

Implementación de modelo de neurona *Leaky Integrate-and-Fire* mediante VCSEL

María Luz Stewart Harris

October 08, 2025



Instituto
Balseiro

Temas

- ▶ Motivación
- ▶ Modelo neuronal *Leaky Integrate-and-Fire*
- ▶ Implementación de modelo neuronal LIF con un VCSEL

¿Por qué nos interesa modelar neuronas con láseres?

Potencial del hardware neuromórfico

Definición (Hardware neuromorfo)

Procesadores con arquitecturas que se asemejen al de las redes neuronales.

Potencial del hardware neuromórfico

Definición (Hardware neuromorfo)

Procesadores con arquitecturas que se asemejen al de las redes neuronales.

- ▶ Mejoras de costo energético/latencia en redes neuronales artificiales grandes comparado con arquitecturas tradicionales (CPU / GPU).

Potencial del hardware neuromórfico

Definición (Hardware neuromorfo)

Procesadores con arquitecturas que se asemejen al de las redes neuronales.

- ▶ Mejoras de costo energético/latencia en redes neuronales artificiales grandes comparado con arquitecturas tradicionales (CPU / GPU).
- ▶ Arreglos de VCSEL: integración densa y fabricación a escala \Rightarrow red de neuronas en chip

¿Qué es el modelo neuronal LIF?

Spiking Neural Networks

Definición (Spiking Neural Networks / SNN)

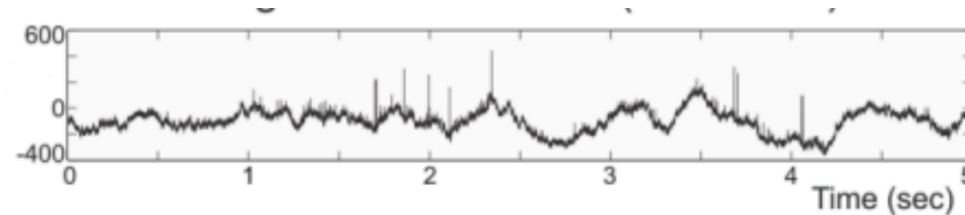
Redes neuronales artificiales en el que el único intercambio que ocurre entre neuronas es el de pulsos de igual amplitud en diferentes instantes.

Spiking Neural Networks

Definición (Spiking Neural Networks / SNN)

Redes neuronales artificiales en el que el único intercambio que ocurre entre neuronas es el de pulsos de igual amplitud en diferentes instantes.

- ▶ La comunicación entre neuronas biológicas sucede a través de señales eléctricas que contienen pulsos

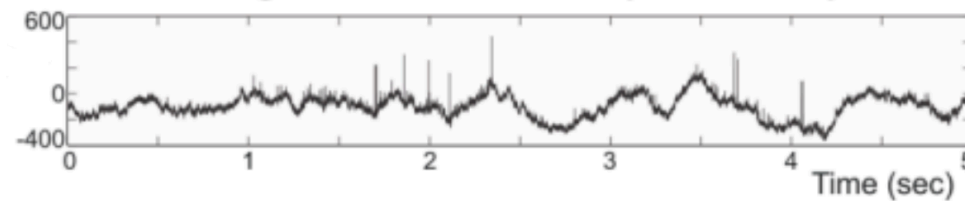


Spiking Neural Networks

Definición (Spiking Neural Networks / SNN)

Redes neuronales artificiales en el que el único intercambio que ocurre entre neuronas es el de pulsos de igual amplitud en diferentes instantes.

- ▶ La comunicación entre neuronas biológicas sucede a través de señales eléctricas que contienen pulsos



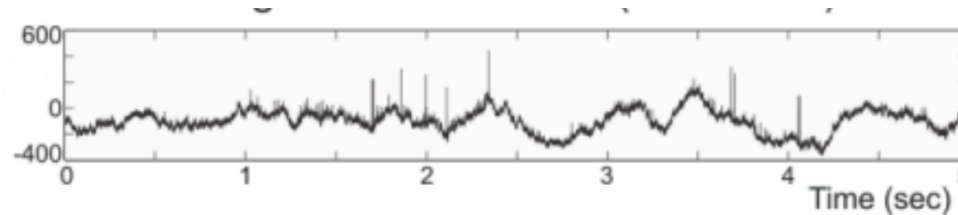
- ▶ En una SNN, la información se codifica exclusivamente por la posición de los pulsos transmitidos, no por la amplitud ni la forma de los pulsos.

