



**CCADET**

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

## Informe Técnico

# Estudio del modelo Electrónico de una neurona con función de activación Sigmoides-Zona Muerta

---

**José Luis Pérez Silva  
Antonio Garcés Madrigal**

**Noviembre de 2015**

**Modelos Electrónicos de Neuronas**

**Financiamiento interno**

# Estudio del modelo Electrónico de una neurona con función de activación Sigmoides Zona Muerta.

José Luis Pérez Silva, Antonio Garcés Madrigal

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM.

## Resumen

Durante muchos años de desarrollo electrónico de modelos de neuronas, hemos pensado sobre las diferentes formas que la función de activación de neuronas y hemos desarrollado modelos con función de activación del tipo escalón, el tipo rampa, el tipo sigmoide, el tipo conmutación, etcétera. Todos estos modelos han sido estudiados en redes pequeñas como la columna tectal y las de umbral-axón, en formas diferentes como las neuronas del tipo Mc Cullock y Pitts y las neuronas tipo integrador con fugas. En todos estos modelos hemos funcionado en sistemas con y sin ráfagas. El último desarrollo que tenemos es el modelo de neuronas con sinapsis de voltaje-frecuencia.

En este trabajo decidimos estudiar un modelo de neurona que tiene las posibilidades de una sigmoide seguida de una función zona muerta.

En nuestro estudio encontramos que se dan los fenómenos de evocación, así como los estados de alta selectividad, en los cuales la neurona responde con una delta de Dirac.

Encontramos también que por la función sigmoide, al variar la ganancia de la función de activación se da un corrimiento en el eje del tiempo de las respuestas, tanto hacia el máximo valor, como hacia el mínimo, dependiendo del valor de la ganancia corra hacia el máximo o al mínimo valor. Esto es interesante porque permite con la variación de un solo parámetro, la variación del corrimiento de la frecuencia, y por lo tanto la variación de la memoria a corto plazo.

## Índice

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introducción</b>                               | <b>3</b>  |
| <b>1.    Modelo de neurona</b>                    | <b>4</b>  |
| <b>2.    La función de activación zona muerta</b> | <b>6</b>  |
| <b>3.    Análisis de la neurona</b>               | <b>6</b>  |
| <b>4.    Experimentos</b>                         | <b>8</b>  |
| <b>4.1  Resultados sigmoide zona muerta</b>       | <b>8</b>  |
| <b>4.2  Resultados zona muerta sigmoide</b>       | <b>19</b> |
| <b>Conclusiones</b>                               | <b>28</b> |
| <b>Referencias Bibliográficas</b>                 | <b>28</b> |

## Introducción

De acuerdo con Marr (Marr, 1969) es posible que existan neuronas más complicadas, las que se siguen unas a otras. Inspirados por esta idea es que pensamos estudiar un modelo de neurona que tiene las posibilidades de una sigmoide seguida de una función zona muerta, pero después de trabajar los modelos llegamos a la conclusión de que al manipular las funciones de activación seguida una de la otra podíamos obtener el resultado deseado, y es posible cambiar la secuencia de seguimiento entre las dos funciones de activación.

También estudiamos que pasaría si se cambiara la secuencia de seguimiento de las funciones de activación y tuviéramos una función de activación zona muerta seguida de una función de activación sigmoide.

Nuestro circuito consiste en primer lugar de un circuito sumador completo para construir la entrada sináptica en forma de una suma algebraica de sinapsis tanto excitadoras como inhibitoras. Después del sumador se tienen las funciones de activación zona muerta y sigmoide o sigmoide y zona muerta dependiendo de la configuración que se desea tener.

Básicamente tenemos que a la respuesta del sumador le aplicamos una función sigmoide o zona muerta y a la respuesta de esta función le aplicamos una función sigmoide o zona muerta.

En este trabajo mostramos el diseño y estudio de neuronas de este tipo, con dos formas de función de activación seguidas. Vamos a presentar los resultados del estudio que realizamos, en el cual lo que se hizo fue cambiar los elementos dinámicos del sistema, como son la pendiente de la sigmoide y los valores de umbral de la zona muerta. En principio esperamos que el cambio de orden en las funciones de activación, nos de conductas diferentes de las neuronas, es decir que no esperamos que la secuencia sigmoide → Zona muerta, se igual a la secuencia Zona muerta → Sigmoide.

Pensamos también que por la función sigmoide, al variar la ganancia de la función de activación se da un corrimiento en el eje del tiempo de las respuestas, tanto hacia el máximo valor, como hacia el mínimo, dependiendo del valor de la ganancia corre hacia el máximo o al mínimo valor. Esto es interesante porque permite con la variación de un solo parámetro, la variación del corrimiento de la frecuencia, y por lo tanto la variación de la memoria a corto plazo.

## 1. El modelo de neurona

Nuestro modelo se fundamenta en el modelo de neurona con función de activación zona muerta presentado en el informe técnico (José Luis Pérez Silva, et al, 2009). El nuevo modelo electrónico de neurona se presenta en forma de diagrama de bloques en la figura 1.

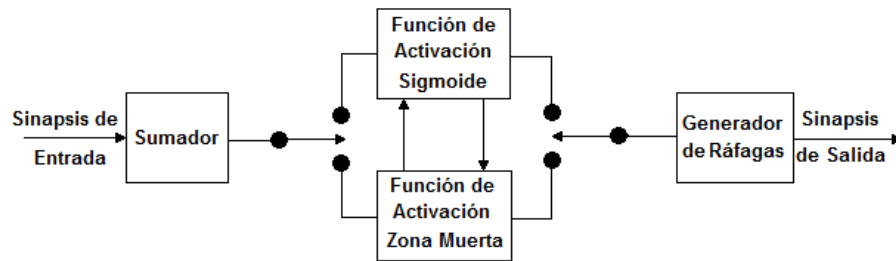


Figura 1. Diagrama de bloques del modelo de neurona.

En la figura 2 se muestra el diagrama esquemático del modelo de neurona

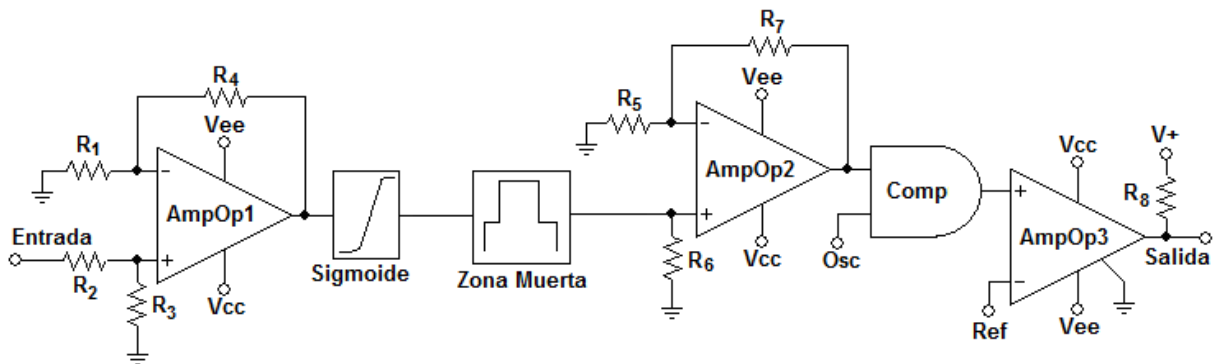


Figura 2. Diagrama esquemático del modelo de neurona sigmoide zona muerta.

En la figura 3, se muestra el diagrama esquemático del modelo de neurona zona muerta sigmoide.

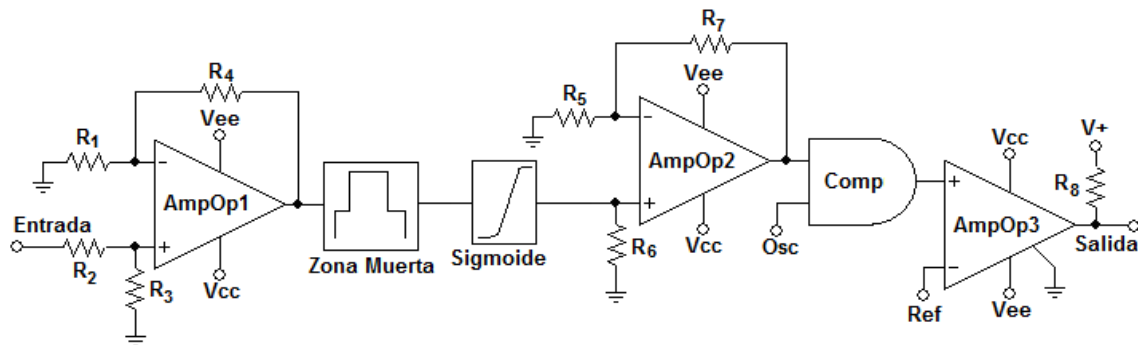


Figura 3. Diagrama esquemático del modelo de neurona zona muerta sigmoide.

En la figura 4 se muestra el diagrama esquemático del recuadro de la sigmoide. (José Luis Pérez Silva, et al, 2011).

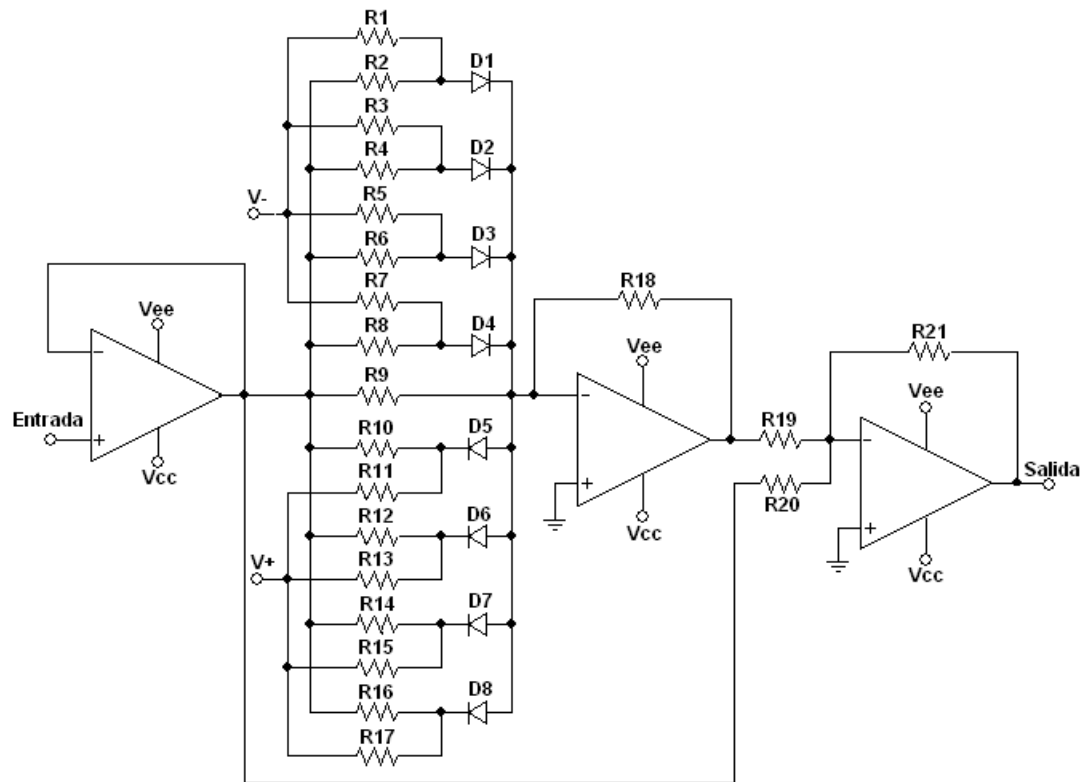


Figura 4. Diagrama esquemático de la función de activación sigmoide

En la figura 5 se muestra el diagrama esquemático del recuadro de la función de activación zona muerta. (José Luis Pérez Silva, et al, 2009).

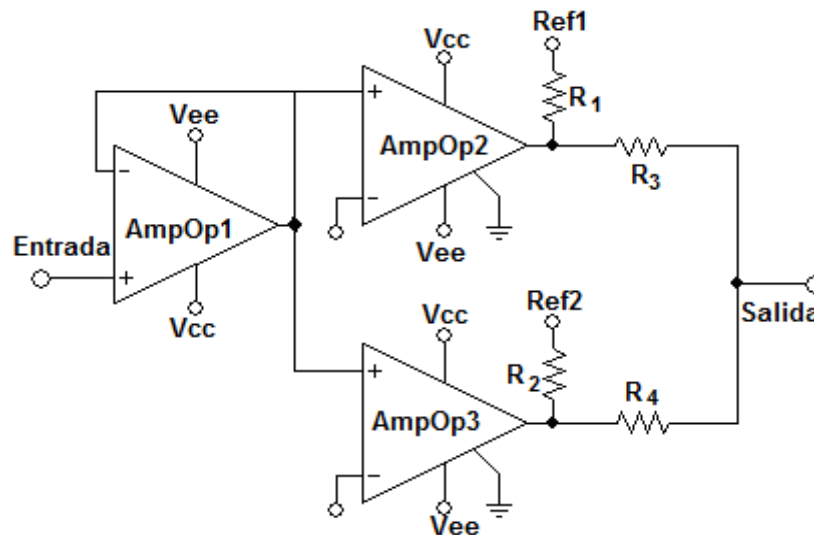


Figura 5. Diagrama esquemático de la función de activación zona muerta.

Del diagrama esquemático nos es claro que en el caso de la función de activación tipo sigmoide tenemos como parámetros libres los siguientes: La amplitud de la sigmoide, la pendiente de la sigmoide y los valores de saturación de la sigmoide. En el caso de la zona muerta los parámetros que tenemos libres son los dos valores de umbral de los comparadores y las amplitudes de las señales de salida.

## 2. La función de activación zona muerta

La función de activación escalón con zona muerta es una función lineal a trazos también llamada doble comparador. Esta función determina la forma de la respuesta conforme a los valores de umbral. Para ésta función de activación se describirá su modelo matemático y su implantación electrónica por medio de amplificadores operacionales. (José Luis Pérez Silva, et al, 2009).

En la zona muerta de la función de activación EZM no existe respuesta alguna del procesador neuronal o permanece constante en un cierto nivel el cual puede ser un potencial de reposo o un primer umbral de activación de la neurona. La respuesta del procesador neuronal tendrá dos activaciones a partir de los niveles de umbral fijos de manera instantánea y el tamaño de la zona muerta estará determinado por la separación que hay entre estos dos umbrales.

La activación de la respuesta del procesador neuronal es muy parecida a la del modelo de neurona McCulloch y Pitts (McCulloch W. S. y Pitts W., 1943), pero ahora con dos umbrales. Un aspecto importante que se debe mencionar es que cuando esa separación entre umbrales sea nula entonces la zona muerta desaparecerá, por consecuencia está función se convertirá en el simple escalón o una función de activación escalón.

Está función puede verse también como un doble detector de umbral el cual se puede analizar por medio de un doble comparador de umbral.

Para el modelo electrónico se emplean dos comparadores que responden cuando el nivel de potencial exceda los niveles de referencia fijos que fungirán como los niveles de umbral U1 y U2.

## 3. ANÁLISIS DE LA NEURONA.

Vamos a analizar lo que pasa en la neurona al cambiar los parámetros internos como son la pendiente y la ganancia de la sigmoide, los umbrales de la función de activación Zona Muerta y otros.

El primer estudio que realizamos fue medir el ancho del pulso en ms, al variar la pendiente de la sigmoide para una Ganancia = .5, U1 = .5V, U2 = 2.5V. La gráfica de la figura 6, muestra los resultados.

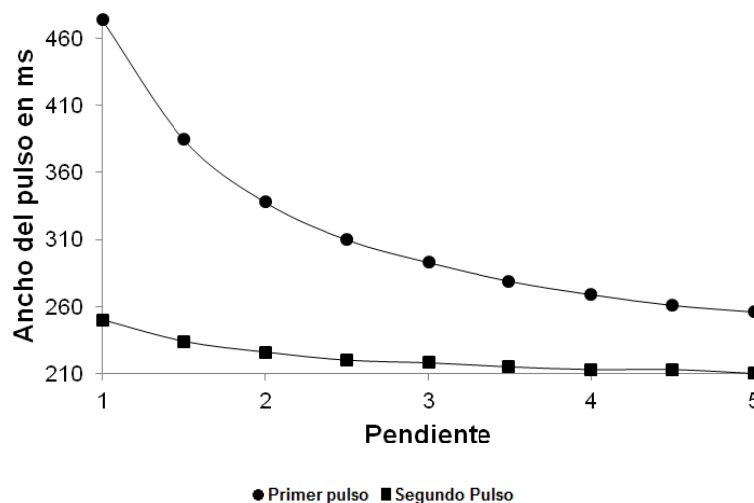


Figura 6. Como función de la pendiente.

