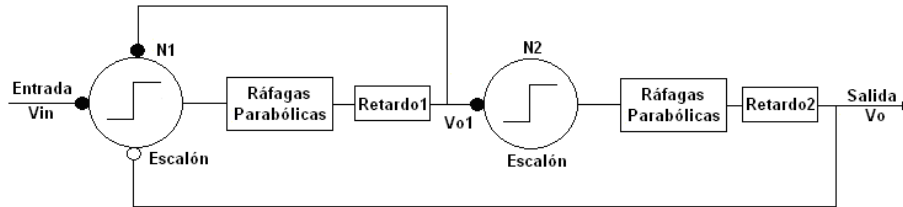


Figura 55. Diagramas de bloques de la columna tectal con funciones de activación escalón y salidas con ráfagas parabólicas.

En la figura 56 se muestra el diagrama esquemático de la columna tectal con funciones de activación escalón y salidas con ráfagas parabólicas.

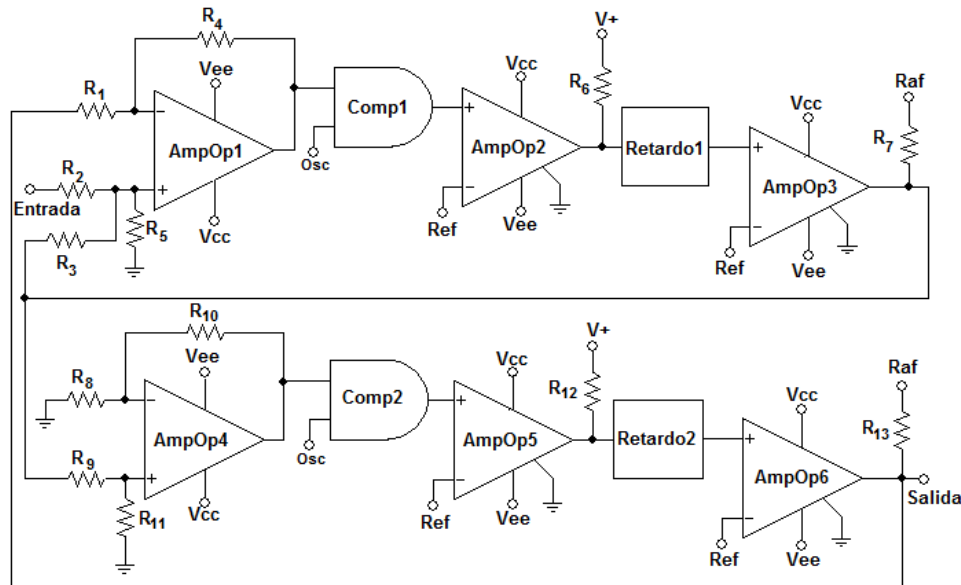


Figura 56. Diagrama esquemático de la columna tectal con funciones de activación escalón y salidas con ráfagas parabólicas.

Vamos a analizar lo que sucede con la columna tectal con función de activación escalón. También cambiamos la señal de entrada, pero con todos los parámetros de las neuronas idénticos, y dejamos de nuevo como parámetros libres los retardos de las neuronas. El siguiente experimento que presentaremos tiene los siguientes parámetros de las neuronas: Entrada senoide, amplitud 5V, Retardo 1 = 0, Retardo 2 = 0. Este es un experimento fundamental ya que nos da la información de la red sin presencia de los retardos. Los resultados en este caso se presentan en la figura 57.

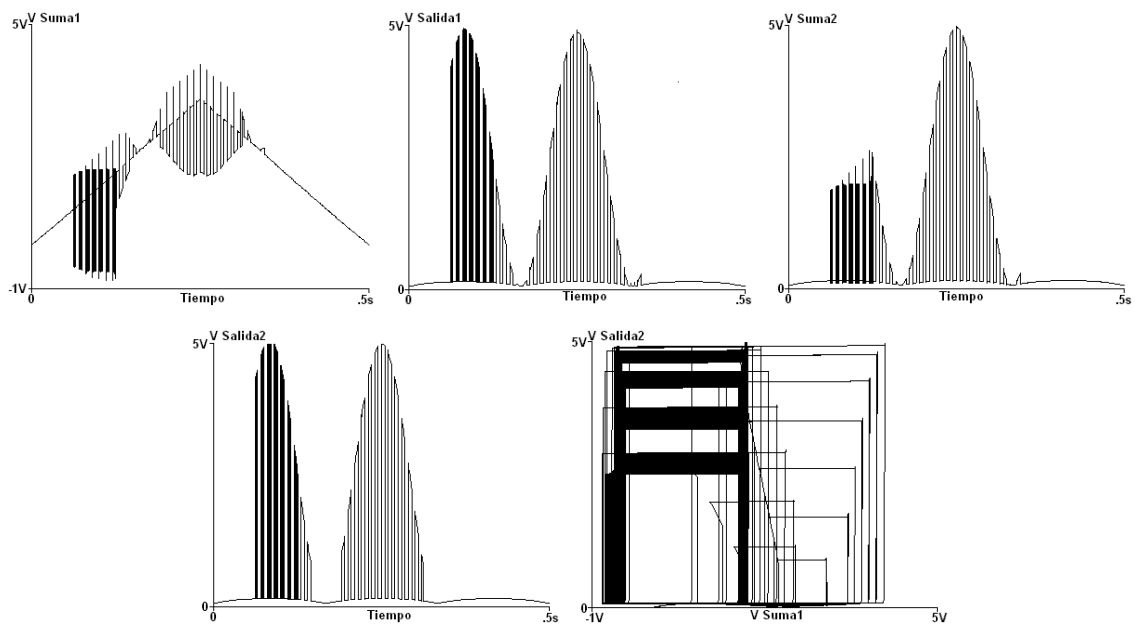


Figura 57. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1 0, Retardo 2 = 0.

El primer experimento que presentaremos tiene los siguientes parámetros de las neuronas: Entrada senoide, amplitud 5V, Voltaje de la sigmoide = 0V, Retardo 1 = 2ms, Retardo 2 = .5ms. Los resultados en este caso se presentan en la figura 58.

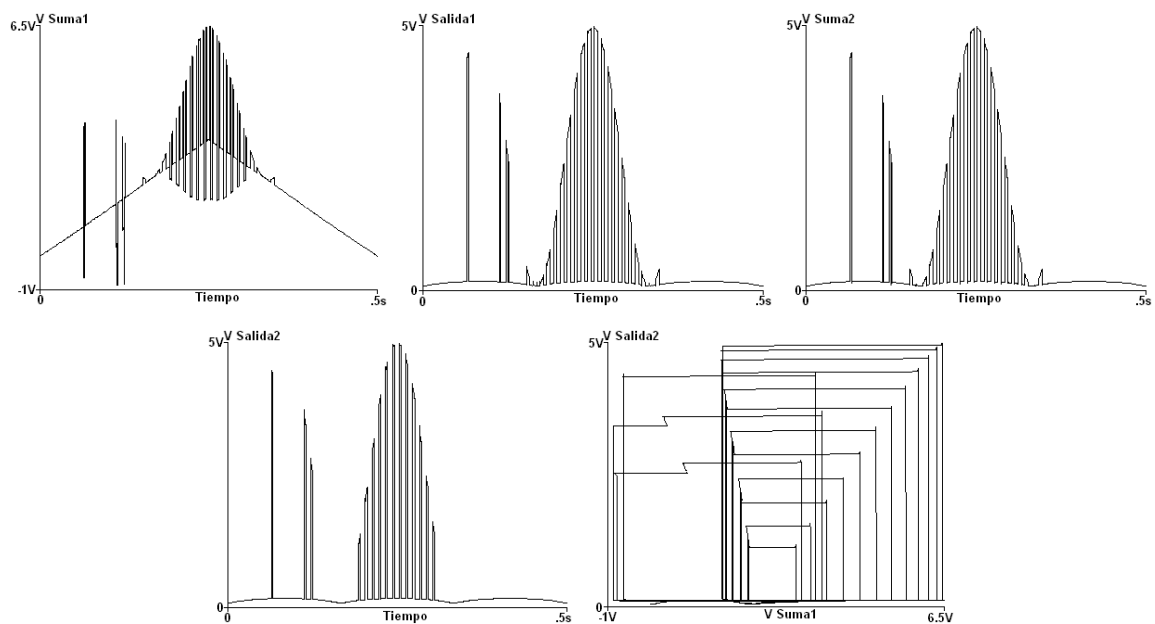


Figura 58. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 2ms, Retardo 2 = .5ms.