Spiking Neural Networks

Definición (Spiking Neural Networks / SNN)

Redes neuronales artificiales en el que el único intercambio que ocurre entre neuronas es el de pulsos de igual amplitud en diferentes instantes.

- ▶ La comunicación entre neuronas biológicas sucede a través de señales eléctricas que contienen pulsos



- ▶ En una SNN, la información se codifica exclusivamente por la posición de los pulsos transmitidos, no por la amplitud ni la forma de los pulsos.
- ▶ Existen muchos modelos matemáticos que aproximan la relación entre pulsos de entrada y pulsos de salida de una neurona, entre ellos el modelo *Leaky Integrate-and-Fire* (LIF).

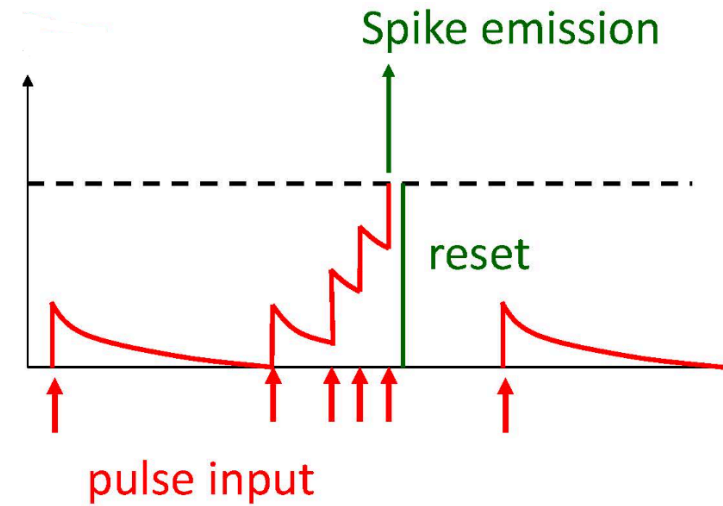
Definición (Modelo LIF)

$$\begin{cases} \dot{s}(t) = \frac{1}{\tau_s} [s_{\text{rest}} - s(t)] + x(t) \\ y(t) = \sum_i^{\infty} \delta(t - t_{f_i}) \\ s(t_{f_i}^+) = s_{\text{rest}} \end{cases} \quad (1)$$

- ▶ t_{f_i} : t tal que $s(t) \geq s_{th}$,
- ▶ $x(t)$: entrada (pulsos)
- ▶ $s(t)$: estado de la neurona
- ▶ $y(t)$: tren de deltas (disparos)

LIF

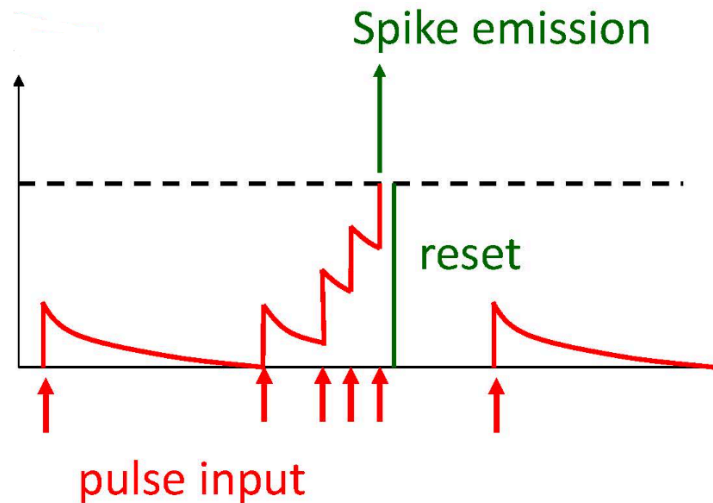
$$\begin{cases} \dot{s}(t) = \frac{1}{\tau_s} [s_{\text{rest}} - s(t)] + x(t) \\ y(t) = \sum_i^\infty \delta(t - t_{f_i}) \\ s(t_{f_i}^+) = s_{\text{rest}} \end{cases}$$



[1]

¿Cómo implemento un modelo LIF en un VCSEL?