El segundo estudio consistió en medir el ancho del pulso al variar la ganancia de la Sigmoide con los siguientes parámetros: Pendiente = 2, U1 = .5V, U2 = 2V. La gráfica con los resultados se presentan en la figura 7.

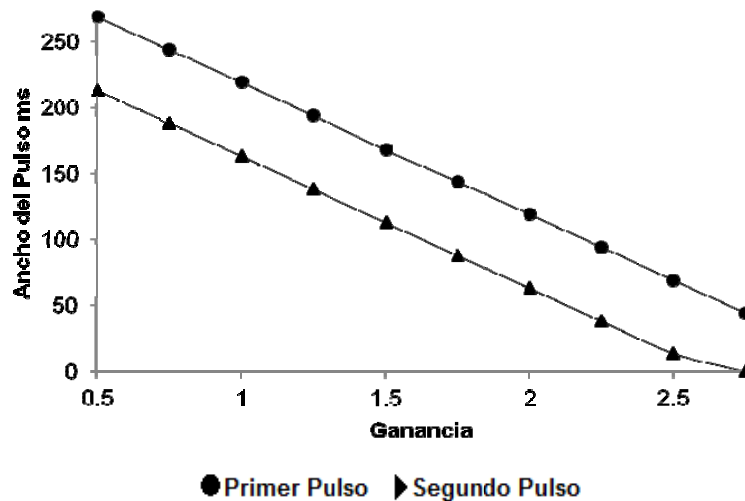


Figura 7. Como función de la ganancia.

El tercer estudio fue analizar cómo cambia el ancho de pulso en función de los umbrales de la Zona Muerta. Es claro que será el mismo al cambiar uno de ellos y mantener el otro fijo para ambos comparadores. Los resultados se ven en la figura 8.

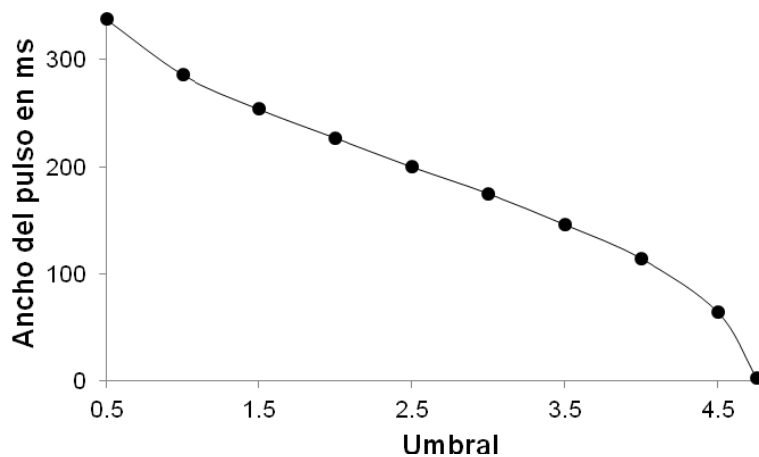


Figura 8. Variación del ancho del pulso como función del umbral.

Los resultados nos indican cómo cambia la señal respuesta de la neurona al cambiar la pendiente, la ganancia y el umbral en la neurona. De la figura 6 nos damos cuenta que el ancho de pulso disminuye conforme disminuye la pendiente de la sigmoide, lo que es claro ya que la función de activación presenta menor amplitud en su salida al variar la pendiente de la sigmoide, al tener una pendiente mayor los cambios en el ancho de pulso son mayores. Lo mismo lo podemos ver en la relación del cambio del ancho del pulso en función de la ganancia, ya que al aumentar la ganancia de la sigmoide crece la salida y al disminuirla decrece. La diferencia de la dependencia entre la variación de estos parámetros es que la variación de la figura 6 es exponencial, mientras que la variación de la figura 7 es lineal.

La figura 8 nos muestra como varía el ancho de pulso respecto al umbral de la zona muerta, y lo sorprendente en este caso es que no es una relación lineal.

## 4. Los Experimentos

El estudio que realizamos del modelo electrónico de neurona está constituido de dos partes, la primera consiste de los experimentos realizados con la configuración de la figura 2, es decir la sigmoide seguida de la zona muerta. La segunda parte es la relacionada con los experimentos realizados con la configuración de la figura 3 con las funciones de activación zona muerta seguida de sigmoide. Para cada una de estas partes de la serie de experimentos consideramos el estudio de todas las posibles variaciones de los parámetros libres de los modelos de neurona.

Para los resultados de los experimentos presentamos de cada uno de ellos en cada figura:

- (a) La señal de entrada
- (b) La salida de la sigmoide
- (c) La salida de la zona muerta
- (d) La respuesta de la neurona
- (e) El plano fase, para ver los efectos de la memoria a corto plazo.

### 4.1. Resultados sigmoide zona muerta

Presentamos el análisis de la neurona con una entrada triangular. Los parámetros para este experimento son: Entrada Triangular, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = 2, m = 5, amplitud = 3. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 9.

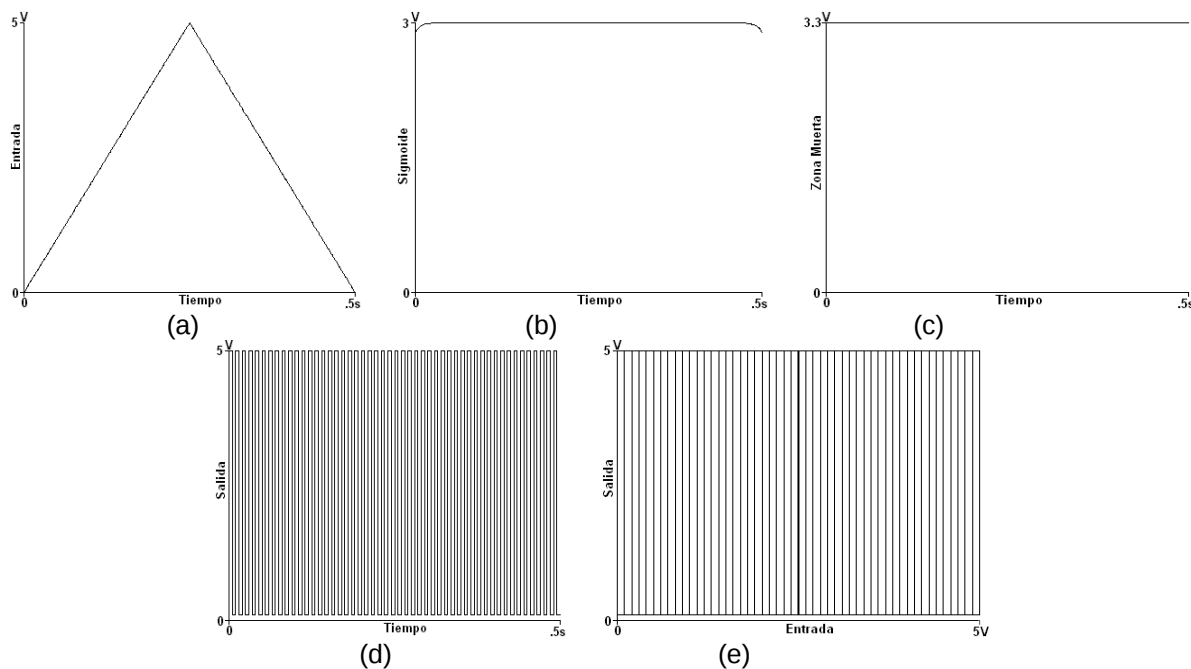


Figura 9. Resultados con entrada triangular, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = 2, m = 5, amplitud = 3.

Como segundo experimento presentamos una entrada romboide con los siguientes parámetros: amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = 2, m = 5, amplitud = 3. Los resultados se muestran en la figura 10.

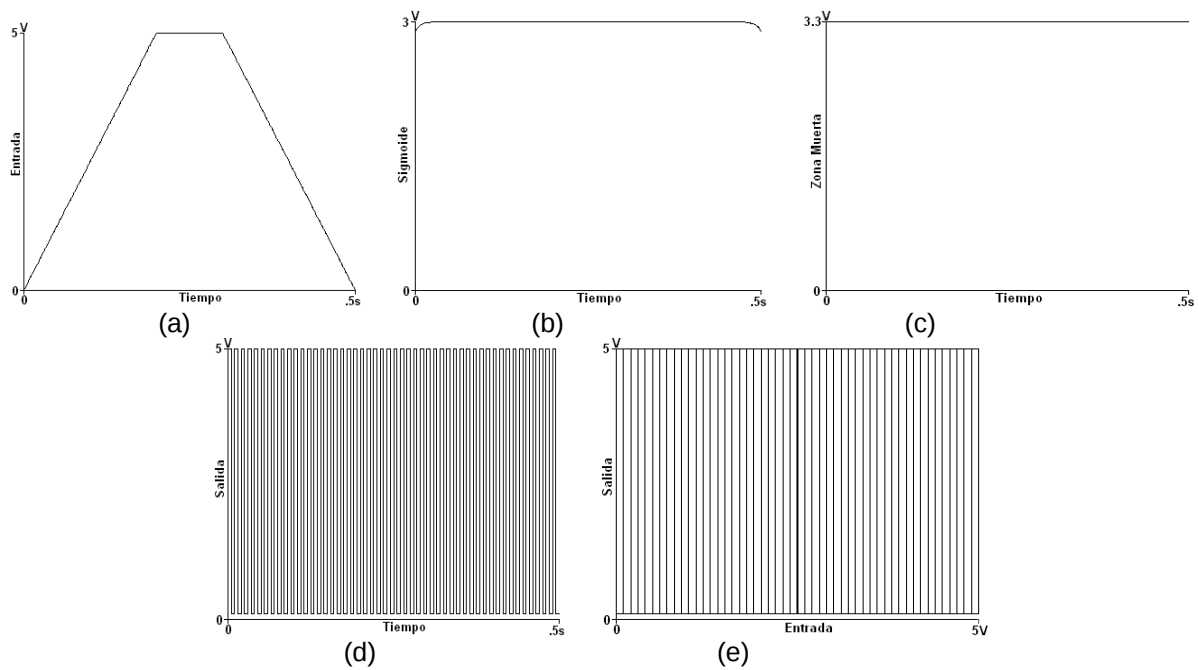


Figura 10. Resultados con entrada romboide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = 2,  $m = 5$ , amplitud = 3.

Vamos a analizar otros dos resultados de experimentos. El primero será el que tiene por parámetros: entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = 2,  $m = 5$ , amplitud = 3. Los resultados del experimento se muestran en la figura 11.

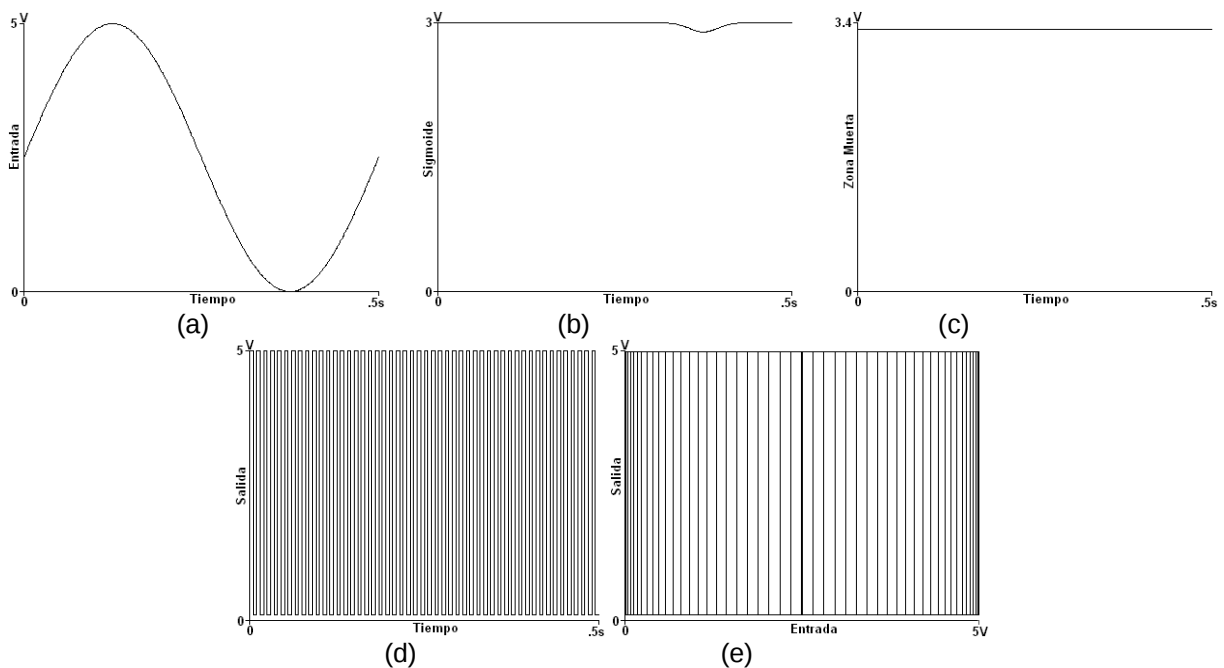


Figura 11. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = 2,  $m = 5$ , amplitud = 3.

El siguiente tendrá por parámetros de la neurona los siguientes: Entrada senoide amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2.5$ , Ganancia = 1.7,  $m = 5$ , amplitud = 3. En la figura 12 se muestran los resultados. En la figura 12e se muestra el plano fase.

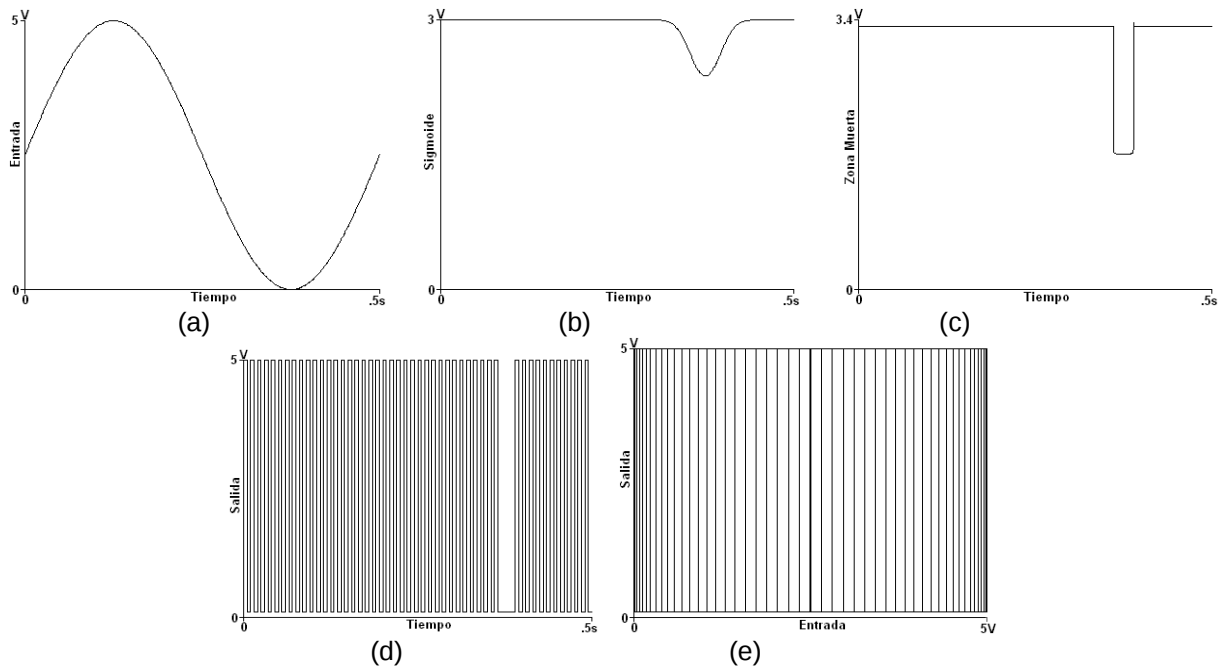


Figura 12. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2.5$ , Ganancia = 1.7,  $m = 5$ , amplitud = 3.