El siguiente experimento que presentaremos tiene los siguientes parámetros de las neuronas: Entrada senoide, amplitud 5V, Retardo 1 = 8ms, Retardo 2 = 2ms. Los resultados en este caso se presentan en la figura 59.

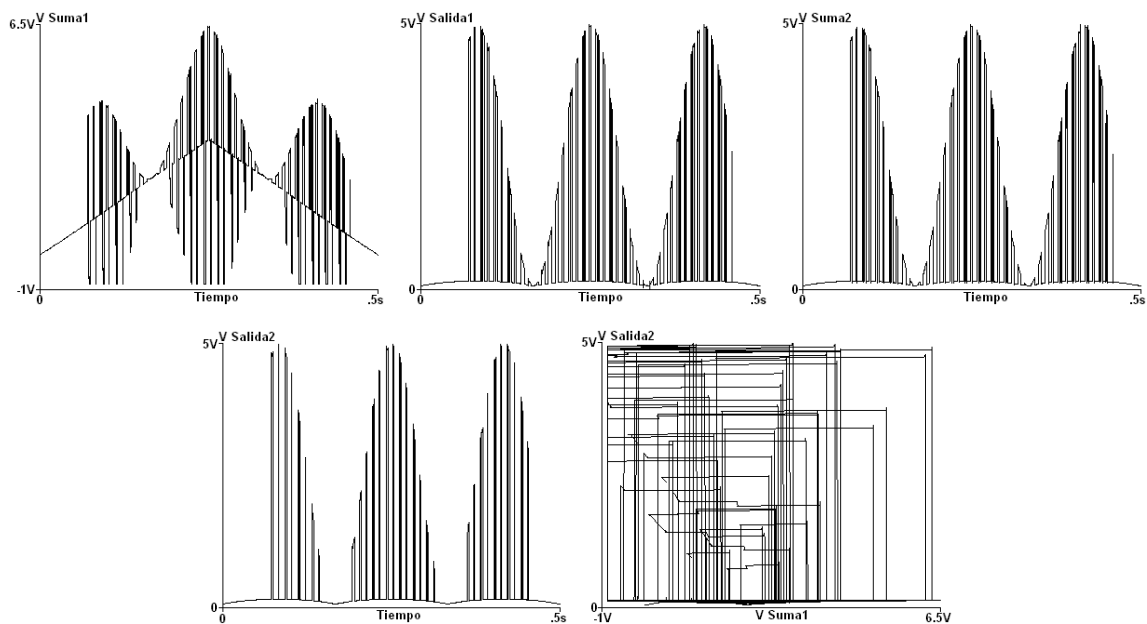


Figura 59. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 8ms, Retardo 2 = 2ms.

Crecimos mucho los retardos, ahora vamos a buscar otras relaciones entre ellos. Los parámetros para esta prueba serán: Entrada senoide, amplitud 5V, Retardo 1 = 1ms, Retardo 2 = 2ms. Los resultados en este caso se presentan en la figura 60.

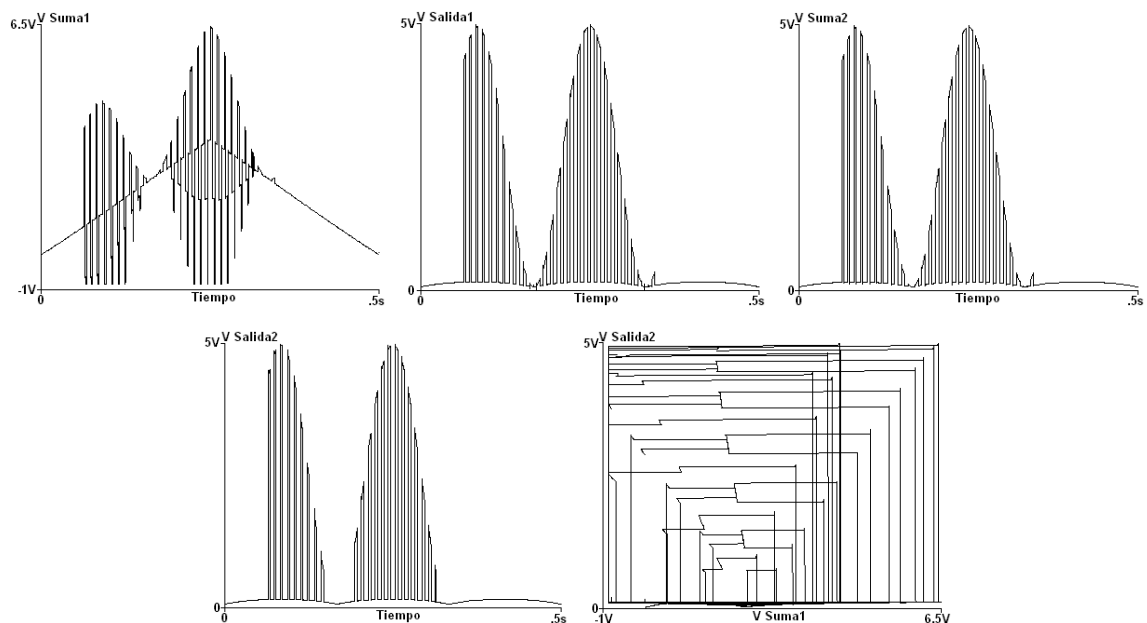


Figura 60. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 1ms, Retardo 2 = 2ms.

Vamos a buscar otras relaciones como la anterior. Los parámetros para esta prueba serán: Entrada senoide, amplitud 5V, Retardo 1 = 2ms, Retardo 2 = 8ms. Los resultados en este caso se presentan en la figura 61.

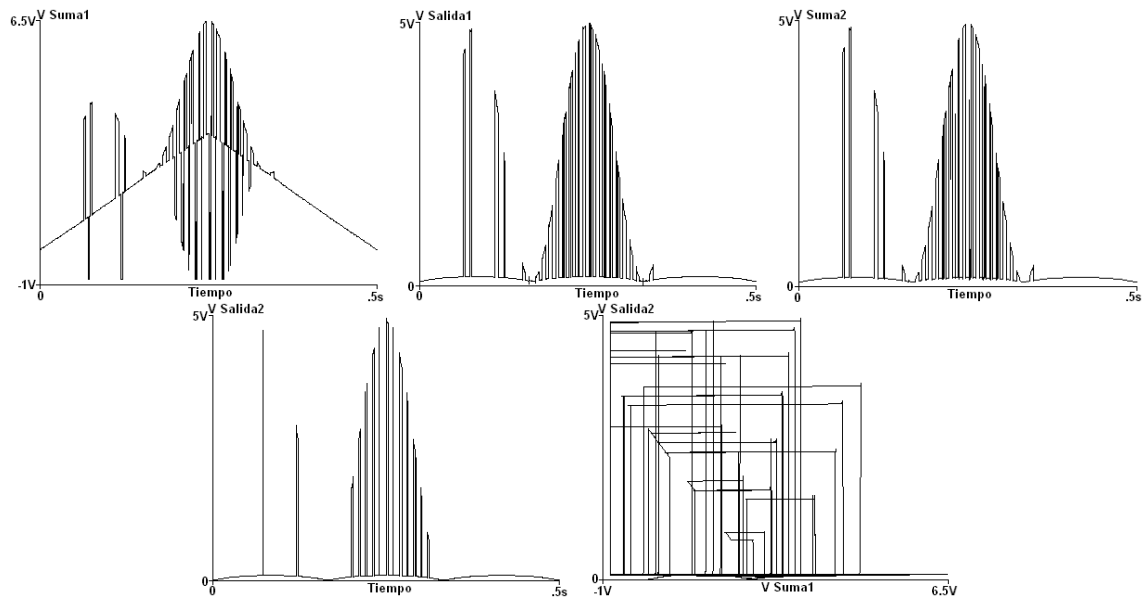


Figura 61. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 2ms, Retardo 2 = 8ms.

Los parámetros para la siguiente prueba serán: Entrada senoide, amplitud 5V, Retardo 1 = 2ms, Retardo 2 = 1ms. Los resultados en este caso se presentan en la figura 62.