Requerimientos de implementación de modelo LIF



[1]

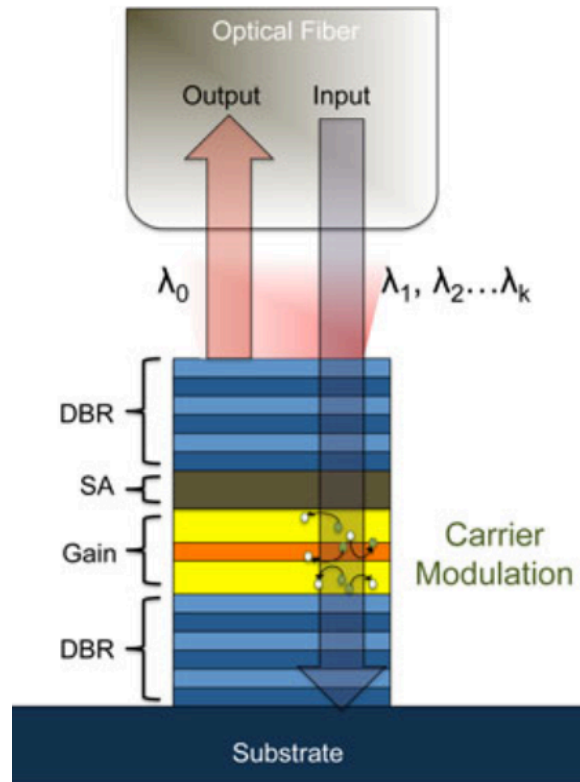
Una implementación de modelo LIF debe poder:

- ▶ Integrar con pérdidas la señal de entrada.
- ▶ Comparar la integral con un valor umbral.
- ▶ Generar un pulso cuando la integral supere el umbral.
- ▶ Restablecer el valor de la integral luego de que supere el umbral.

Implementación de modelo LIF en un VCSEL

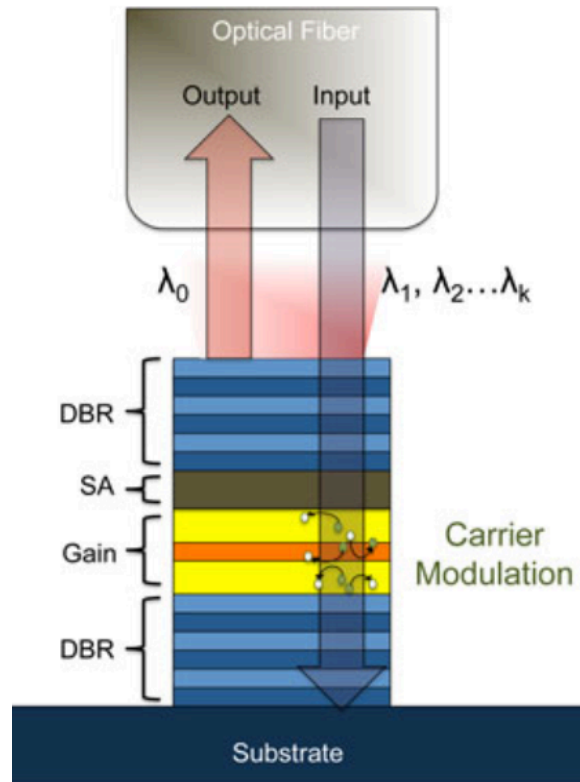
Se puede implementar un modelo LIF en un VCSEL con absorbente saturable similar al modelo Yamada. ([2], [3])

Implementación de modelo LIF en un VCSEL



[3]

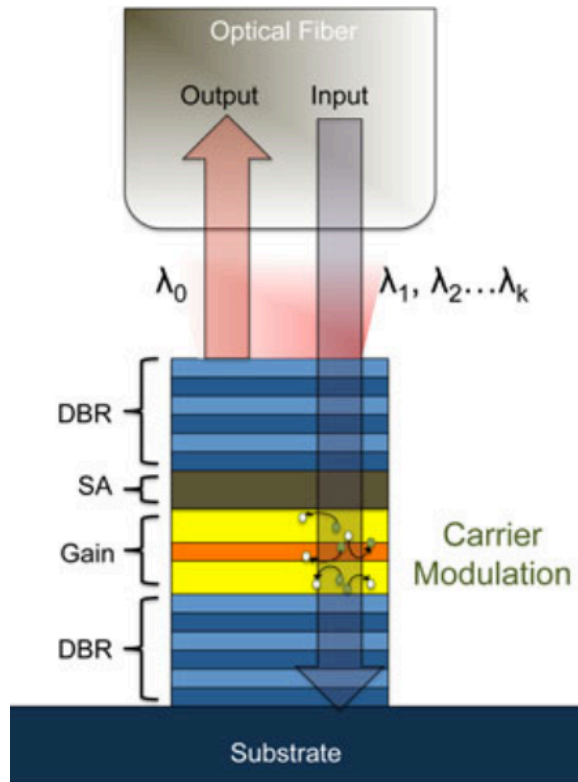
Implementación de modelo LIF en un VCSEL