Se puede ver de estos dos primeros experimentos que se presenta un ejemplo de evocación, ya que con diferentes entradas se obtienen los mismos planos fase. En los otros dos podemos observar que ante la misma entrada pero con diferentes parámetros de ganancia de la sigmoide, tenemos los mismos resultados en los planos fase. Esto se puede ver al sobreponer los dos planos fase, como se muestra en la figura 1 bis.

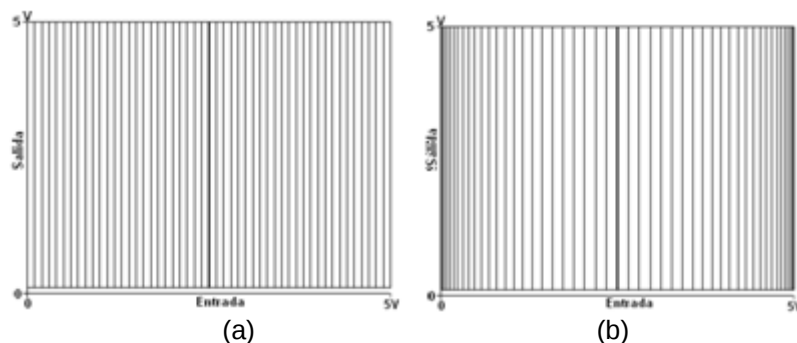


Figura 12bis. Sobre posición de los planos fase de las figuras: (a) 9 y 10, y (b) 11 y 12.

Es claro de la figura 12bis que la respuesta en el plano fase de la neurona es la misma, ante un cambio del parámetro de la neurona en este caso la ganancia, pero por lo que se analizó en la figura 10, esta variación es lineal por lo que a cambios pequeños variaciones pequeñas que no son sensibles para la función zona muerta, ya que un aumento pequeño en la amplitud puede estar en el mismo valor de disparo del umbral, pero menor al umbral del segundo disparo, por lo que serían iguales los planos fase.

¿Podemos decir que el proceso de evocación se da en los segundos casos? Diríamos que no es evocación sino que la sensibilidad de la neurona al cambio de parámetro no es suficiente. Si disminuimos

el valor del parámetro de ganancia, por ejemplo a cero lo que tenemos son los siguientes parámetros Entrada senoide amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2, Ganancia = 0, m = 5, amplitud = 3. En la figura 13 se muestran los resultados.

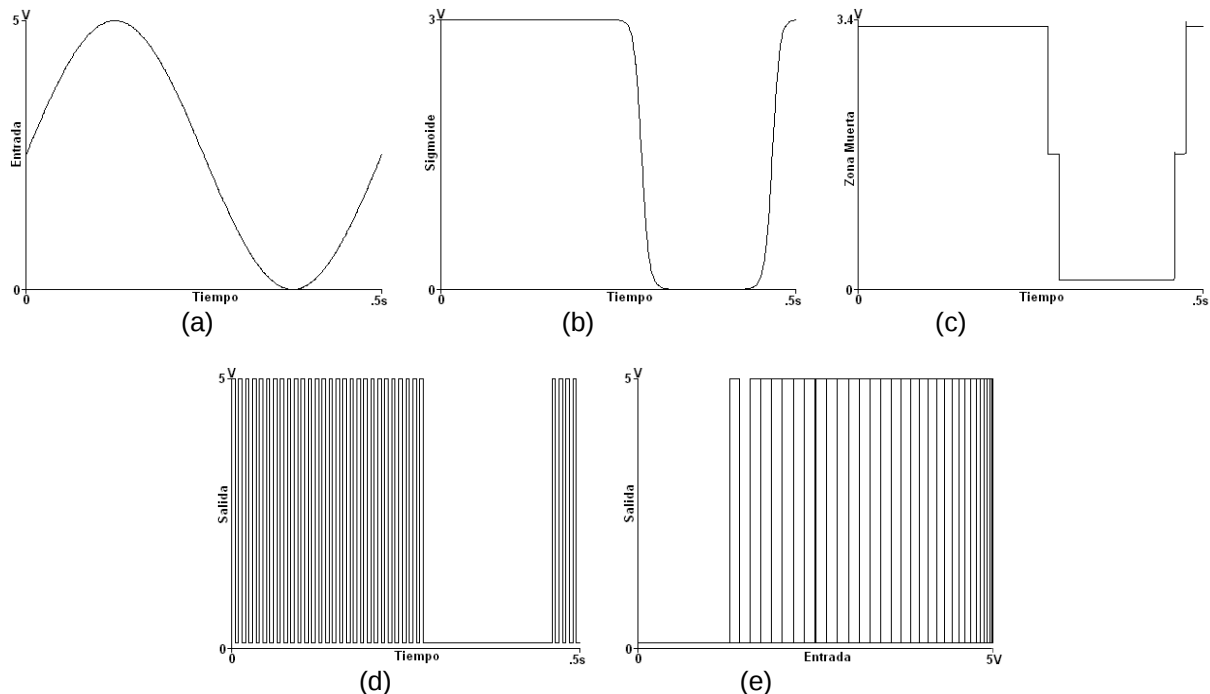


Figura 13. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = 0, m = 5, amplitud = 3.

Del resultado de la figura 13 podemos concluir que en los experimentos anteriores de las figuras 9, 10, 11 y 12 no tenemos realmente una evocación sino que el cambio del parámetro no fue lo suficientemente importante como para que la neurona cambiara su plano fase, lo que nos permite pensar que el proceso de evocación es mucho más estable que lo que se piensa ante el cambio de parámetros.

En las figuras 9b y 10b se puede ver que la variación de la respuesta de la sigmoide no es diferente para la zona muerta, por lo que las salidas son las mismas, lo que ratifica lo que vemos en los planos fase.

En las figuras 11b y 12b, se ve que la salida de la sigmoide es diferente, pero la profundidad del pulso no es significativa para la zona muerta, por lo que el pequeño espacio sin oscilación se pierde al graficar el espacio fase.

Si analizamos la figura 13 es claro el cambio significativo en la respuesta de la sigmoide, lo que se ve claramente reflejado en el cambio del espacio fase.

De las figuras 9, y 10, a las figuras 11 y 12, tenemos cambio en la memoria de forma debido tanto al cambio de la entrada como al cambio de la ganancia. La memoria de forma la entendemos como aquella en la que los planos fase tienen una forma envolvente parecida, aunque con contenido interno diferente.

Si ahora cambiamos el signo de la pendiente a un valor de -1, los parámetros de la neurona serán: Entrada senoide amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2, Ganancia = -1, m = 5, amplitud = 3. Los resultados en la figura 14.

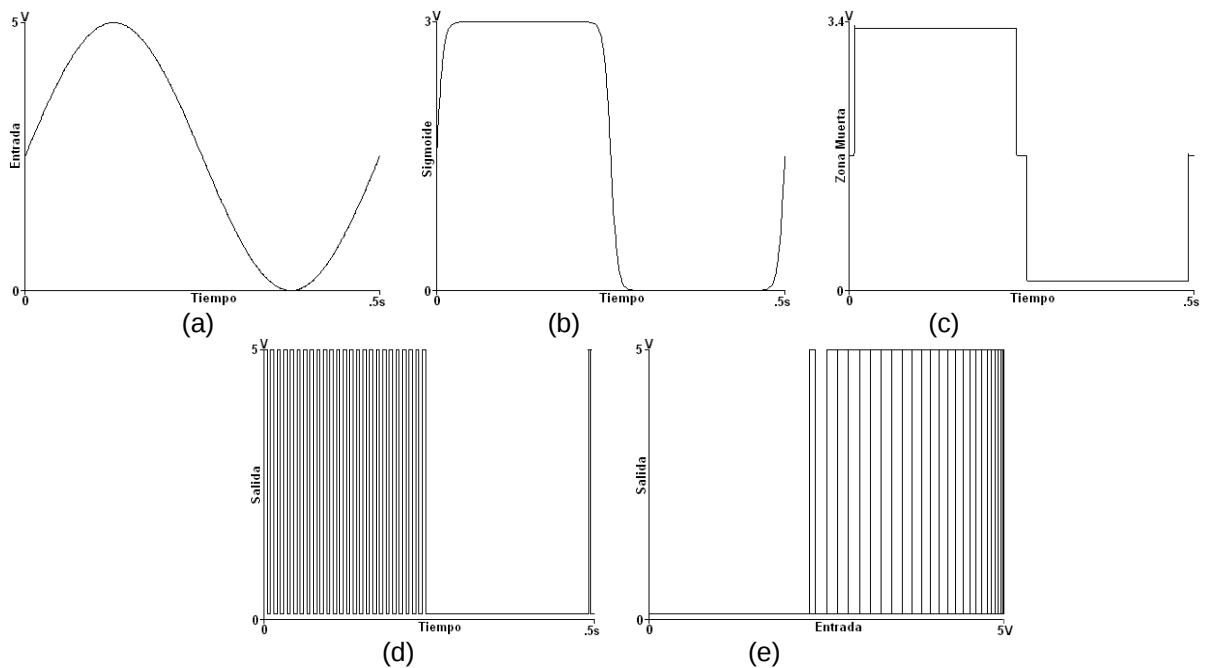


Figura 14. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = -1,  $m = 5$ , amplitud = 3.

Es claro que el cambio de signo en la sigmoide da por resultado cambios significativos de la memoria a corto plazo. Si aumentamos la negatividad de la ganancia tendremos: Entrada senoide amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2$ , Ganancia = -1.5,  $m = 5$ , amplitud = 3. Los resultados se muestran en la figura 15.

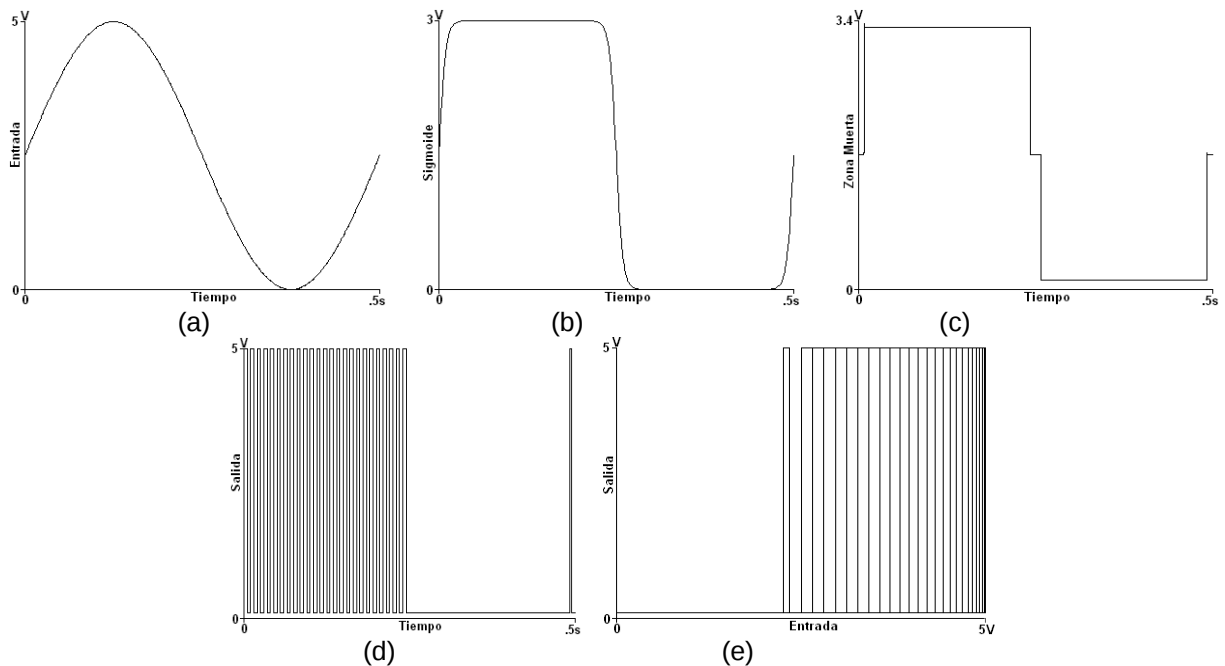


Figura 15. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = -1.5,  $m = 5$ , amplitud = 3.

Volvemos al caso de memoria al cambio del parámetro después de haber cambiado de signo. Si ahora probamos con una entrada diferente digamos triangular tendremos por parámetros: Entrada triangular

amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2$ , Ganancia = -1,  $m = 5$ , amplitud = 3. La figura 16, muestra los resultados.

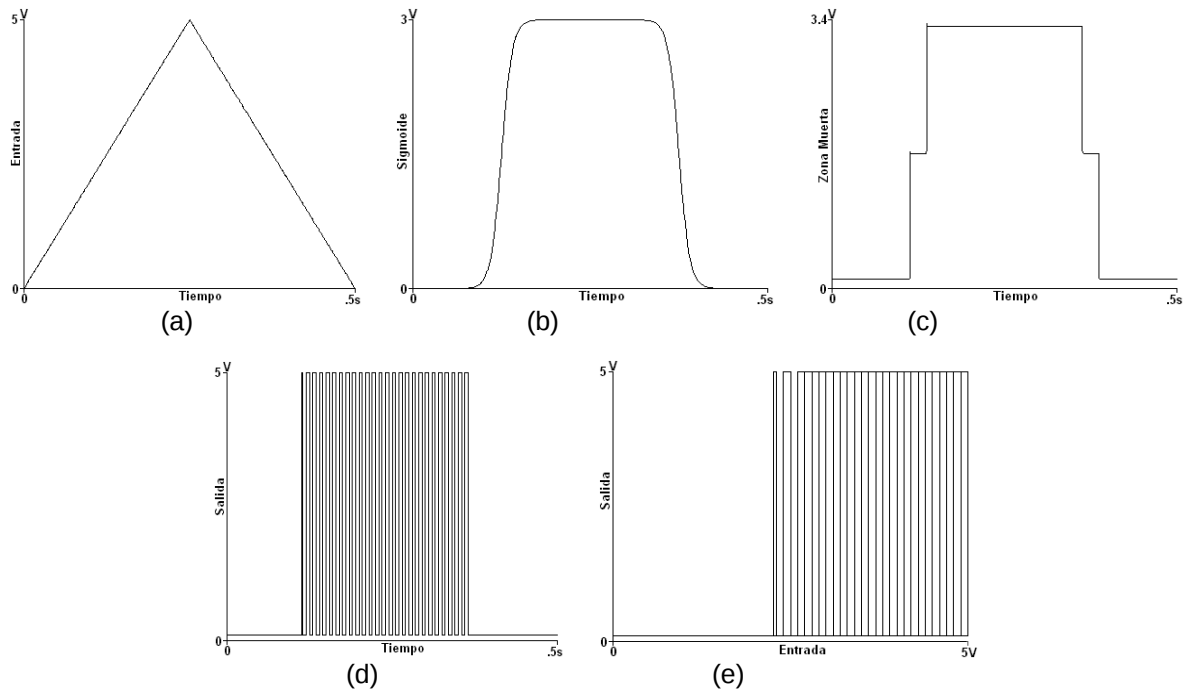


Figura 16. Resultados con entrada triangular, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2.5$ , Ganancia = -1,  $m = 5$ , amplitud = 3.

Disminuimos la ganancia para tener los siguientes parámetros: Entrada triangular amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2$ , Ganancia = -1.5,  $m = 5$ , amplitud = 3, cuyos resultados se muestran en la figura 17.