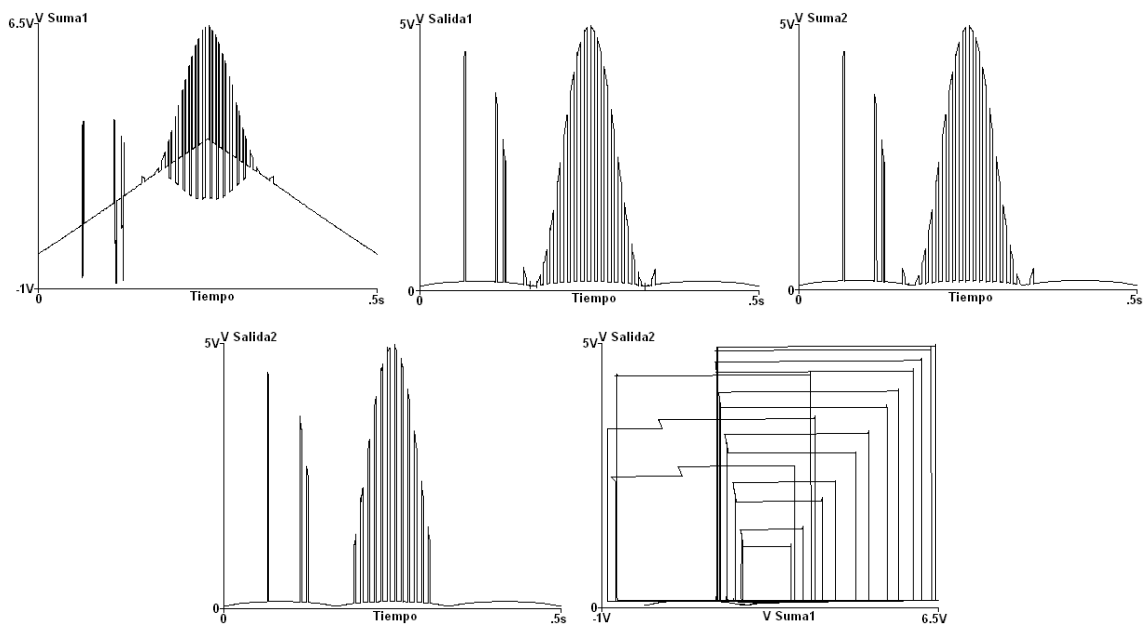


Figura 62. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 2ms, Retardo 2 = 1ms.

Veamos ahora otra relación de retardos, por ejemplo pensemos en una relación 3. Para este experimento los parámetros de las neuronas serán: Entrada senoide, amplitud 5V, Retardo 1 = 3ms, Retardo 2 = 1ms. Los resultados en este caso se presentan en la figura 63.

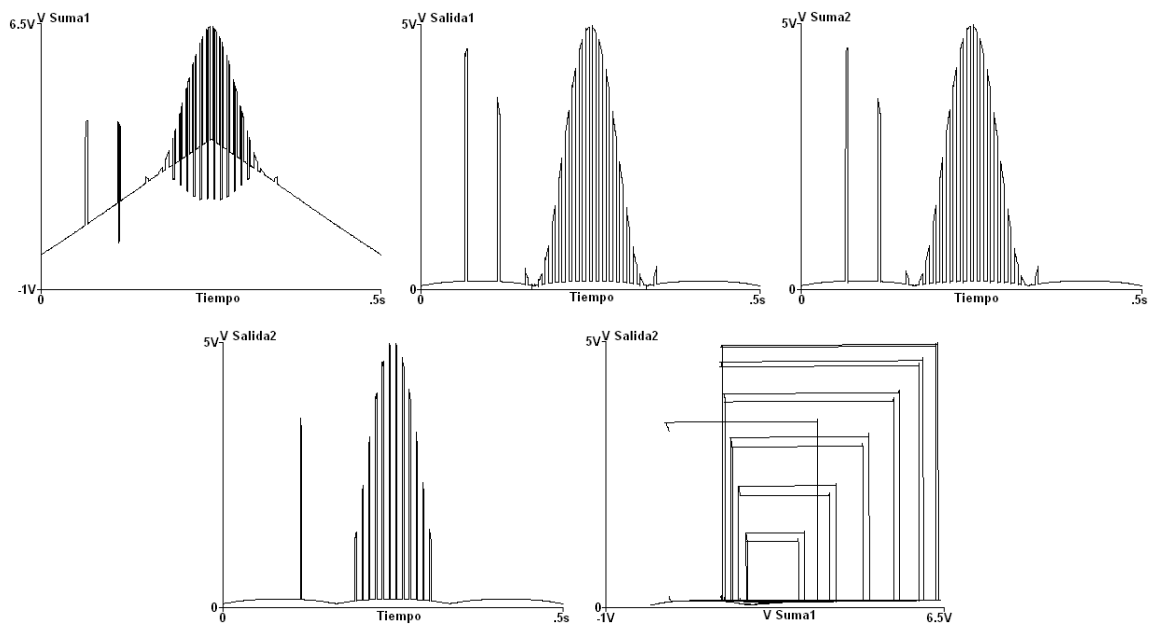


Figura 63. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 1ms, Retardo 2 = 2ms.

Para este experimento los parámetros de las neuronas serán: Entrada senoide, amplitud 5V, Retardo 1 = 1ms, Retardo 2 = 3ms. Los resultados en este caso se presentan en la figura 64.

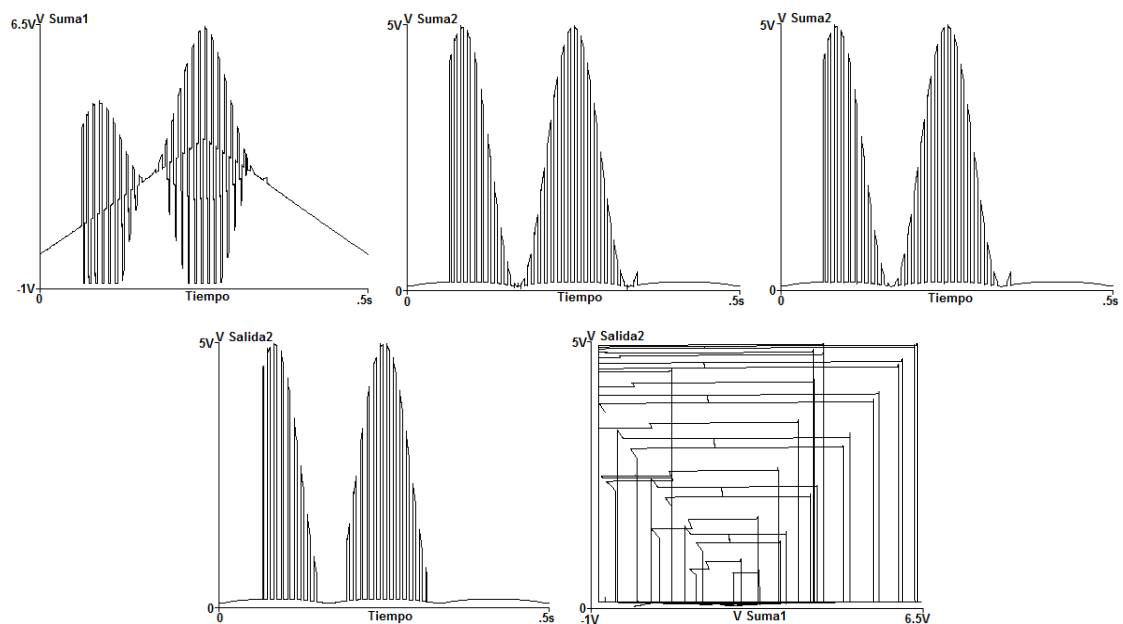


Figura 64. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= ms, Retardo 2 = 3ms.

Para el siguiente experimento y manteniendo la relación de tres entre ellos, los parámetros de las neuronas serán: Entrada senoide, amplitud 5V, Retardo 1 = 9ms, Retardo 2 = 3ms. Los resultados en este caso se presentan en la figura 65.