[3]

- ▶ VCSEL con dos secciones:
 - Medio de ganancia activo con ganancia normalizada G que modela al estado de la neurona.
 - Absorbente saturable con absorción normalizada Q .

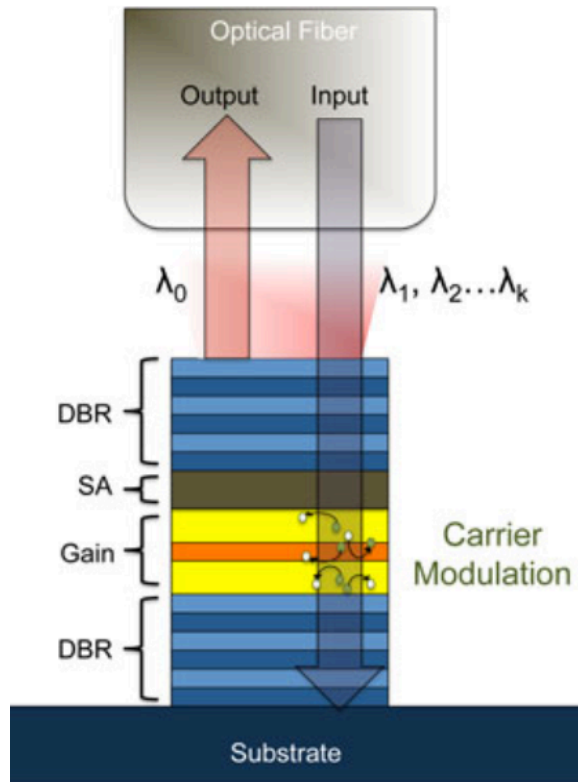
Implementación de modelo LIF en un VCSEL



[3]

- ▶ VCSEL con dos secciones:
 - Medio de ganancia activo con ganancia normalizada G que modela al estado de la neurona.
 - Absorbente saturable con absorción normalizada Q .
- ▶ Modulación de la ganancia θ modula la entrada a la neurona

Implementación de modelo LIF en un VCSEL



[3]

- ▶ VCSEL con dos secciones:
 - Medio de ganancia activo con ganancia normalizada G que modela al estado de la neurona.
 - Absorbente saturable con absorción normalizada Q .
- ▶ Modulación de la ganancia θ modula la entrada a la neurona
- ▶ Intensidad de salida normalizada I modela la salida de la neurona.

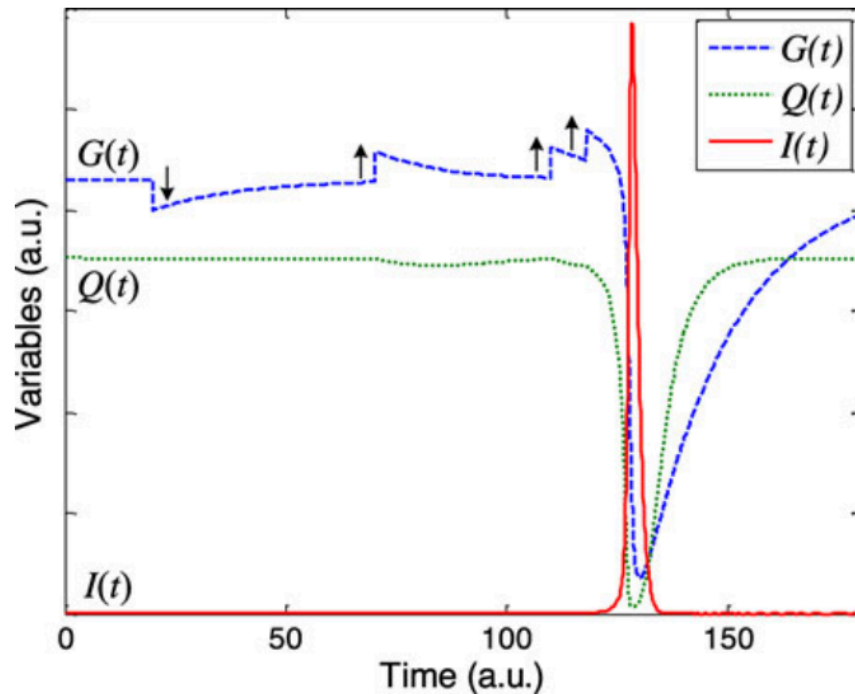
Implementación de modelo LIF en un VCSEL