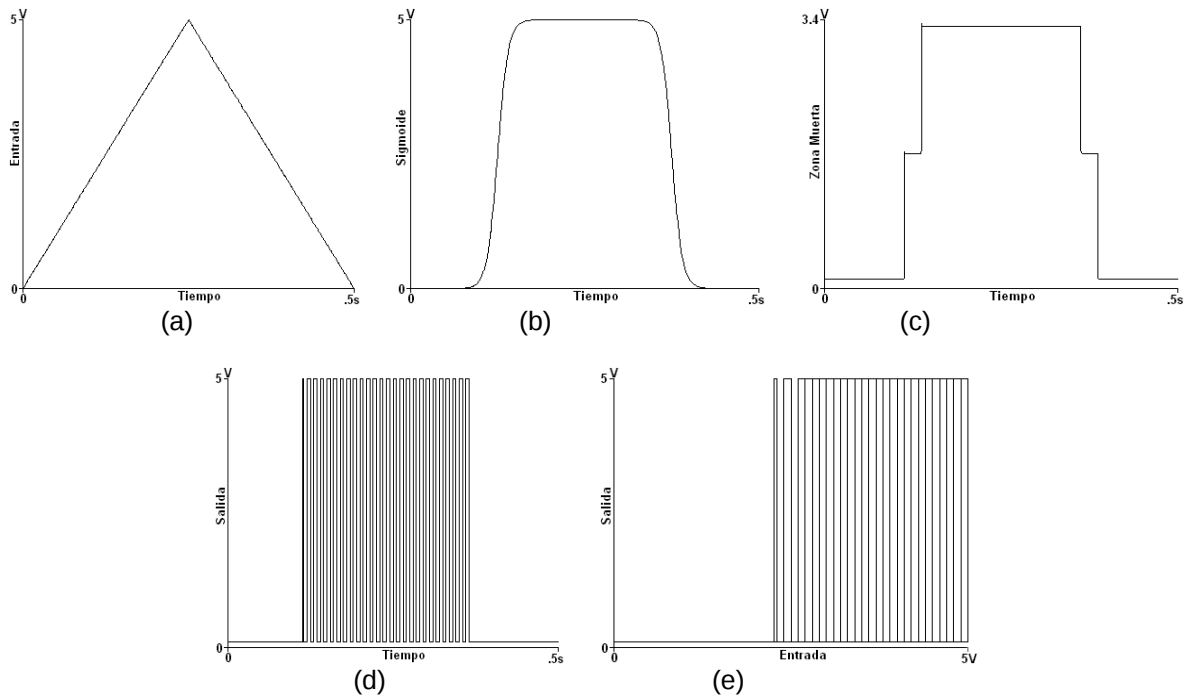


Figura 17. Resultados con entrada triangular, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2.5$ , Ganancia = -1.5,  $m = 5$ , amplitud = 3.

En la figura 17bis se muestra la sobre posición de las figuras 16e y 17e, lo que demuestra la evocación

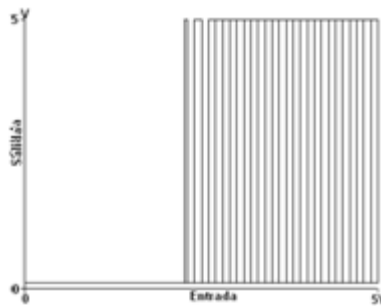


Figura 17bis. Sobre posición de las figura 16 y 17 para evidenciar la evocación.

El efecto de memoria al cambio del parámetro se da aún ante el cambio de señal de entrada, por lo que haremos el estudio del comportamiento de la neurona cambiando los parámetros en forma más amplia. En el siguiente experimento cambiamos la ganancia de la sigmoide a -2, para una señal senoide y dejando todos los demás parámetros de la neurona sin cambio tenemos los resultados de la figura 18.

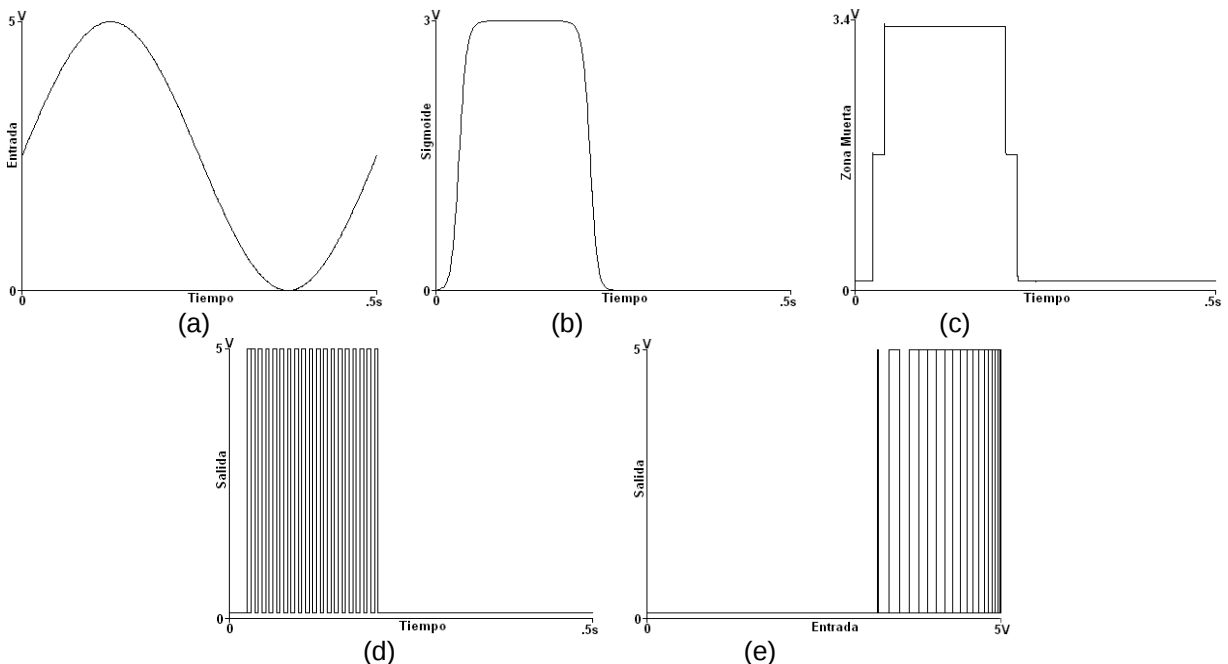


Figura 18. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = -2, m = 5, amplitud = 3.

Cambiamos la señal de entrada a triangular, pero mantenemos todos los demás parámetros como en el experimento anterior lo que nos da los resultados de la figura 19.

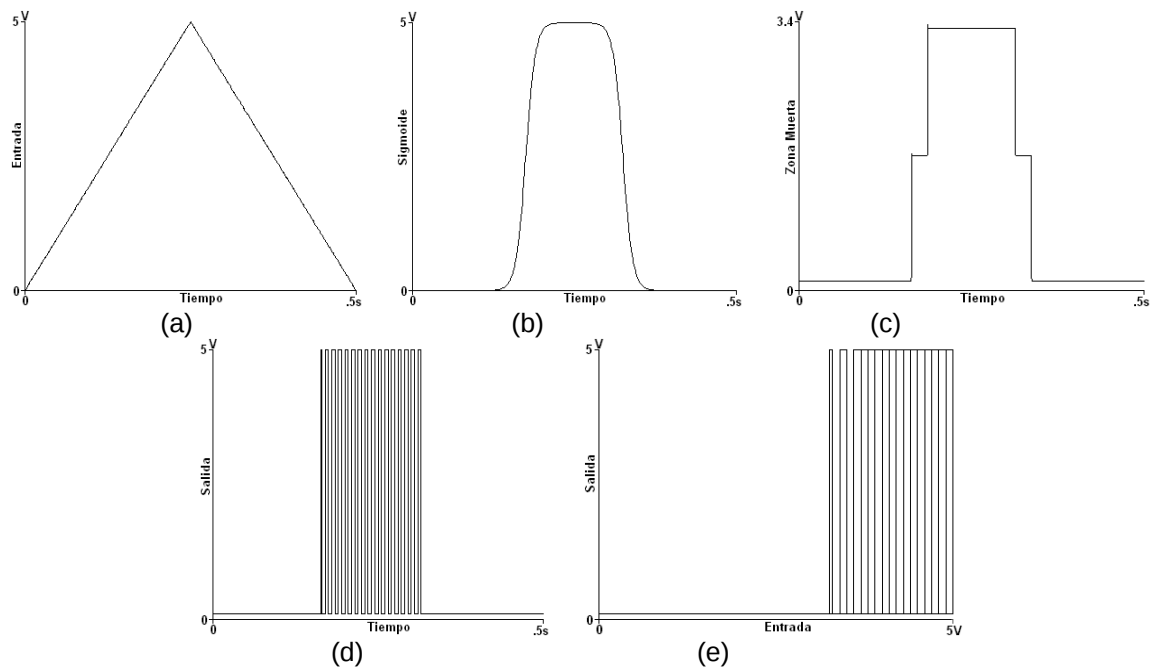


Figura 19. Resultados con entrada triangular, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = -2, m = 5, amplitud = 3.

Haremos lo mismo para una señal romboide. Los resultados se muestran en la figura 20

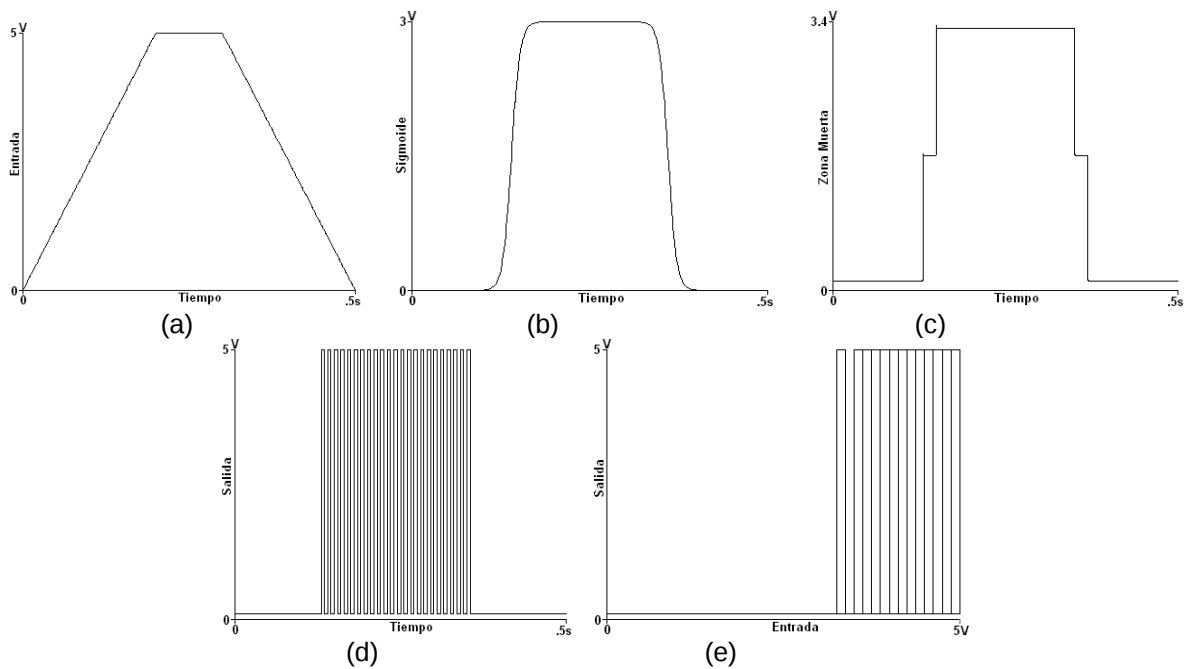


Figura 20. Resultados con entrada romboide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = -2, m = 5, amplitud = 3.

Si disminuimos más la ganancia a -3.5 pero los demás parámetros los mantenemos sin cambio, para una señal de entrada senoide tendremos los resultados de la figura 21.

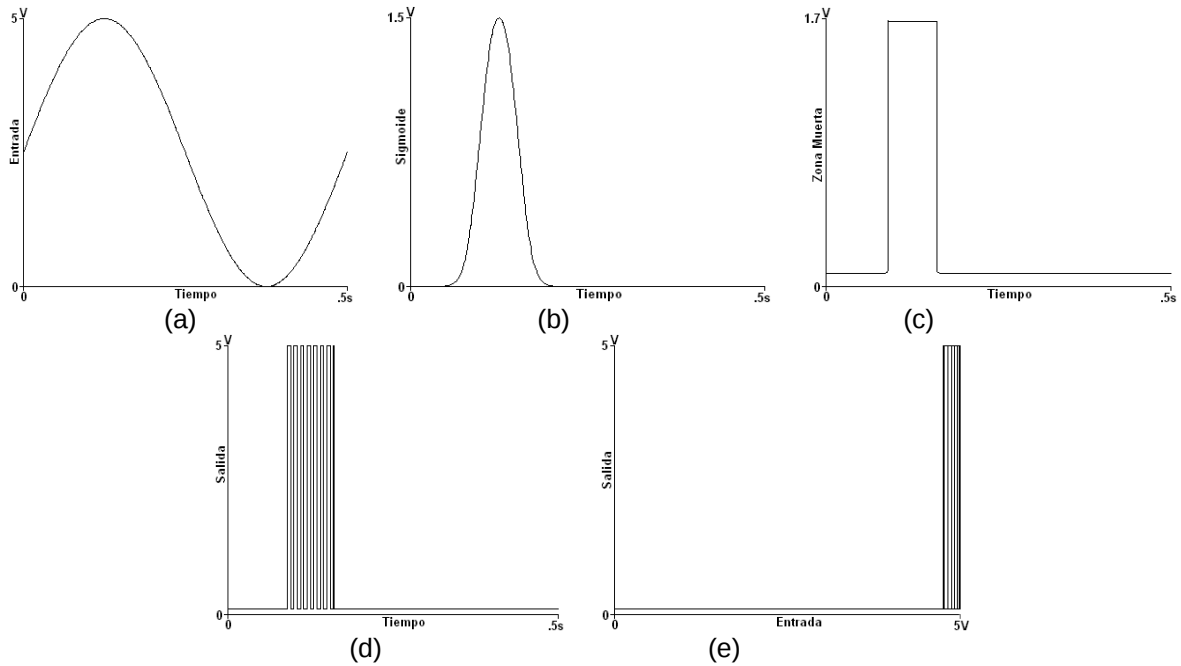


Figura 21. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = -3.5,  $m = 5$ , amplitud = 3.

Para una señal de entrada triangular con todos los demás parámetros sin cambio, tenemos los resultados de la figura 22.

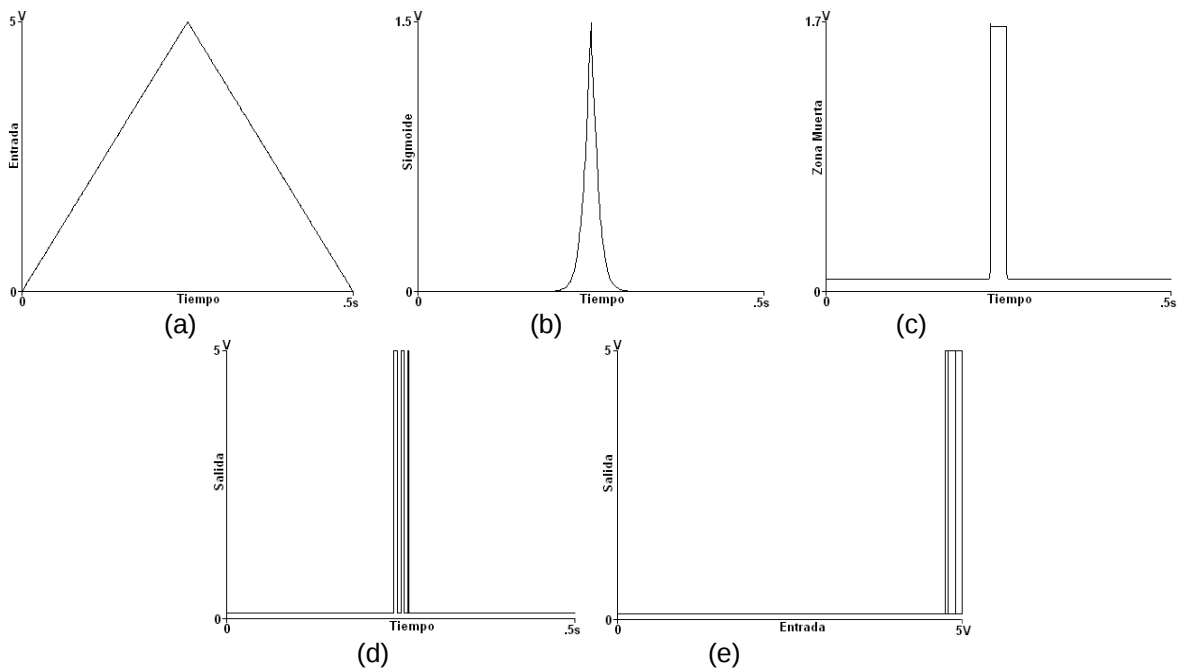


Figura 22. Resultados con entrada triangular, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = -3.5,  $m = 5$ , amplitud = 3.