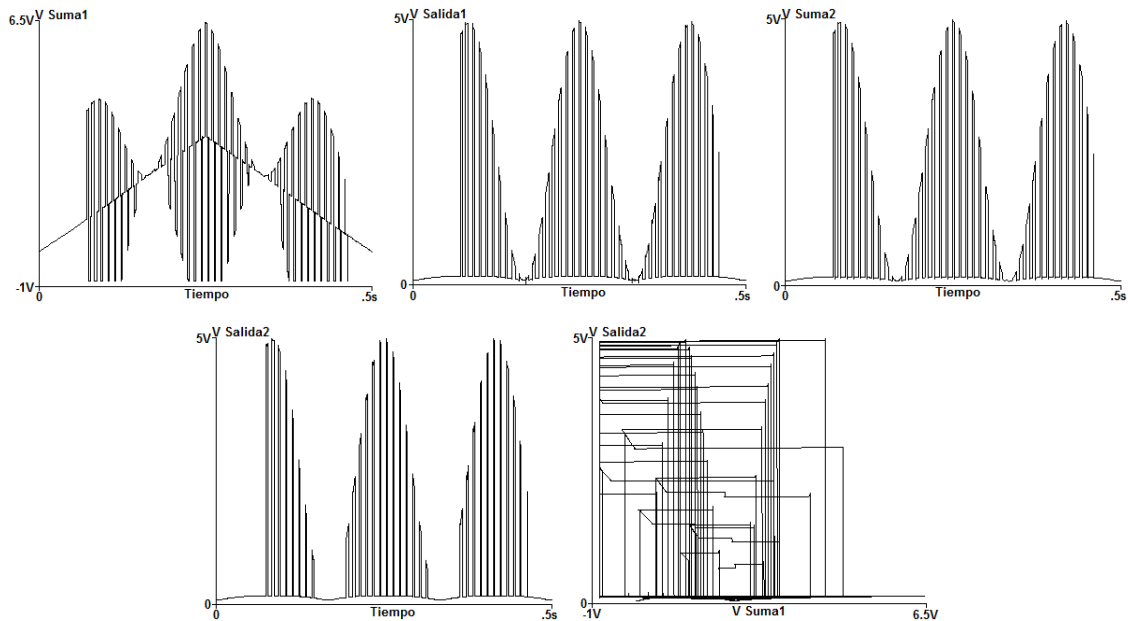


Figura 65. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 9ms, Retardo 2 = 3ms.

En el siguiente experimento y manteniendo la relación de tres entre ellos, los parámetros de las neuronas serán: Entrada senoide, amplitud 5V, Retardo 1 = 3ms, Retardo 2 = 9ms. Los resultados en este caso se presentan en la figura 66.

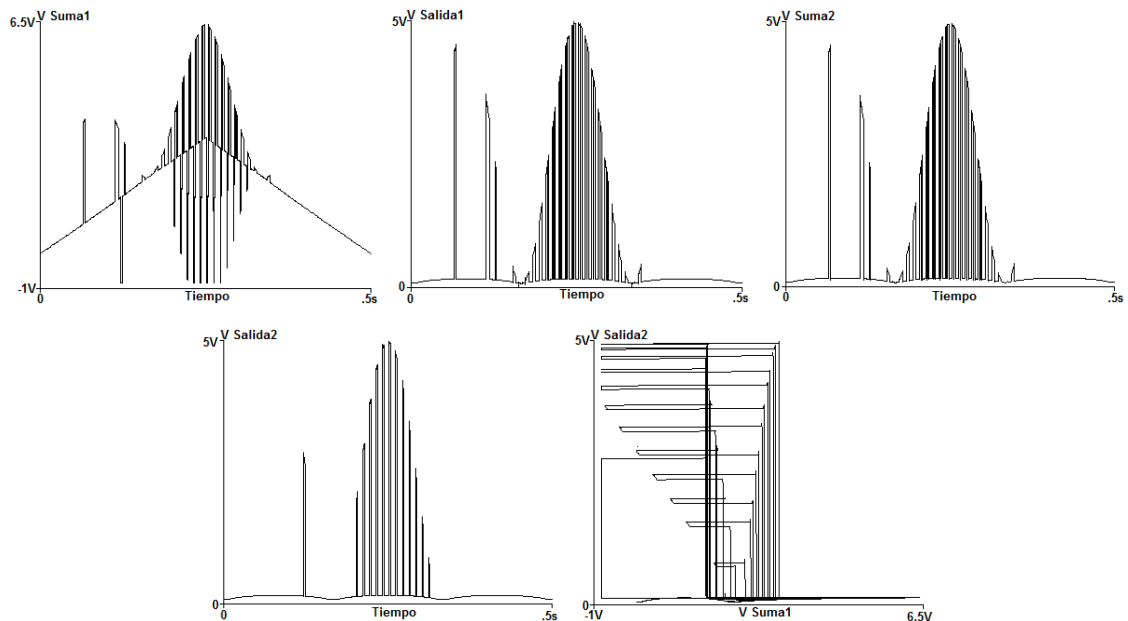


Figura 66. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 3ms, Retardo 2 = 9ms.

Vamos a analizar lo que se presenta en el caso de una relación de 5 entre los retardos axónicos. Para esto los parámetros de las neuronas serán: Entrada senoide, amplitud 5V, Retardo 1 = 5ms, Retardo 2 = 1ms. Los resultados en este caso se presentan en la figura 67.

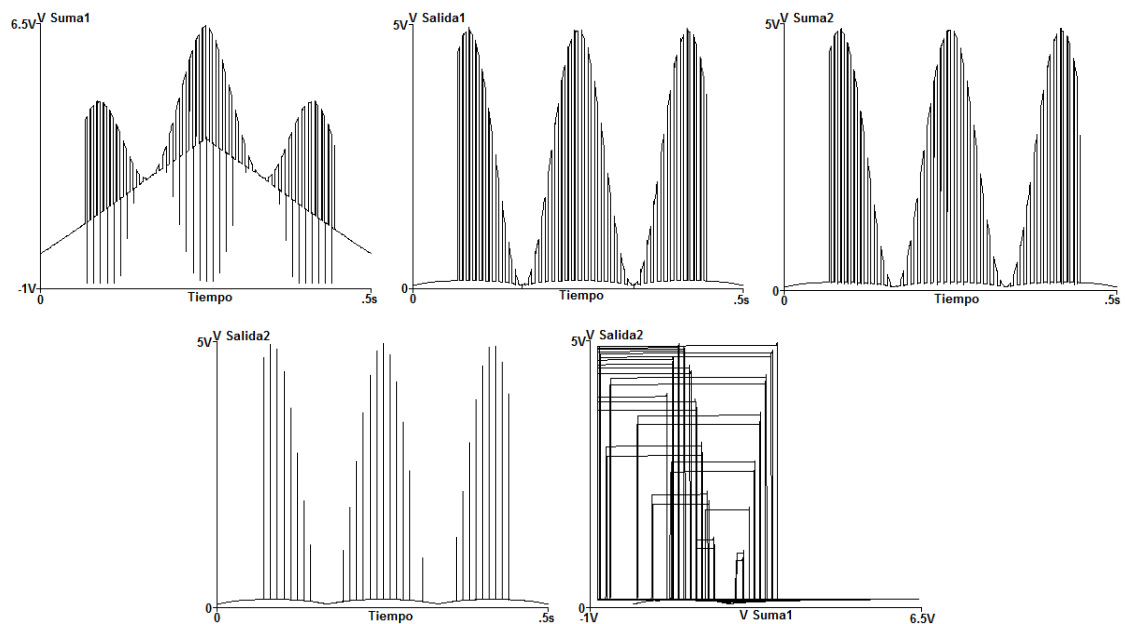


Figura 67. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 5V, Retardo 1= 1ms, Retardo 2 = 5ms.

De nuevo invertimos la relación entre retardos, por lo que los parámetros serán: Entrada senoide, amplitud 5V, Retardo 1 = 1ms, Retardo 2 = 5ms. Los resultados en este caso se presentan en la figura 68.