$$\begin{cases} \dot{I} = \gamma_I [G - Q - 1]I + \epsilon f(G) \\ \dot{G} = \gamma_G [A - G - GI] + \theta \\ \dot{Q} = \gamma_Q [B - Q - aQI] \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\gamma_I} \ll \frac{1}{\gamma_Q} \ll \frac{1}{\gamma_G}$$

Implementación de modelo LIF en un VCSEL

Régimen previo al umbral ($t < 120$)

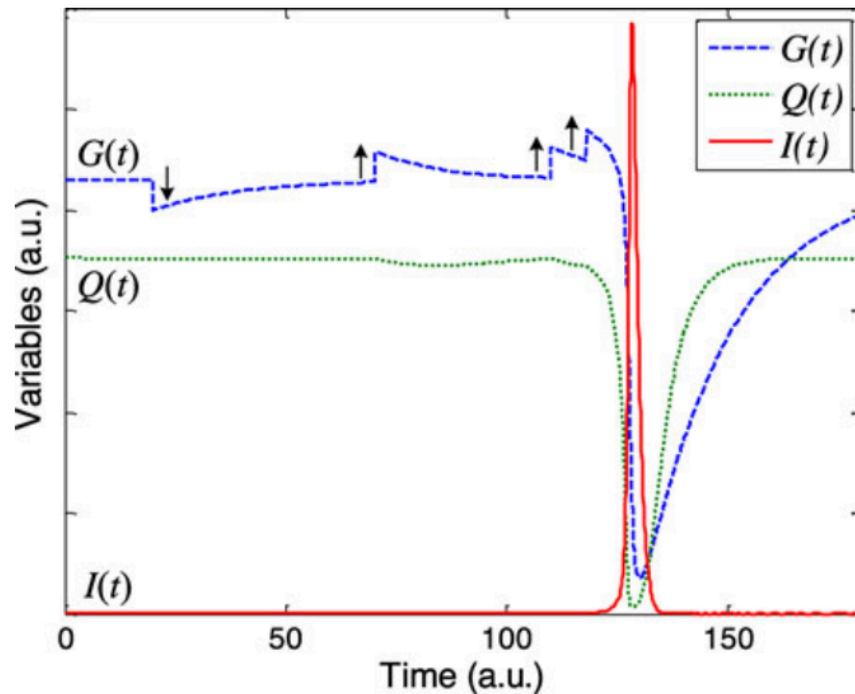


$$\begin{cases} \dot{I} = \gamma_I [G - Q - 1] I \\ \dot{G} = \gamma_G [A - G - GI] + \theta \\ \dot{Q} = \gamma_Q [B - Q - aQI] \end{cases}$$

[3]

Implementación de modelo LIF en un VCSEL

Régimen previo al umbral ($t < 120$)



$$\begin{cases} \dot{I} = \gamma_I [G - Q - 1] I \\ \dot{G} = \gamma_G [A - G - GI] + \theta \\ \dot{Q} = \gamma_Q [B - Q - aQI] \end{cases}$$