Veamos lo que sucede en el caso de una señal de entrada romboide, con los demás parámetros de la neurona sin cambio. En la figura 23 se muestran los resultados.

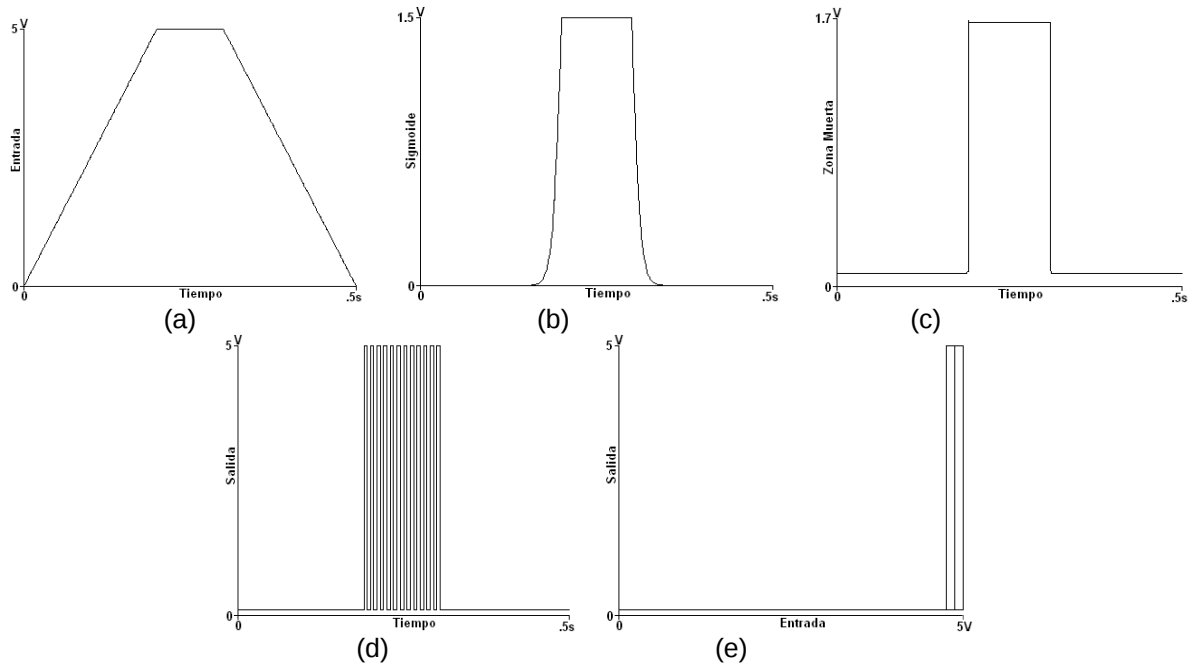


Figura 23. Resultados con entrada romboide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = -3.5,  $m = 5$ , amplitud = 3.

En el siguiente experimento encontramos ejemplos de alta selectividad de la neurona sin importar la forma de la señal de entrada. Vamos a entender por alta sensibilidad de la neurona cuando la respuesta de ésta es una espiga muy fina, como una delta. Para el primero de esta secuencia los resultados se muestran en la figura 24.

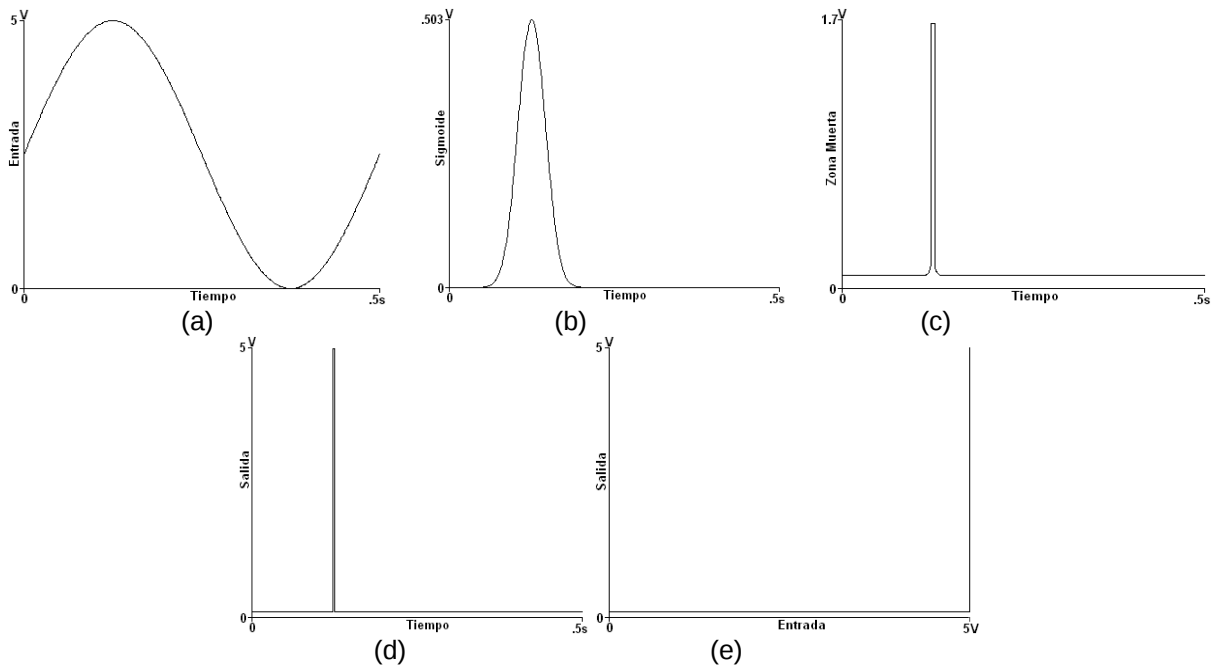


Figura 24. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2$ , Ganancia = -3.74,  $m = 5$ , amplitud = 3.

En el segundo de la secuencia de experimentos la señal de entrada es triangular. Los resultados se muestran en la figura 25.

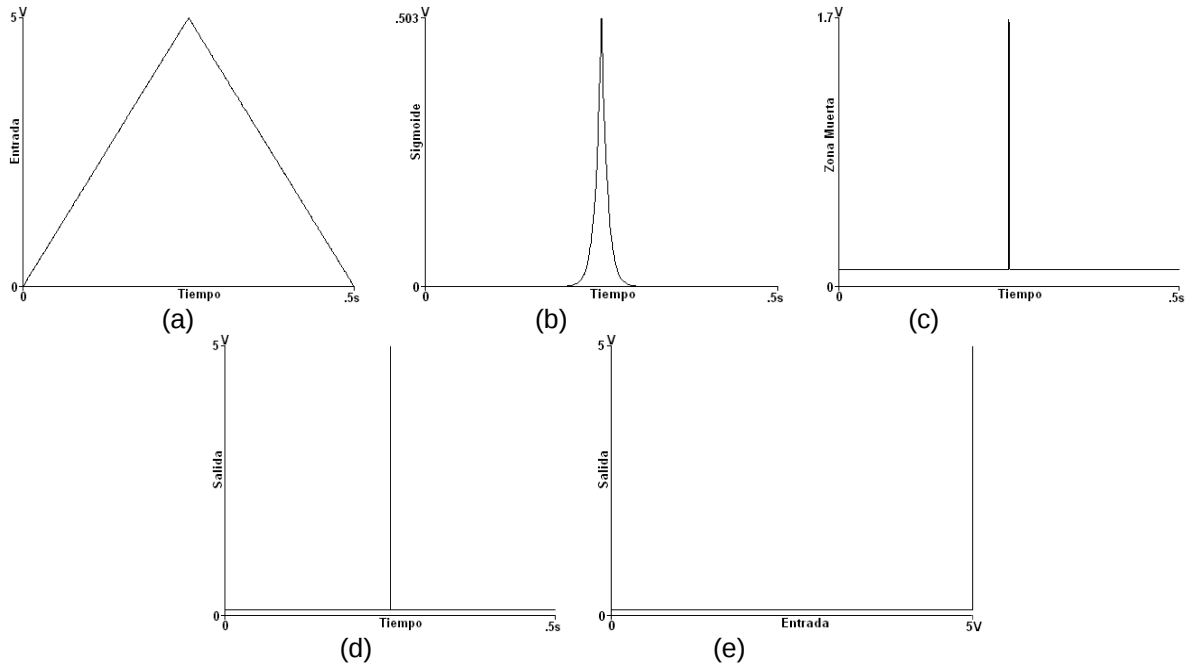


Figura 25. Resultados con entrada triangular, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2$ , Ganancia = -3.5,  $m = 5$ , amplitud = 3.

Para el tercero de la secuencia de experimentos empleamos una señal de entrada romboide sumada con una señal de entrada senoide y su suma se presenta en la figura 26, con los siguientes parámetros de la neurona: Entrada Romboide + Senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2$ , Ganancia = -3.7088,  $m = 5$ , amplitud = 3.

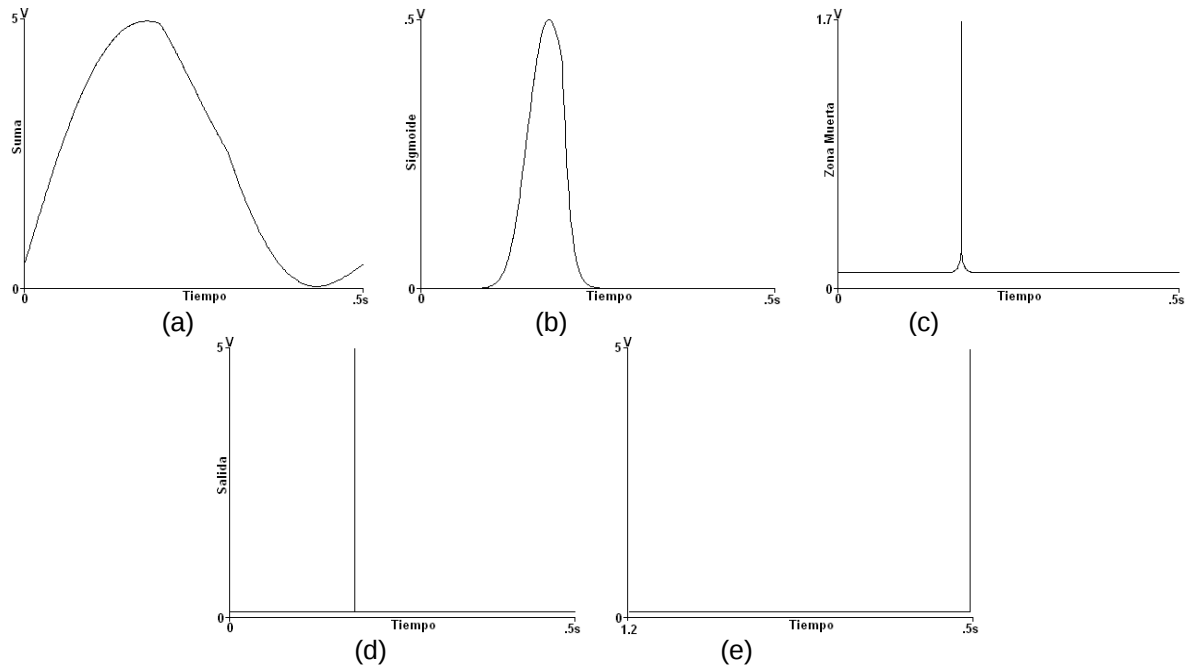


Figura 26. Resultados con entrada romboide + senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2$ , Ganancia = -3.7088,  $m = 5$ , amplitud = 3.

El siguiente cambio de forma se presenta en la figura 13e, y se debe al cambio de la entrada, y de esta figura en adelante vemos que las oscilaciones internas del plano fase se recorren a mayores valores de la entrada.

Encontramos el hecho en las figuras 21e, 22e y 23e de memoria de forma, pero en el caso de alta sensibilidad nos encontramos, como en otros casos, con evocación, como lo muestran las figuras 24e, 25e y 26e. Al cambiar las entradas el plano fase es el mismo.

#### 4.2. Resultados zona muerta sigmoide

Con las funciones de activación intercambiadas, es decir primero la función zona muerta y después la función sigmoide realizamos experimentos para los mismos casos que los realizados para la secuencia sigmoide Zona muerta. En nuestros experimentos usamos como señales de entrada una señal senoide, una señal triangular y una señal romboide.

Vamos a dar la secuencia de los resultados cambiando la señal de entrada pero manteniendo los parámetros de la neurona constantes a lo largo de toda la secuencia, para poder analizar los posibles cambios que se den por la señal de entrada nada más, de tal forma que no consideremos cambios en la respuesta por algún otro parámetro de la neurona, que básicamente son los parámetros de la funciones de activación.

Para los resultados de los experimentos presentamos de cada uno de ellos,

- (a) La señal de entrada
- (b) La salida de la zona muerta
- (c) La salida de la sigmoide
- (d) La respuesta de la neurona
- (e) El plano fase, para ver los efectos de la memoria a corto plazo.

Nuestro primer experimento de la secuencia realizada fue para una entrada senoide con los siguientes parámetros: amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = 0,  $m = 1$ , amplitud = 3. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 27.

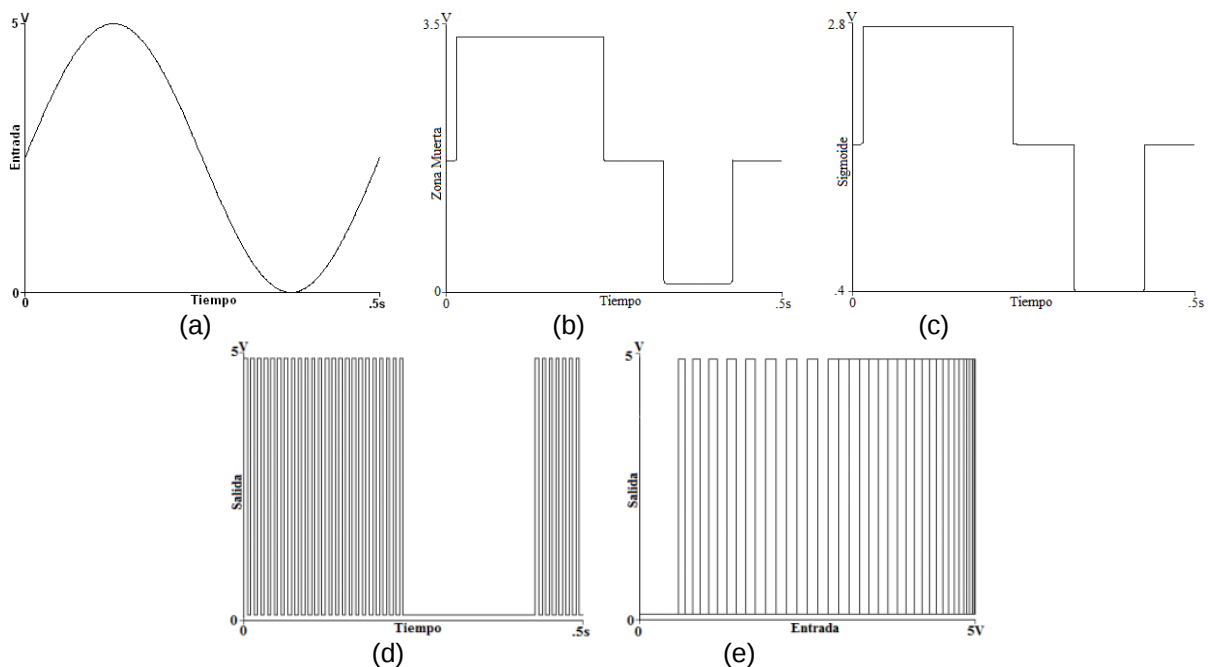


Figura 27. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = 0,  $m = 1$ , amplitud = 3.

Nuestro segundo experimento tuvo como señal de entrada una señal triangular. Los resultados se muestran en la figura 28.