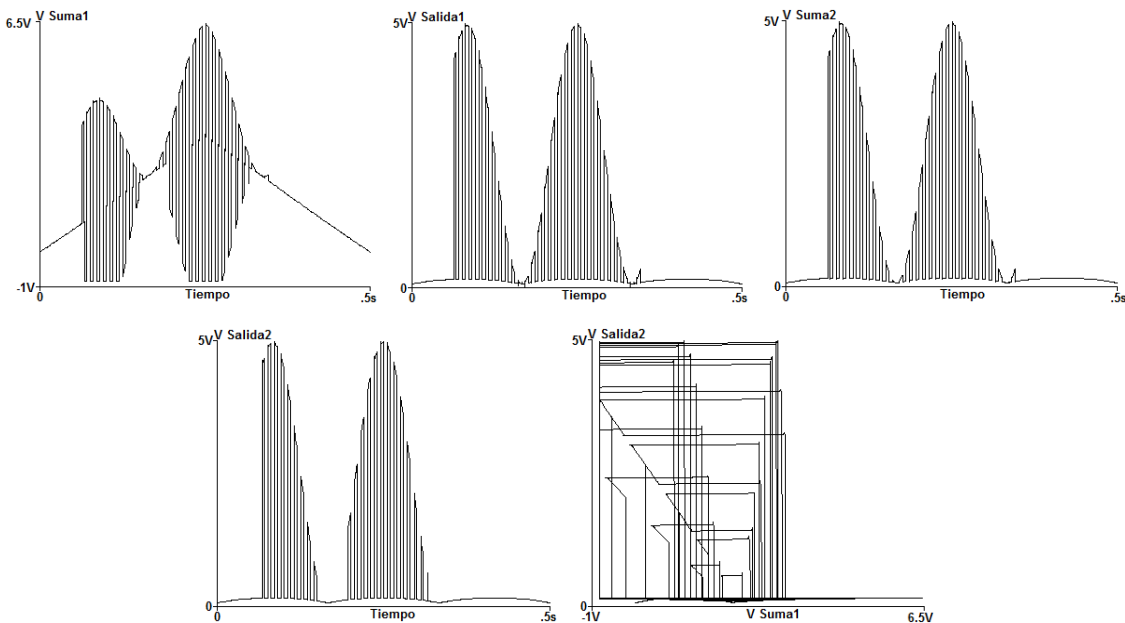


Figura 68. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 5V, Retardo 1= 5ms, Retardo 2 = 1ms.

Como es claro, se dio en este nuevo caso un cambio en la forma del plano fase al como la relación entre retardos. De nuevo se repite la alternancia entre dos estados de memoria de forma, la cual se modifica por la relación que existe entre sus retardos. Ejemplo de lo anterior se ve entre las figura 75 y 76.

9. Columna tectal con funciones de activación rampa

En esta sección vamos a analizar lo que sucede con una columna tectal con funciones de activación tipo Rampa y salidas con ráfagas parabólicas. En la figura 69 se muestra el diagrama de bloques de la columna tectal.

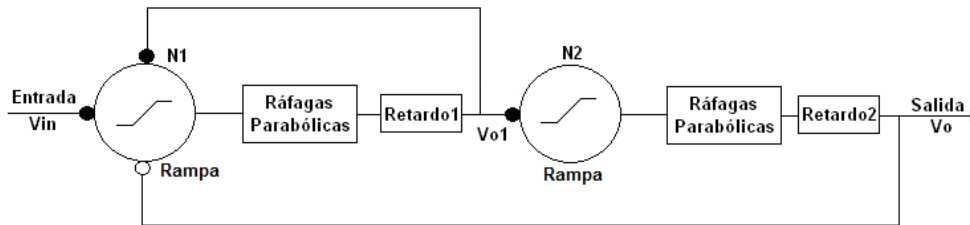


Figura 69. Diagramas de bloques de la columna tectal con funciones de activación rampas y salidas con ráfagas parabólicas.

En la figura 70 se muestra el diagrama esquemático de la columna tectal con funciones de activación escalón y salidas con ráfagas parabólicas.

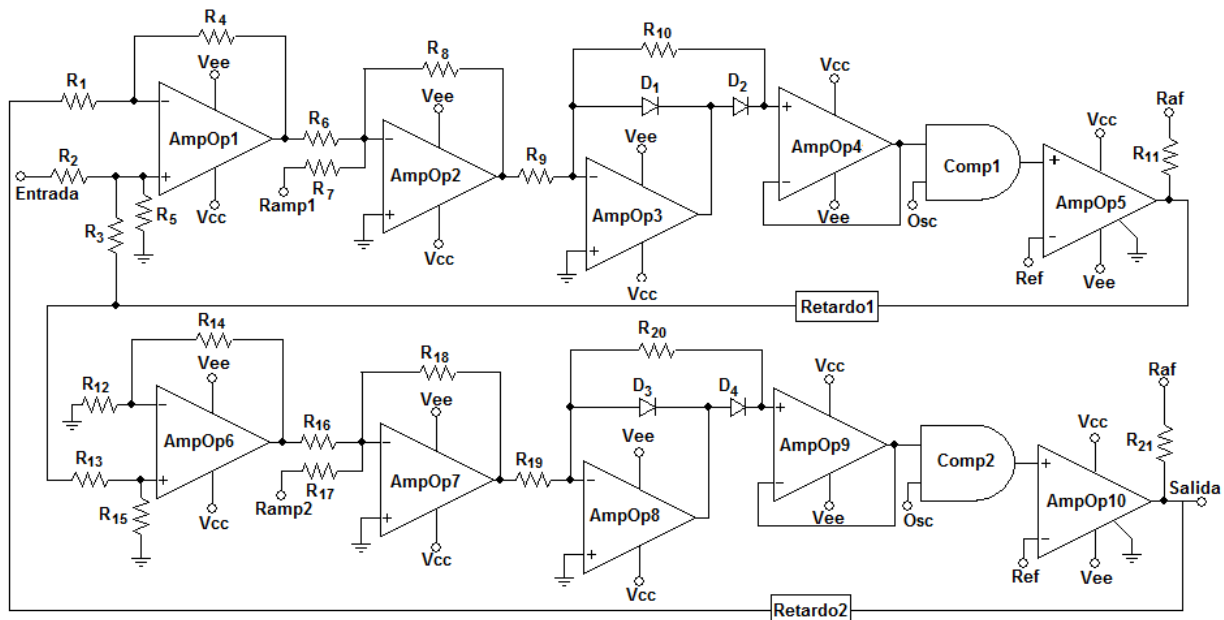


Figura 70. Diagrama esquemático de la columna tectal con funciones de activación rampa y salidas con ráfagas parabólicas.

Vamos a analizar lo que sucede con la columna tectal con función de activación rampa. También cambiamos la señal de entrada, pero con todos los parámetros de las neuronas idénticos, y dejamos de nuevo como parámetros libres los retardos de las neuronas. El siguiente experimento que presentaremos tiene los siguientes parámetros de las neuronas: Entrada senoide, amplitud 5V, Retardo 1 = 0, Retardo 2 = 0. Este es un experimento fundamental ya que nos da la información de la red sin presencia de los retardos. Los resultados en este caso se presentan en la figura 71.

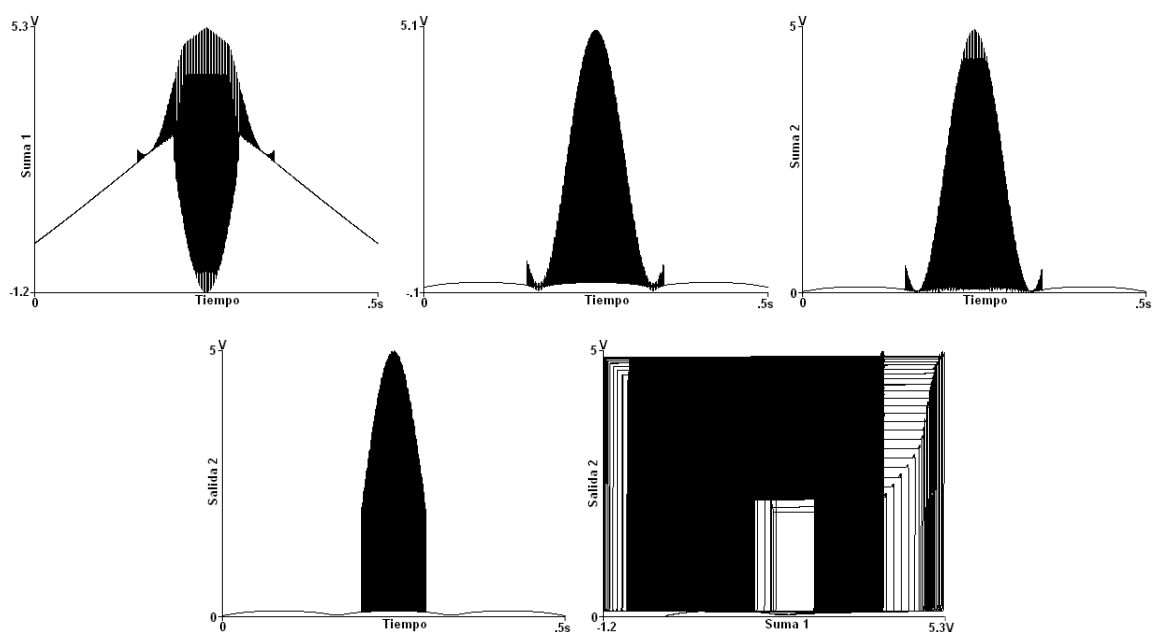


Figura 71. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 0ms, Retardo 2 = 0ms.