La forma del espacio fase es diferente a la de la figura 9, en la cual las funciones de activación estaban invertidas.

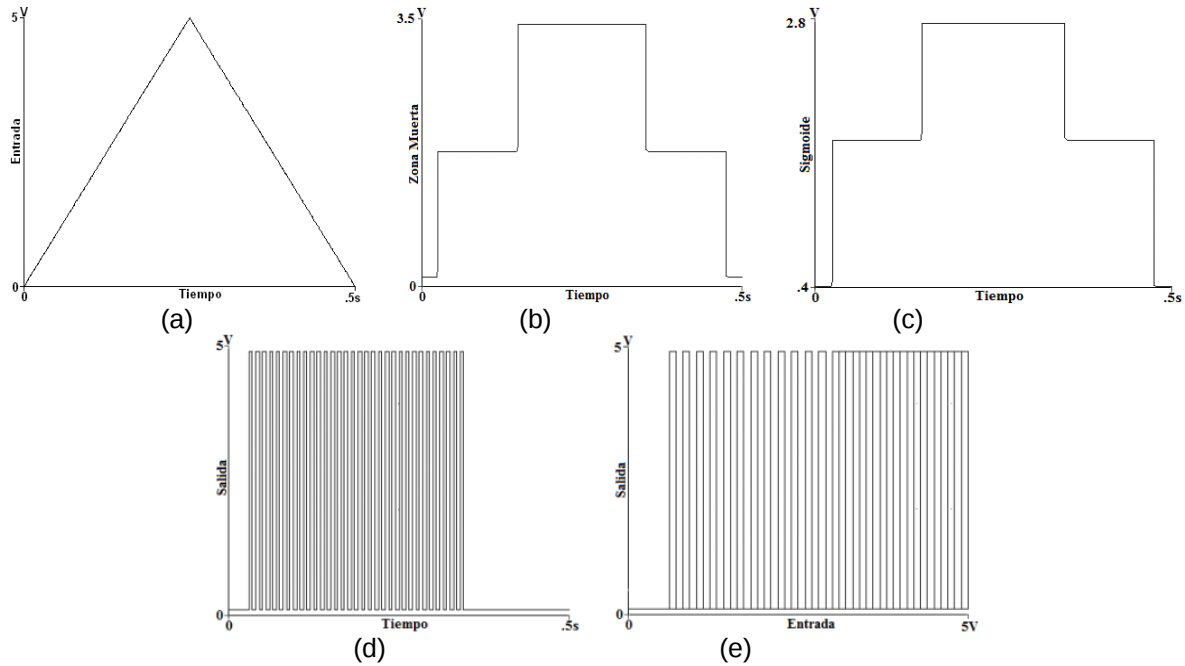


Figura 28. Resultados con entrada triangular, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = 0,  $m = 1$ , amplitud = 3.

Nuestro tercer experimento tuvo como señal de entrada una señal romboide. Los resultados se muestran en la figura 29.

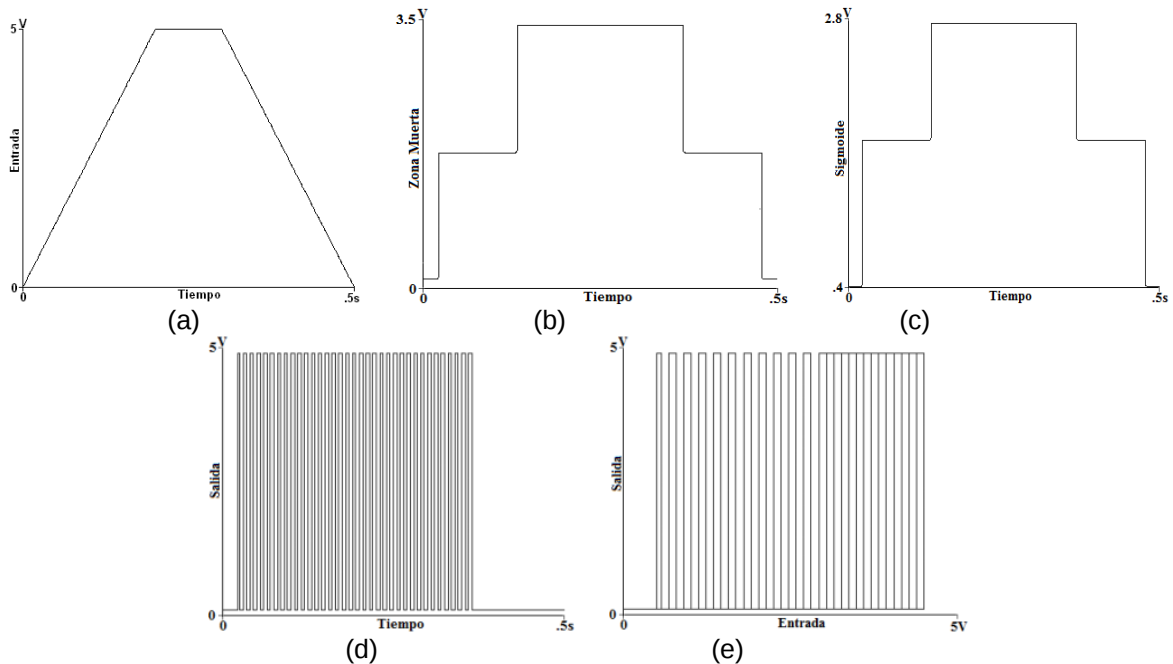


Figura 29. Resultados con entrada romboide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = 0,  $m = 1$ , amplitud = 3.

Como vemos de la secuencia de los experimentos anteriores las respuestas de las figuras 14e y 15e son en el plano fase las mismas lo que nos indica de nuevo la presencia de evocación, ya que para entradas diferentes la memoria a corto plazo es idéntica. Para corroborar lo anterior realizamos un experimento con la misma secuencia de señales de entrada pero con los parámetros siguientes: amplitud = 5V, ref1 =

.5V,  $ref2 = 2.5V$ ,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = 0,  $m = -2$ , amplitud = 3. Los resultados se muestran en la figura 30.

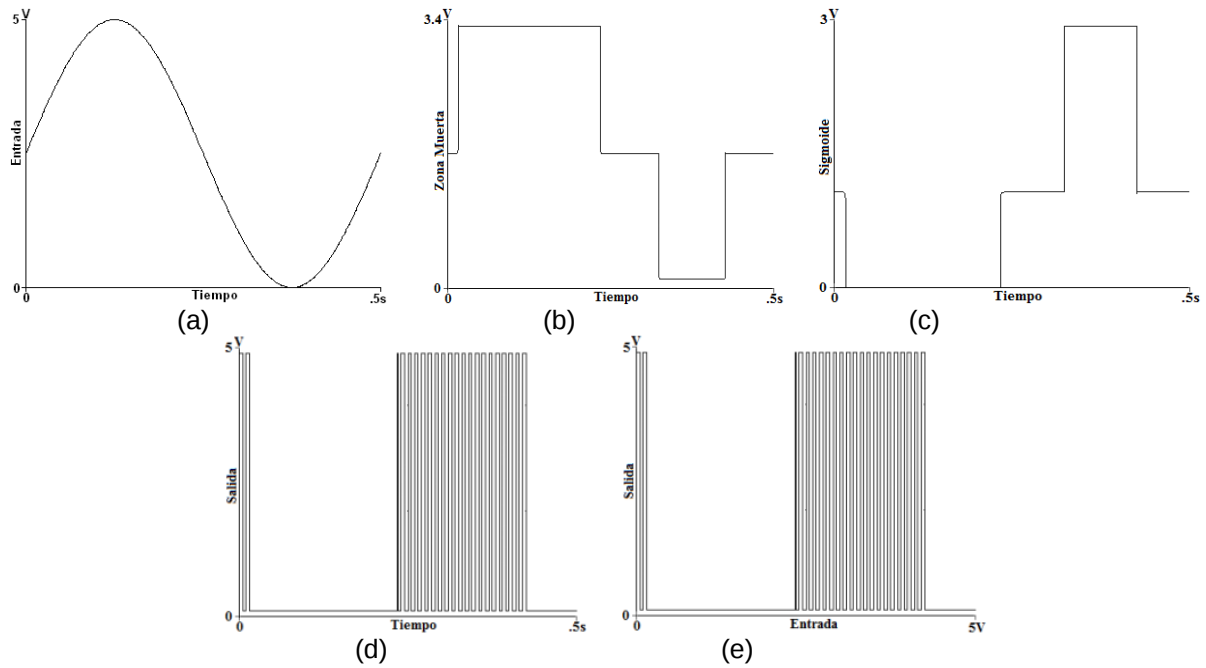


Figura 30. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V,  $ref1 = .5V$ ,  $ref2 = 2.5V$ ,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = 0,  $m = -2$ , amplitud = 3.

Para una señal de entrada triangular con los parámetros de la figura 14, los resultados obtenidos se muestran en la figura 31.

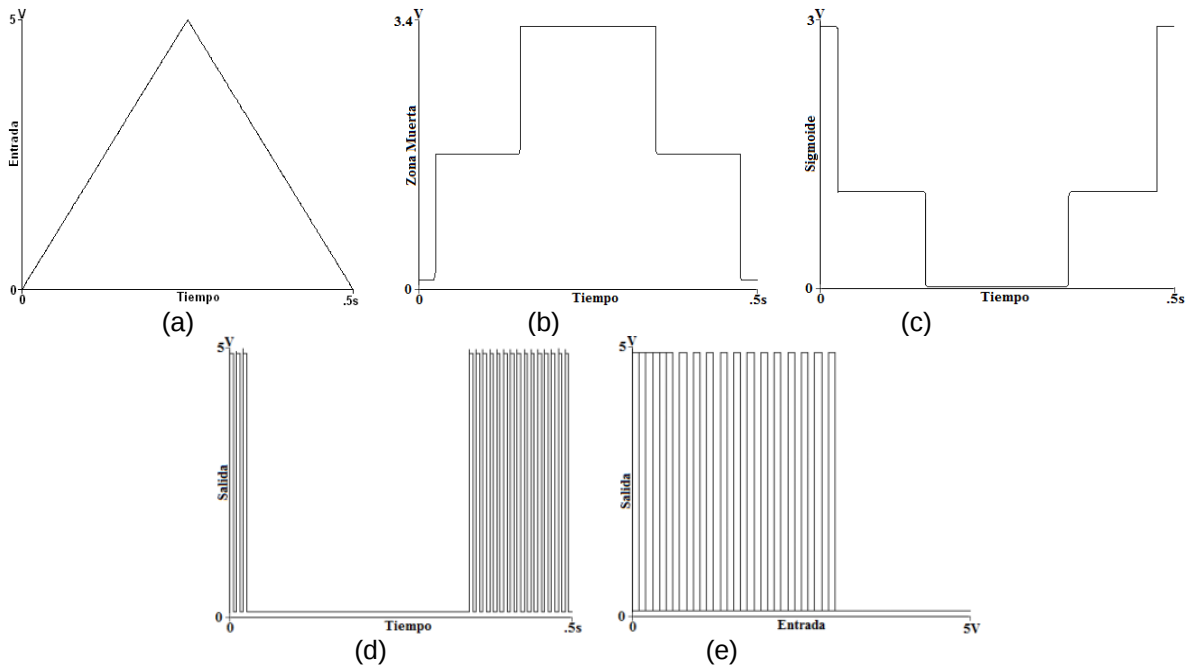


Figura 31. Resultados con entrada triangular, amplitud = 5V,  $ref1 = .5V$ ,  $ref2 = 2.5V$ ,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = 0,  $m = -2$ , amplitud = 3

Nuestro tercer experimento de la secuencia tuvo como señal de entrada una señal romboide, con los mismos parámetros de la neurona que los del experimento de la figura 14. Los resultados se muestran en la figura 32.

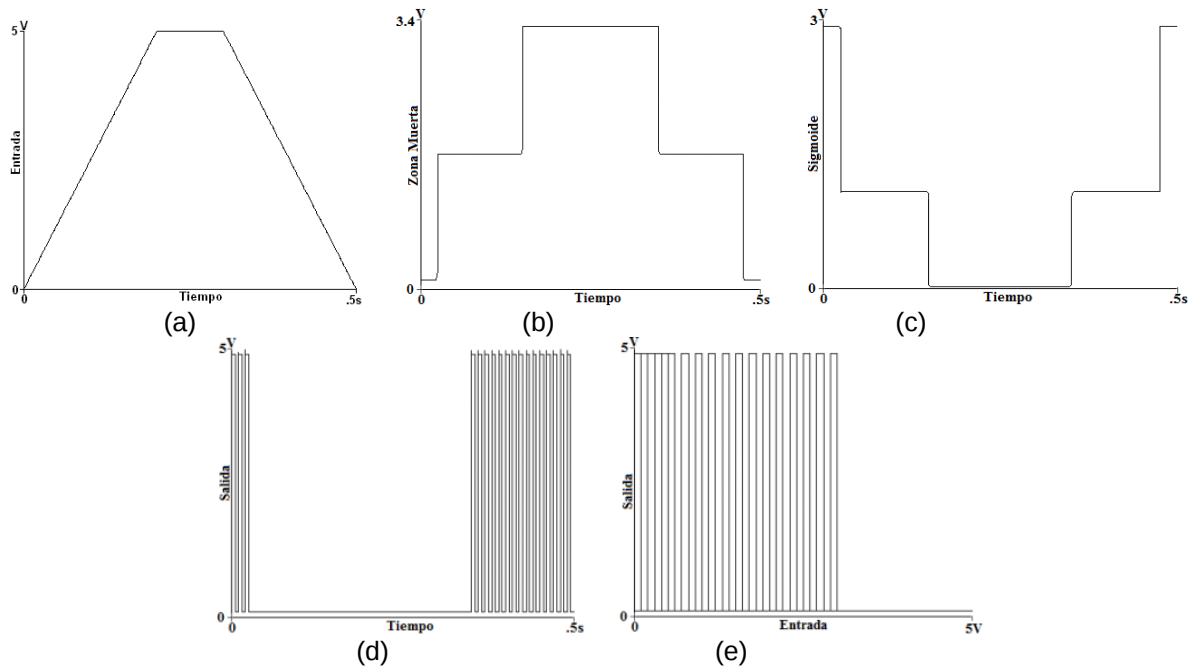


Figura 32. Resultados con entrada romboide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2.5$ , Ganancia = 0,  $m = -2$ , amplitud = 3

Vamos a analizar que sucede si cambiamos mucho la pendiente y la ganancia de la sigmoide, por lo que los parámetros de la neurona serán: amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2.5$ , Ganancia = 3,  $m = -3$ , amplitud = 3. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 33.

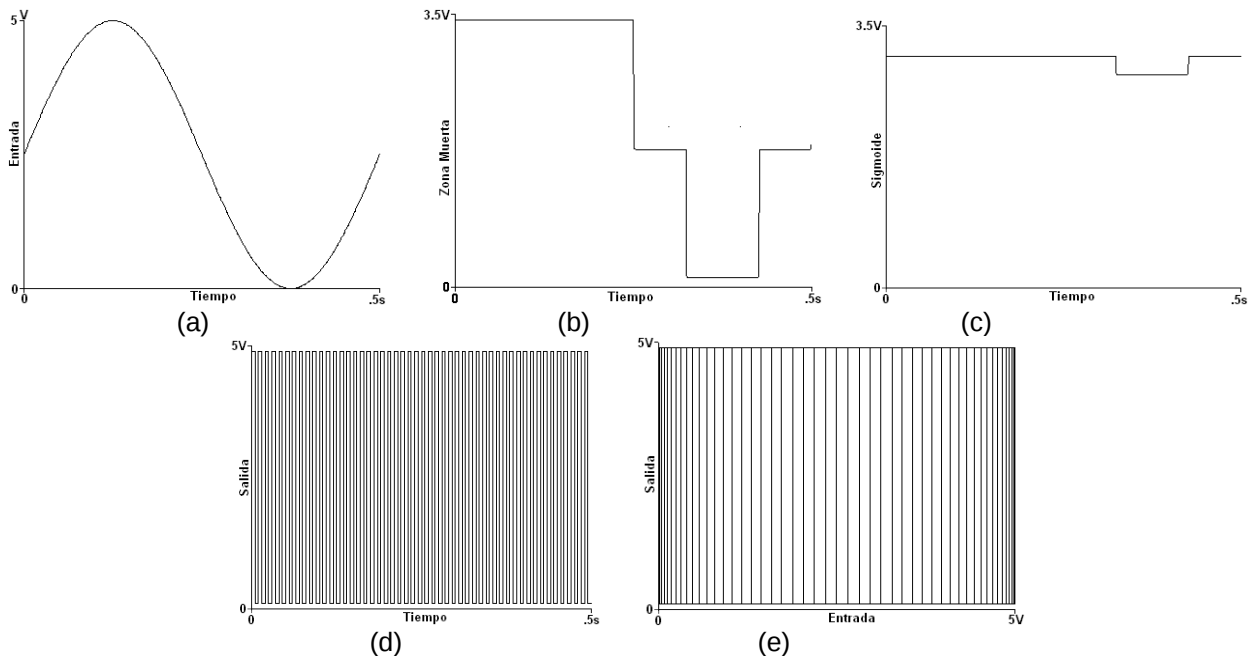


Figura 33. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2.5$ , Ganancia = 3,  $m = -3$ , amplitud = 3

Con los mismos parámetros de la neurona pero cambiando la señal de entrada por una triangular obtenemos los resultados de la figura 34.