Vamos a empezar a variar los retardo, y para esto nuestro primer experimento tiene los siguientes parámetros: Entrada triangular, amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1 = 2ms, Retardo 2 = .5ms. Esta es de nuevo una relación entre retardos de 4. Los resultados se muestran en la figura 72.

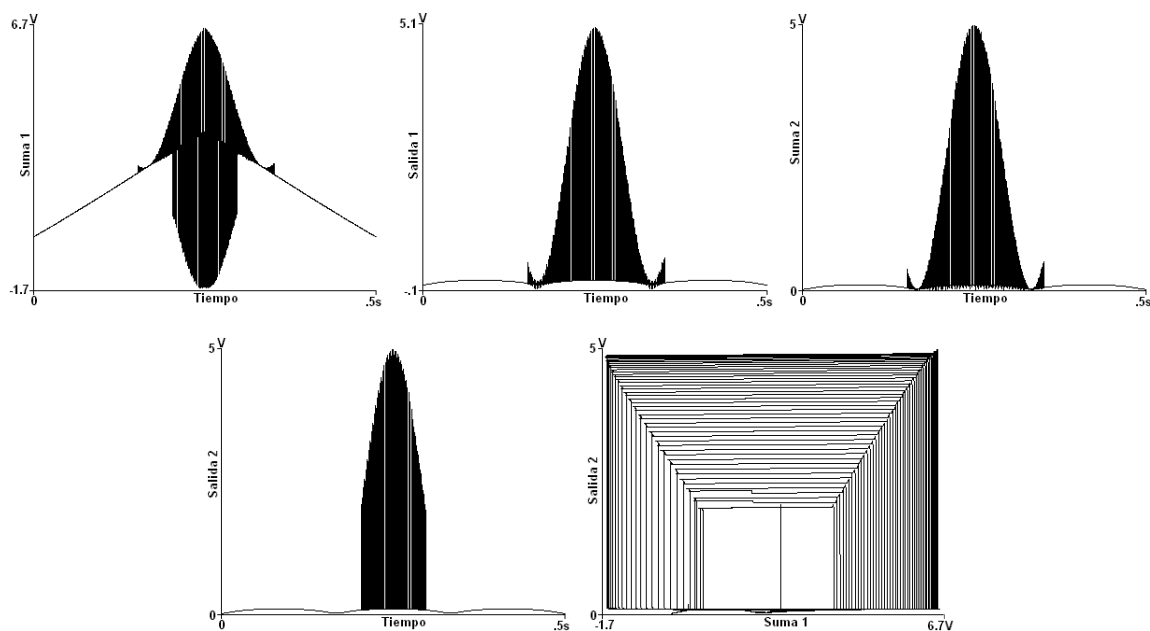


Figura 72. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 2ms, Retardo 2 = .5ms.

En nuestro segundo experimento vamos a buscar otra relación entre retardos de 4 con los siguientes parámetros: Entrada triangular, amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1 = 3.2ms, Retardo 2 = .8ms. Esta es de nuevo una relación entre retardos de 4. Los resultados se muestran en la figura 73.

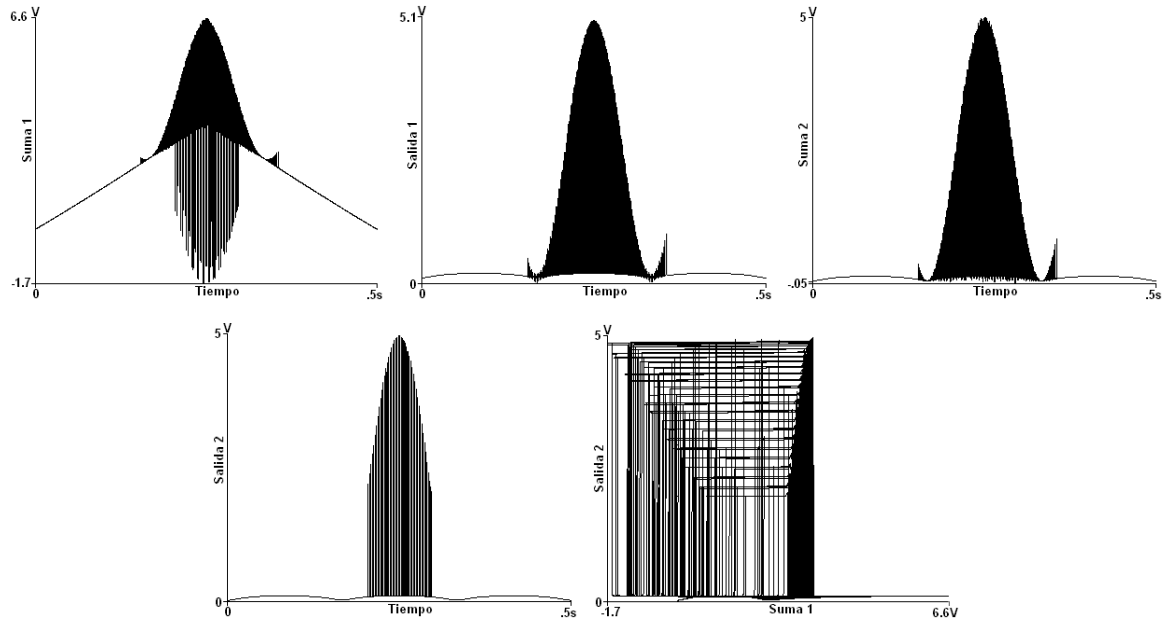


Figura 73. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 3.2ms, Retardo 2 = .8ms.

En nuestro siguiente experimento tendremos una relación entre retardos de 1/4 con los siguientes parámetros: Entrada triangular, amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1 = .5ms, Retardo 2 = 2ms. Esta es de nuevo una relación entre retardos de 4. Los resultados se muestran en la figura 74.

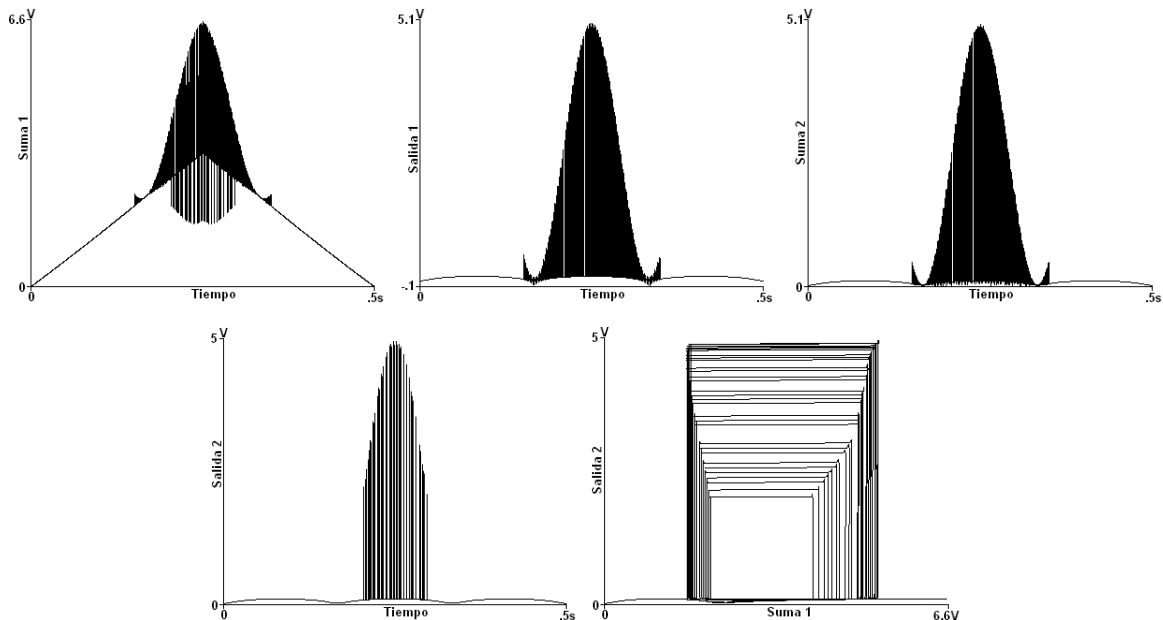


Figura 74. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= .5ms, Retardo 2 = 2ms.

Buscaremos otra relación $\frac{1}{4}$. En este caso los parámetros de la neurona serán: Entrada triangular, amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1 = .8ms, Retardo 2 = 3.2ms. Los resultados se muestran en la figura 75.

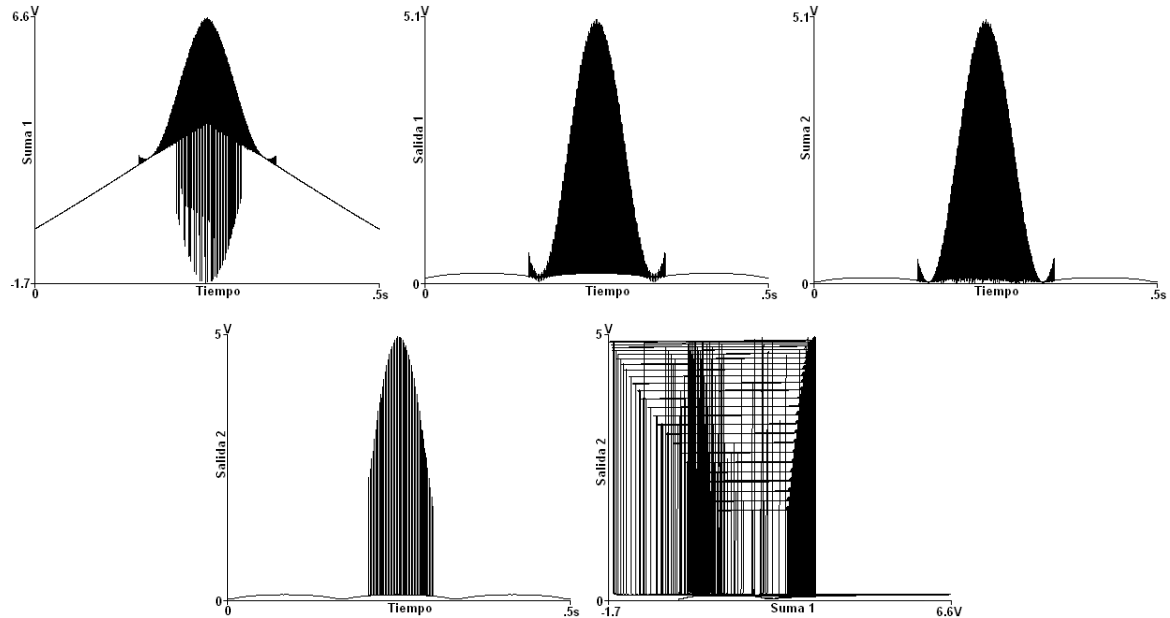


Figura 75. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= .5ms, Retardo 2 = 2ms.

Buscaremos una relación 3, creciendo los retardos con los siguientes parámetros: Entrada triangular, amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1 = 12ms, Retardo 2 = 4ms. Los resultados se muestran en la figura 76.

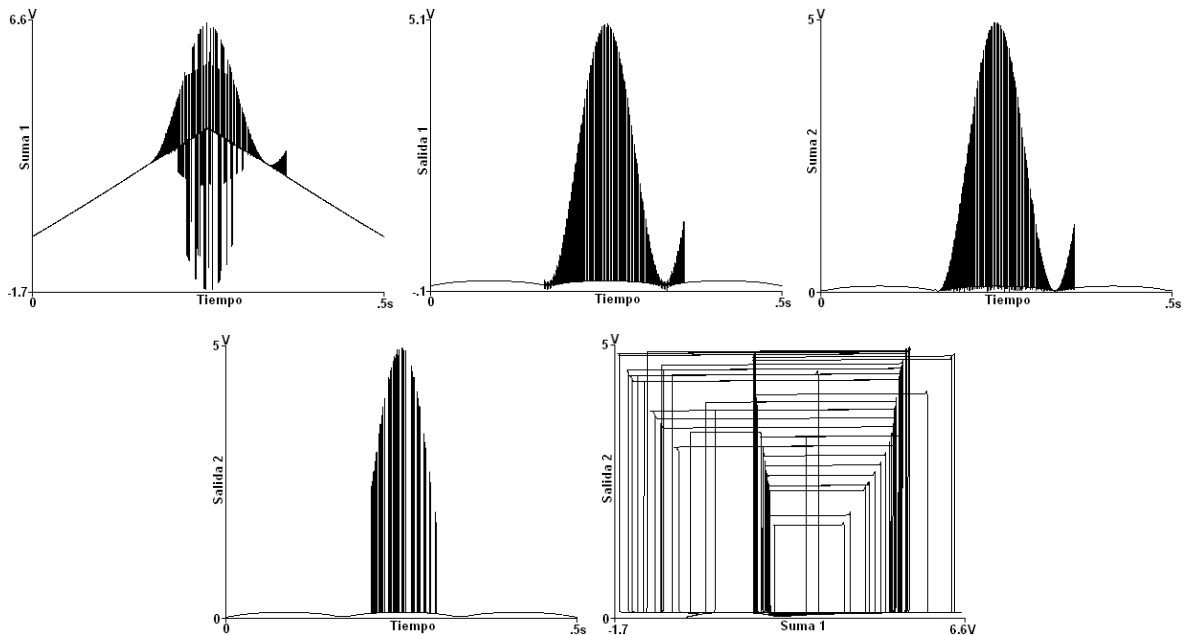


Figura 76. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 12ms, Retardo 2 = 4ms.

Veamos la relación de 1/3. En este caso los parámetros serán: Entrada triangular, amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1 = 4ms, Retardo 2 = 12ms. Los resultados se muestran en la figura 77.

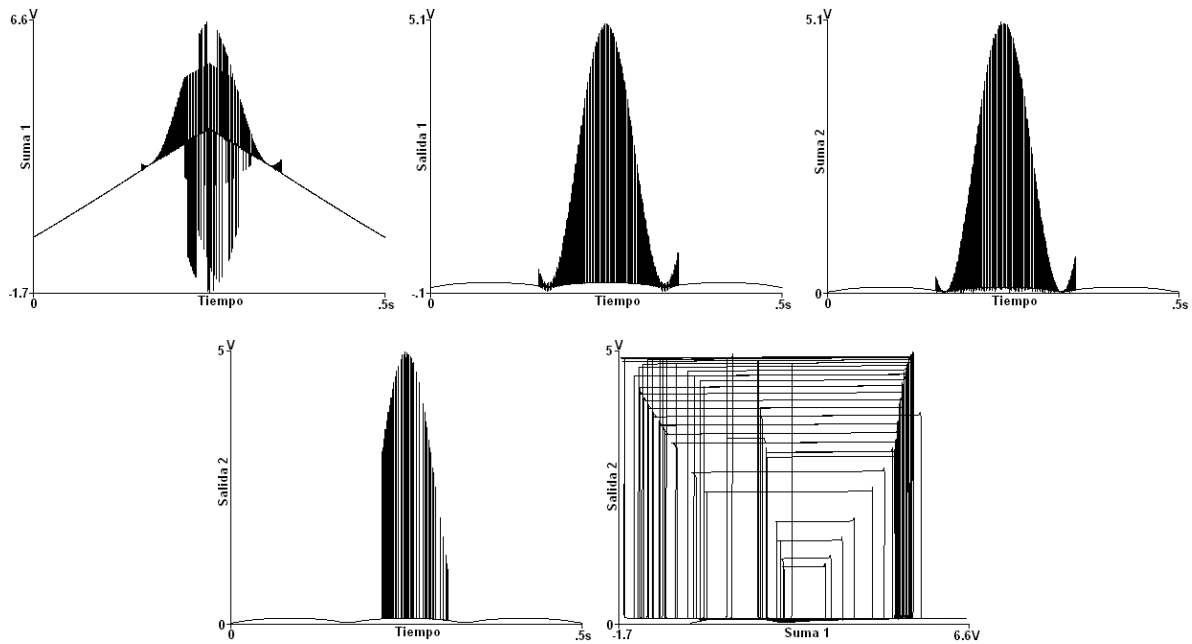


Figura 77. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 4ms, Retardo 2 = 12ms.

Vamos a experimentar en los extremos y para esto tendremos los siguientes parámetros: Entrada triangular, amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1 = 12ms, Retardo 2 = 1ms. La figura 78, nos muestra los resultados.