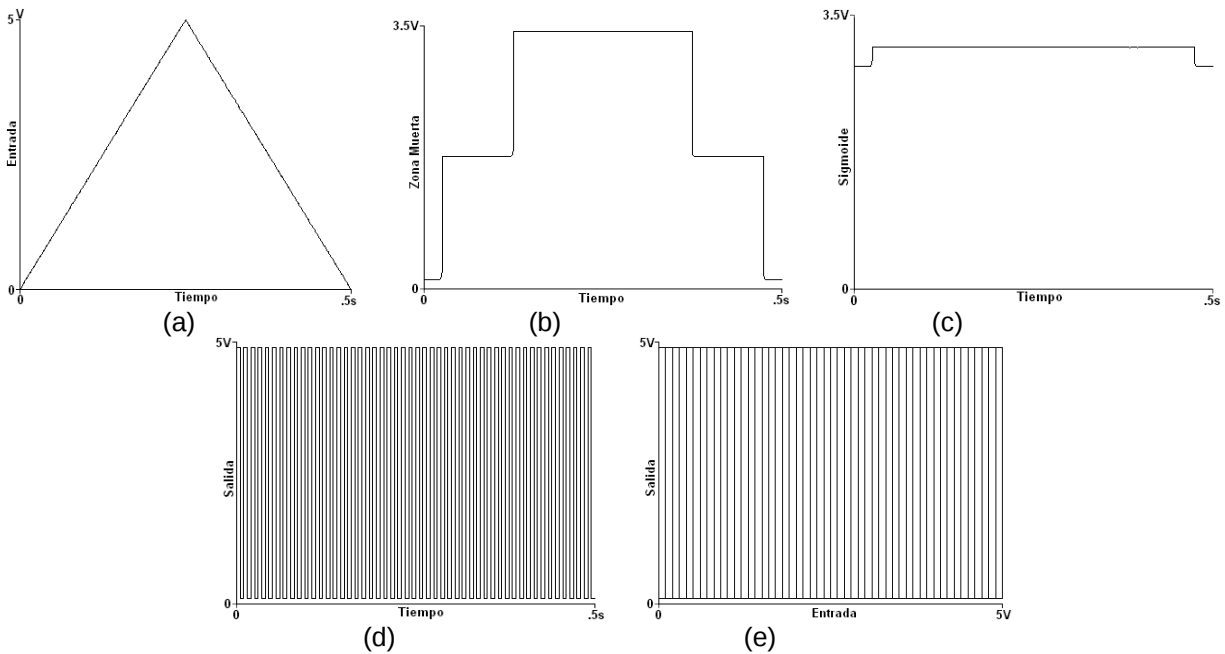


Figura 34. Resultados con entrada triangular, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = 3,  $m = -3$ , amplitud = 3

Vamos a repetir lo anterior pero para el caso de una entrada romboide. Los resultados del experimento se muestran en la figura 35.

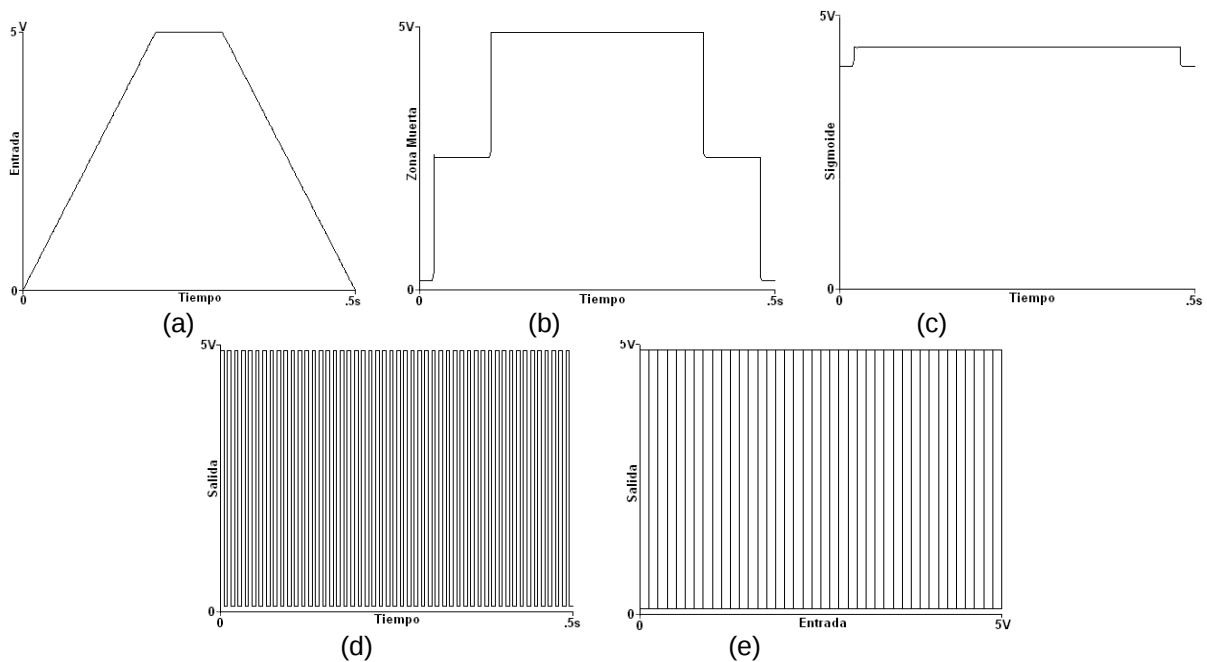


Figura 35. Resultados con entrada romboide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = 3,  $m = -3$ , amplitud = 3

En nuestra nueva serie de experimentos vamos a intercambiar valores entre la ganancia y la pendiente de la sigmoide. Los parámetros para este experimento son: Entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2.5$ , Ganancia = 3,  $m = -3$ , amplitud = 3. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 36.

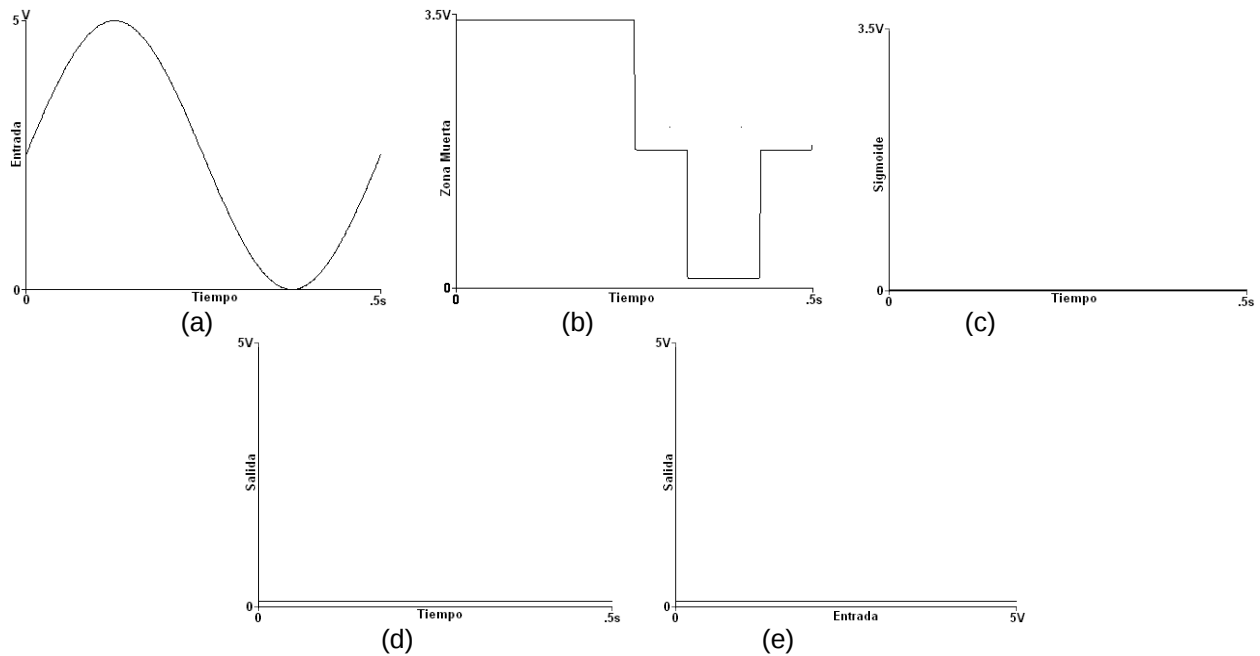


Figura 36. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2.5$ , Ganancia = -3,  $m = -3$ , amplitud = 3

Vamos a repetir el experimento cambiando la señal a triangular, pero los demás parámetros de la neurona se mantienen sin cambio. En la figura 37 se muestran los resultados.

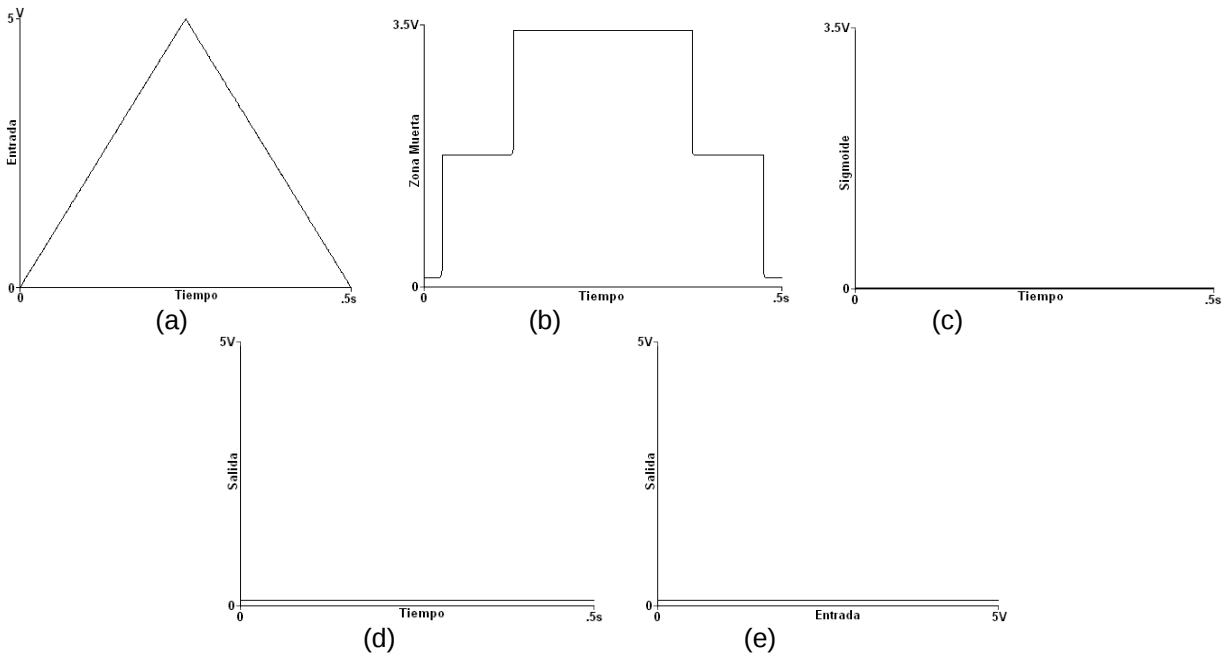


Figura 37. Resultados con entrada triangular, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V_1 = V_2 = 2.5$ , Ganancia = -3,  $m = -3$ , amplitud = 3

Si el experimento anterior lo repetimos pero para una señal romboide, tendremos por resultados los que se muestran en la figura 38.

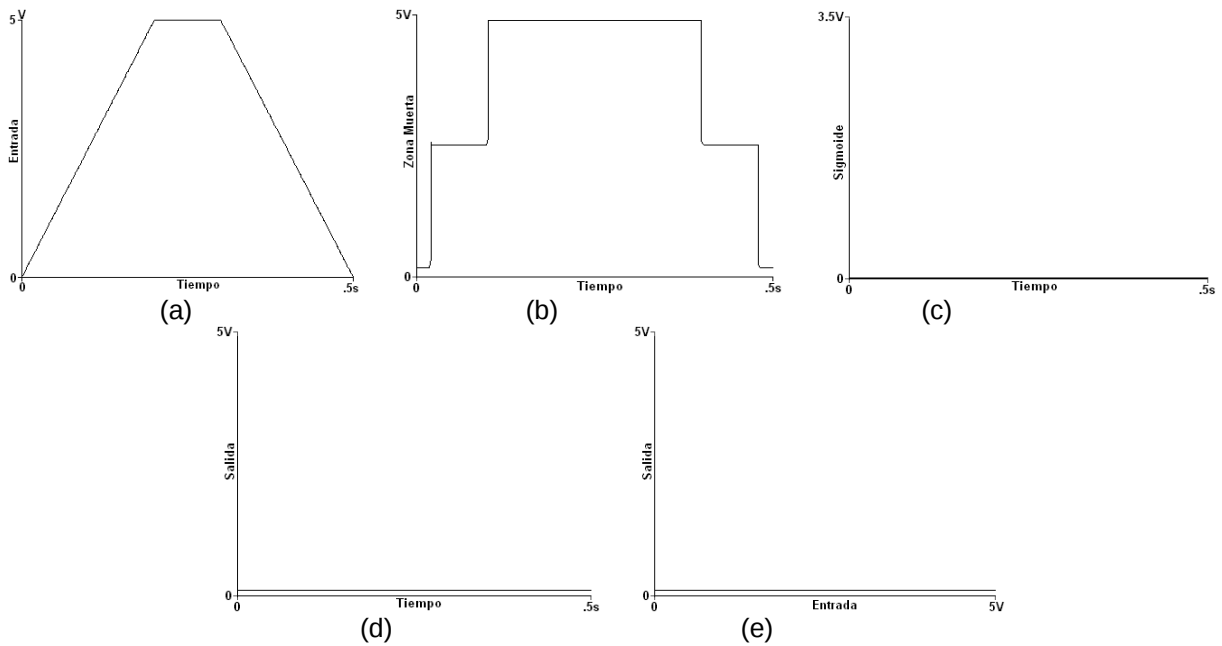


Figura 38. Resultados con entrada romboide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = -3, m = -3, amplitud = 3

Podemos darnos cuenta de los experimentos anteriores que estamos alternando entre dos estados de la neurona, el estado en el cual está siempre encendida, y el estado en el cual está siempre apagada. Podemos tener estados en los cuales este encendida un tiempo y apagada otro, como en el caso de la neurona con los siguientes parámetros: Entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = -1, m = 1, amplitud = 3. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 39.