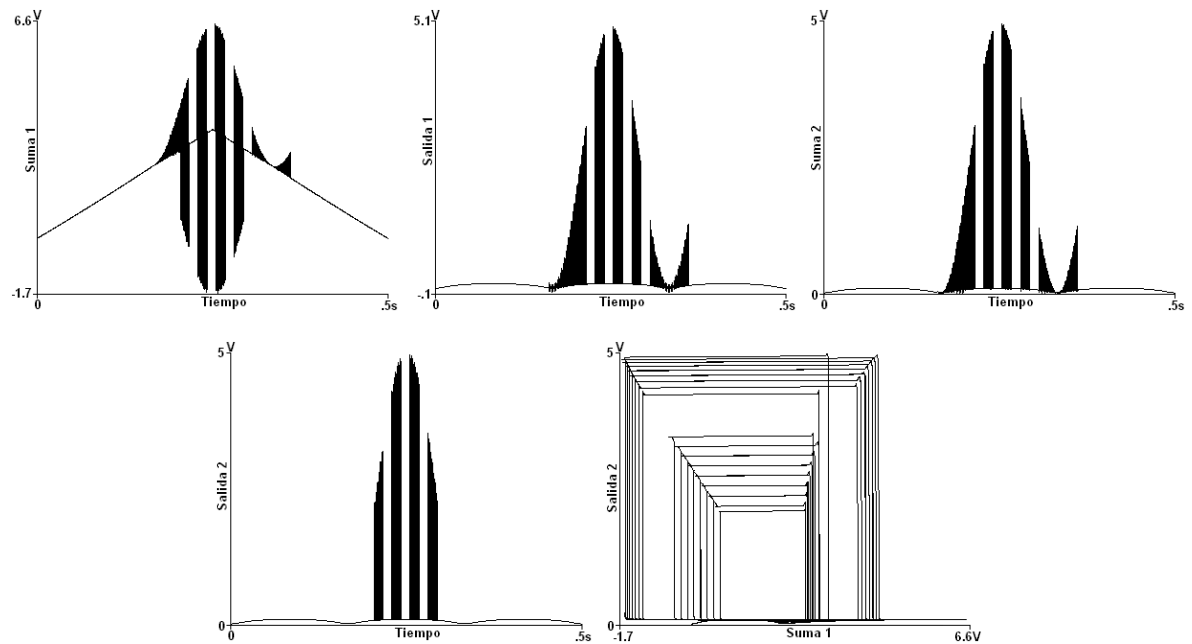


Figura 78. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 12ms, Retardo 2 = 1ms.

Veamos lo que sucede con la relación inversa, para esto tendremos los siguientes parámetros: Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 1ms, Retardo 2 = 12ms. Los resultados se muestran en la figura 79.

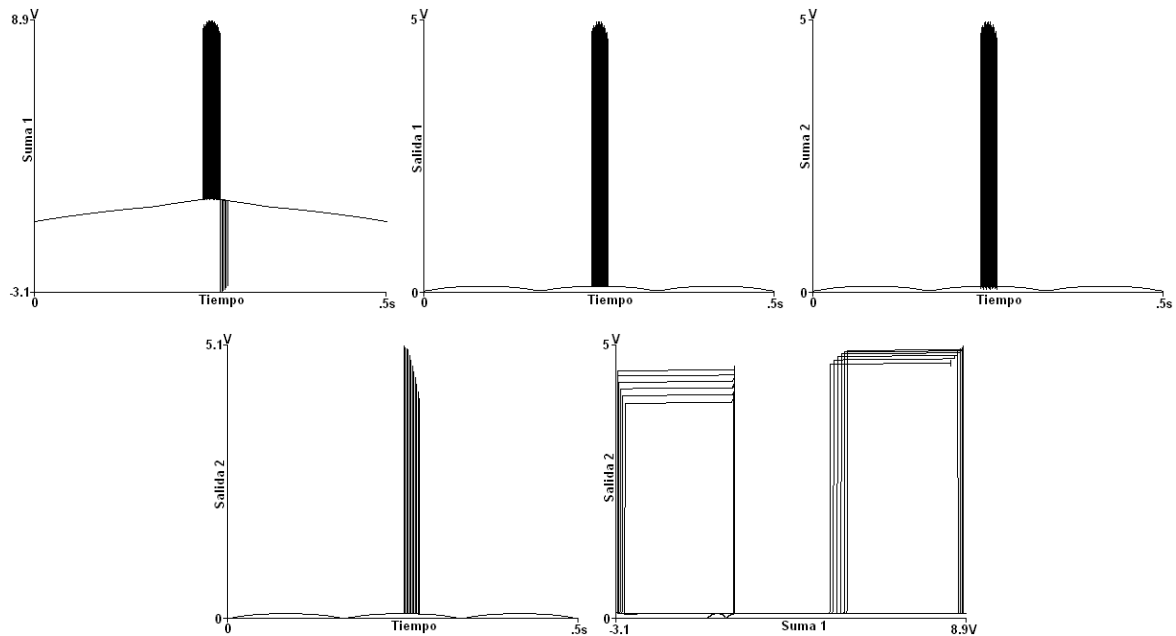


Figura 79. Entrada Triangular, Amplitud 5V, Voltaje de los umbrales = 1V, Retardo 1= 1ms, Retardo 2 = 12ms.

Como muestran nuestros experimentos las relaciones entre los retardos de las neuronas en una columna tectal, nos permite cambiar de forma de espacio fase en todos los casos estudiados.

De nuestros experimentos podemos ver que la relación 1:4 es diferente en forma del espacio fase a la relación 1:3. El tiempo de arribo de la señal entre las dos neuronas y el tiempo de la inhibición de la red por su salida son fundamentales para el cambio de forma. Esto lo vemos entre las figura 76 y 77, y las figuras 73 y 75.

Conclusiones

De los experimentos realizados nos podemos dar cuenta que los retardos juegan un papel no esperado en la conducta de los espacios fase de las columnas tectales.

De acuerdo con los datos que se obtuvieron podemos cambiar de formas de espacio fase con sólo cambiar la relación entre los tiempos de retardo. Lo anterior es importante ya que si entendemos por tiempos de retardo axónico las distancias que existen entre las neuronas para una velocidad de transmisión de señal en el axón constante, los espacios fase, y por lo mismo los estados de evocación dependen de estas distancias.

Si suponemos que las velocidades de transmisión axónica cambian dependiendo de agentes de la red, podemos suponer que la capacidad de una columna tectal de evocar estados es inmensa. Como se ve de los ejemplos de los experimentos presentados en este trabajo, las formas de plano fase que encontramos son claramente cuatro, la realidad es que si sumamos todas las posibilidades experimentadas por nosotros podemos hablar de un número muy grande de formas evocadas y los experimentos no agotan todas las posibilidades. Lo anterior nos presenta la enorme capacidad del cerebro. De nuevo este hecho es asociado a la columna tectal porque vemos que esto no se presenta en el caso de las neuronas con inhibición propia

Referencias

A. Gamundí, G. Timoner, M.C. Nicolau, R.V. Rial, S. Esteban, M.A. Langa (2005). La obra de Santiago Ramón y Cajal en la *Revista Trimestral Micrográfica (Trabajos del Laboratorio de Investigaciones Biológicas)*. REV NEUROL; 40 (11): 696-700

E. Mateos Santillán, J. L. Pérez Silva (2009). Design, at transistor level, of a neuron with axonic delay. *Journal of Applied Research and Technology*, Vol.7 No.1: 41-50.

Lara R, Arbib MA, Cromarty AS. (1982) The role of the tectal column in facilitation of amphibian prey-catching behaviour: a neural model. *J. Neuroscience* 2(4): 531-530.

Mc Culloch W.S., Pitts W.A. (1943). A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity. *Bull. Math. Biophys.* 5. p. 115-133.

S. M. Baer, J. Rinzel, H. Carrillo (1995). Analysis of an autonomous phase model for neuronal parabolic bursting *J. Math. Biol.* 33: 309-333.

J. L. Pérez Silva, A. Garcés Madrigal, Francisco Cabiedes Contreras, A. Miranda Vitela. (2012). Estudios en modelos electrónicos de columnas tectales, Informe Técnico II-TINF-2012-312, CCADET UNAM.

J. L. Pérez Silva, A. Garcés Madrigal, Francisco Cabiedes Contreras, A. Miranda Vitela. (2014). Modulación de la memoria a corto plazo, Informe Técnico II-TINF-2012-314 CCADET UNAM.