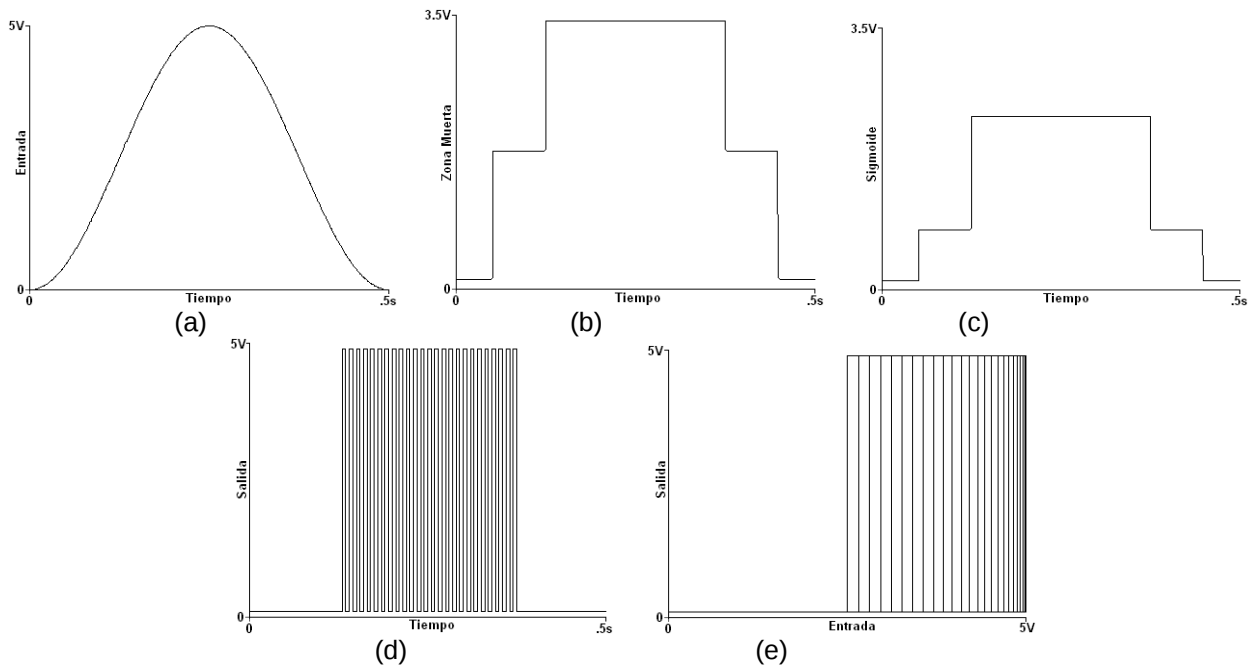


Figura 39. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = -3, m = -3, amplitud = 3

Trataremos de encontrar otro estado que no sea apagada o saturada para la neurona. Tomemos el caso de los siguientes parámetros: Entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = -1, m = 1, amplitud = 5. Los resultados son los de la figura 40.

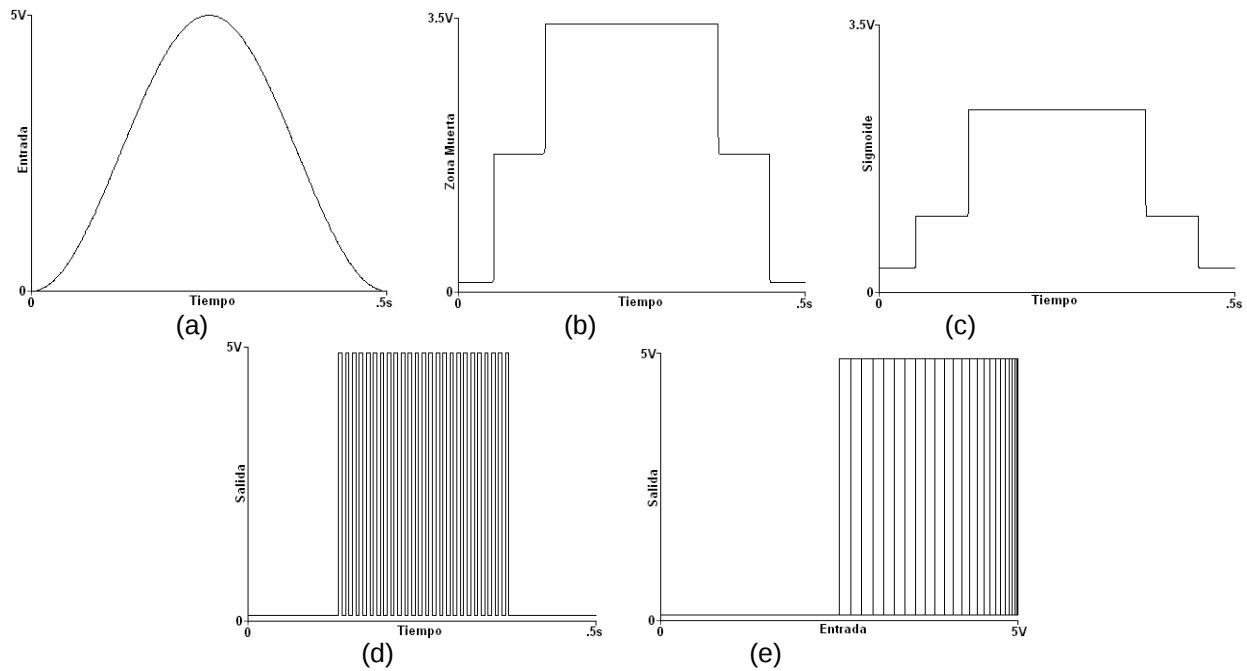


Figura 40. Resultados con entrada senoide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = -1, m = 1, amplitud = 5

Nos hemos encontrado con otro estado de la neurona, por lo que veremos si se da para todas las señales de entrada. Para hacer esto haremos que la señal de entrada sea una triangular sin cambiar ningún otro parámetro de la neurona. Los resultados se muestran en la figura 41.

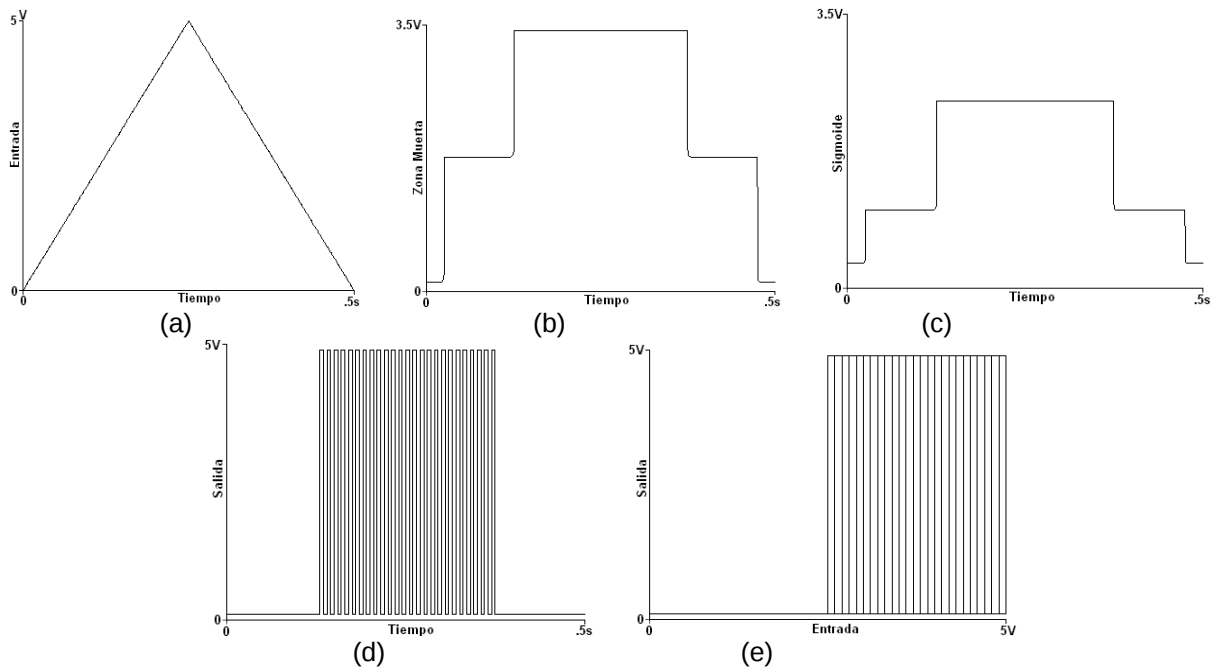


Figura 41. Resultados con entrada triangular, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V, V1 = V2 = 2.5, Ganancia = -1, m = 1, amplitud = 5.

Para el caso de una señal romboide bajo las mismas condiciones que los dos anteriores experimento la figura 42 muestra los resultados.

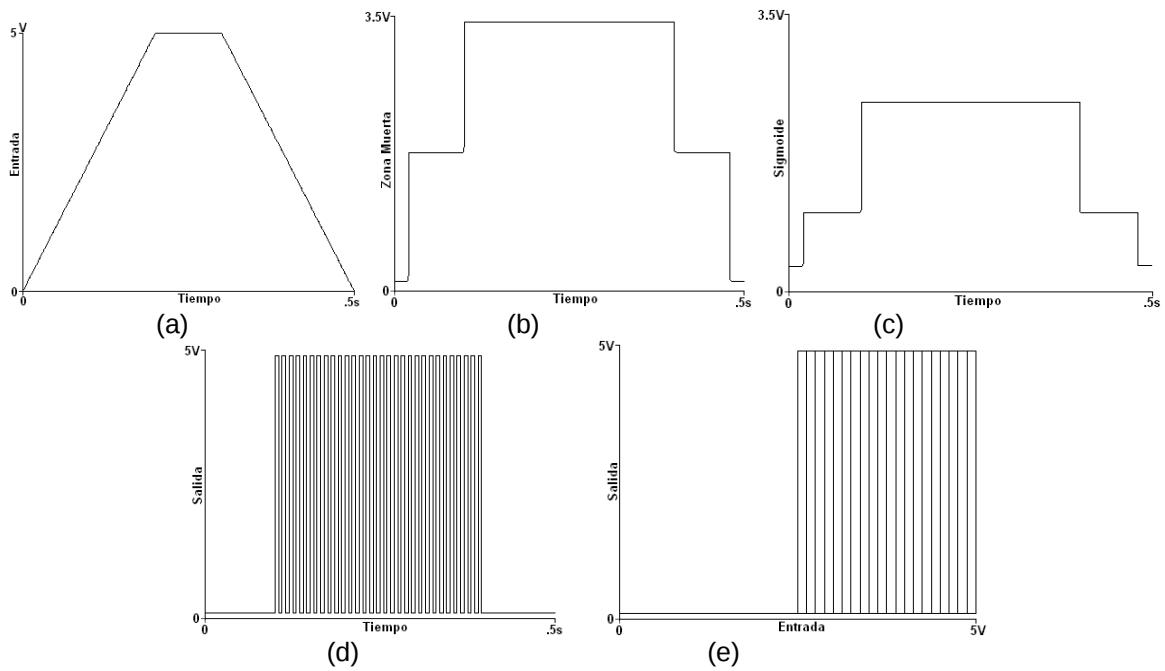


Figura 42. Resultados con entrada romboide, amplitud = 5V, ref1 = .5V, ref2 = 2.5V,  $V1 = V2 = 2.5$ , Ganancia = -1,  $m = 1$ , amplitud = 5.

Como se ve de las figuras 39d, 40d y 41d, el tercer estado de la neurona se cumple bajo las mismas condiciones para las tres entradas.

## Conclusiones

Los experimentos nos indican que con las funciones de activación intercambiadas, es decir primero la función zona muerta y después la función sigmoide los resultados obtenidos fueron muy diferentes. Lo anterior nos hace ver que es fundamental para la estructura de la neurona la secuencia de seguimiento de las funciones de activación de tal manera que sigmoide  $\rightarrow$  Zona Muerta  $\neq$  Zona Muerta  $\rightarrow$  Sigmoide.

Se puede ver de las figuras 9e y 10e que se presenta evocación, ya que con diferentes entradas, o diferentes parámetros de la neurona, se obtienen los mismos planos fase. En los otros dos podemos observar que ante la misma entrada pero con diferentes parámetros de ganancia de la sigmoide, tenemos los mismos resultados en los planos fase.

En las figuras 11e y 12e podemos encontrar otro caso de evocación, como se mostró en la figura 12bis, por lo que podemos afirmar que este proceso está presente en la neurona, independiente de formar o no parte de una columna tectal.

Otras de las conclusiones que podemos obtener del modelo de neurona es que ante cambios leves en los parámetros de la neurona, pero sin cambios en la señales de entrada, aparece algo parecido a la evocación. Este fenómeno se estudio un poco más y nos percatamos de que se cumple independientemente de la señal de entrada que se tenga, pero si tenemos un cambio más grande del parámetro, existe cambio significativo en el espacio fase, por lo que a este fenómeno le llamamos poca sensibilidad al cambio de parámetros, lo que podemos ver en las figuras, por ejemplo 12e y 13e, ya que al aumentar el cambio de parámetro no hubo evocación.

De las figura 23e, 24e y 25e, podemos obtener claramente la alta selectividad de la neurona, recordando que ésta es la existencia en el plano fase de una sola espiga muy fina. Este es un proceso que en principio habíamos asociado a la columna tectal también, pero que encontramos independientemente de su presencia en una columna tectal, que tiene nuestro modelo de neurona, por lo que la podemos pensar también como un filtro neuronal.

Cuando se presentan cambios significativos en la ganancia de la función sigmoide vemos que la aparente memoria a corto plazo se elimina, ya que el plano fase es muy diferente como se ve en las figura 11 a 13. Este hecho corrobora porque en las columnas tectales el fenómeno es más sensible que en una sola neurona, y es fundamentalmente por las autosinapsis que se presentan y que están ausentes en la neurona sola.

En otros reportes presentados no hemos encontrado fenómenos de evocación en neuronas simples, pero en este caso se presentan estos fenómenos para pequeños cambios en los parámetros, por lo que la secuencia de funciones de activación sigmoide-Zona muerta, es especial, ya que los cambios en los parámetros de la sigmoide son poco sensibles ante los umbrales de la zona muerta y por lo tanto los disparos de la neurona no cambian, como se ve en los experimentos de las figuras 16 y 17.

Los resultados obtenidos fueron muy significativos ya que la respuesta de la neurona fue muy diferente en los dos casos de secuencias de funciones de activación, lo que nos hace ver que es fundamental para la estructura de la neurona la secuencia de seguimiento de las funciones de activación de tal manera que sigmoide  $\rightarrow$  Zona Muerta  $\neq$  Zona Muerta  $\rightarrow$  Sigmoide.

De los experimentos de las figuras 32e, 35e, y 38e, nos damos cuenta que en la secuencia de funciones de activación Zona Muerta  $\rightarrow$  Sigmoide, encontramos tres posible estados para la neurona: Siempre encendida, siempre apagada y un tiempo encendida y otro tiempo apagada.

Otra de las cosas que podemos afirmar es que no está presente el fenómeno de evocación, y de selectividad, en el caso de la secuencia de funciones de activación Zona Muerta  $\rightarrow$  Sigmoide.

Al variar la ganancia de la función de activación se da un corrimiento en el eje del tiempo de las respuestas, tanto hacia el máximo valor, como hacia el mínimo, dependiendo del valor de la ganancia corre hacia el máximo o al mínimo valor. Esto es interesante porque permite con la variación de un solo

parámetro, la variación del corrimiento de la frecuencia, y por lo tanto la variación de la memoria a corto plazo. Esto lo podemos ver en las gráficas 28, 29 30, 31 y 32.

Aunque estos resultados son nuevos, nos es claro que muchos fenómenos de los que aquí se han presentado también están presentes en las columnas tectales (José Luis Pérez Silva, Antonio Garcés, 2016), pero nunca se había mostrado este tipo de conducta en neuronas simples.

## **Referencias Bibliográficas**

Marr, David (1969) A theory of cerebellar cortex. **J. Physiol.** (202), p. 437-470.

McCulloch W. S. y Pitts W., (1943). A logical calculus of the ideas immanent in neurons activity, *Bull. Math. Biophys.*, **5**, 115-133,

José Luis Pérez Silva, Antonio Garcés Madrigal, Andrea Miranda Vitela, Francisco Cabiedes Contreras, (2009). II-TINF-2009-021 Modelos electrónicos de neuronas, pag 80.

José Luis Pérez Silva, Antonio Garcés Madrigal, Andrea Miranda Vitela, Francisco Cabiedes Contreras, (2011). II-TINF-2011-284 Modelos electrónicos de neuronas II, pag 24.

José Luis Pérez Silva Antonio Garcés Madrigal. II-TINF-2015-401. (2016). Estudios en modelos electrónicos de columnas tectales con función de activación zona muerta