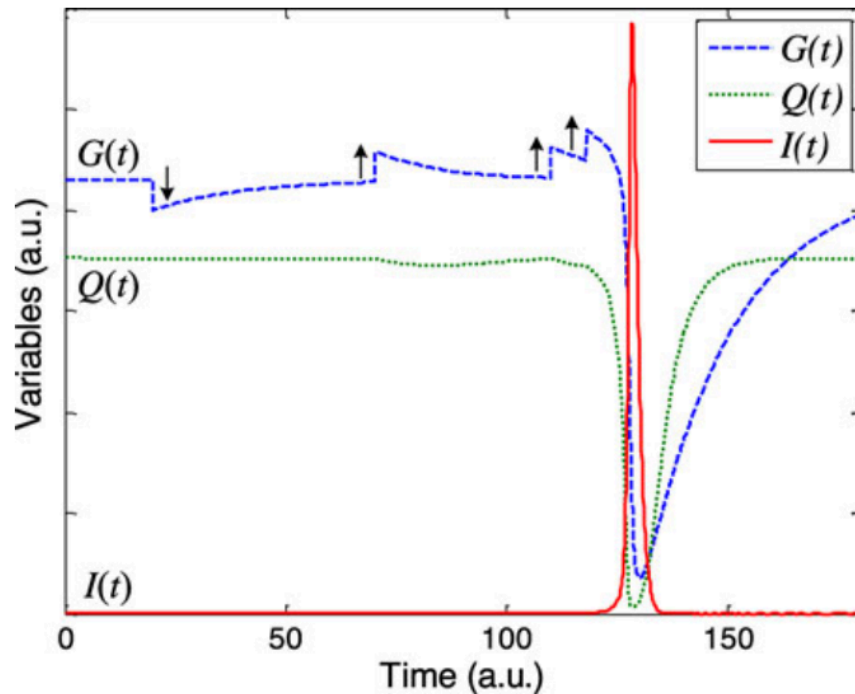
$$\Downarrow$$

$$\begin{cases} I = I_{eq} \approx 0 \\ \dot{G} = \gamma_G [A - G] + \theta \\ Q = Q_{eq} = B \end{cases}$$

[3]

Implementación de modelo LIF en un VCSEL

Generación del disparo ($t \approx 125$)

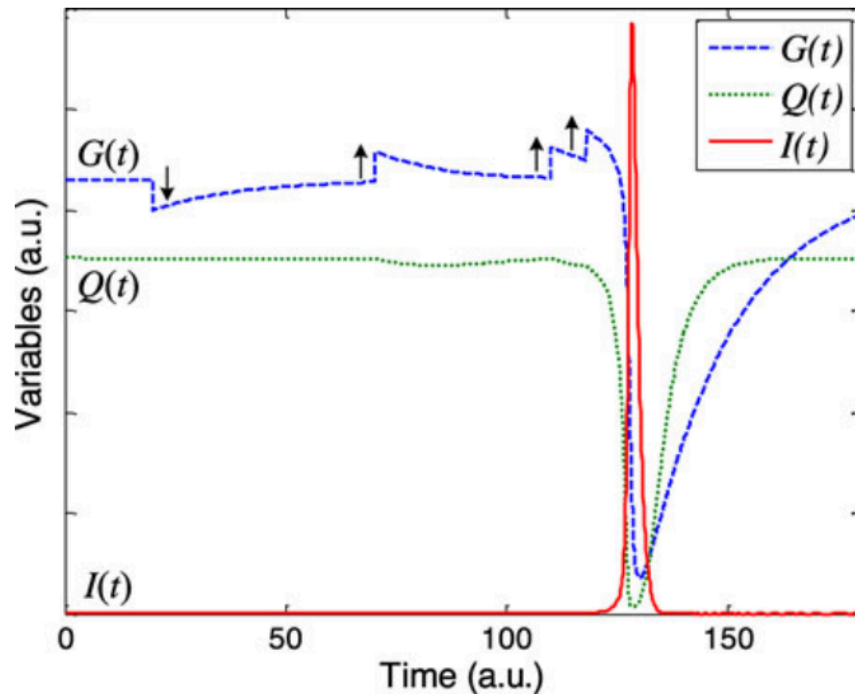


$$\begin{cases} \dot{I} = \gamma_I [G - Q - 1] I \\ \dot{G} = \gamma_G [A - G - GI] + \theta \\ \dot{Q} = \gamma_Q [B - Q - aQI] \end{cases}$$

[3]

Implementación de modelo LIF en un VCSEL

Generación del disparo ($t \approx 125$)



[3]

$$\begin{cases} \dot{I} = \gamma_I [G - Q - 1] I \\ \dot{G} = \gamma_G [A - G - GI] + \theta \\ \dot{Q} = \gamma_Q [B - Q - aQI] \end{cases}$$

$$\Downarrow$$

Si $G - Q - 1 > 0$

$\Rightarrow I$ crece exponencialmente

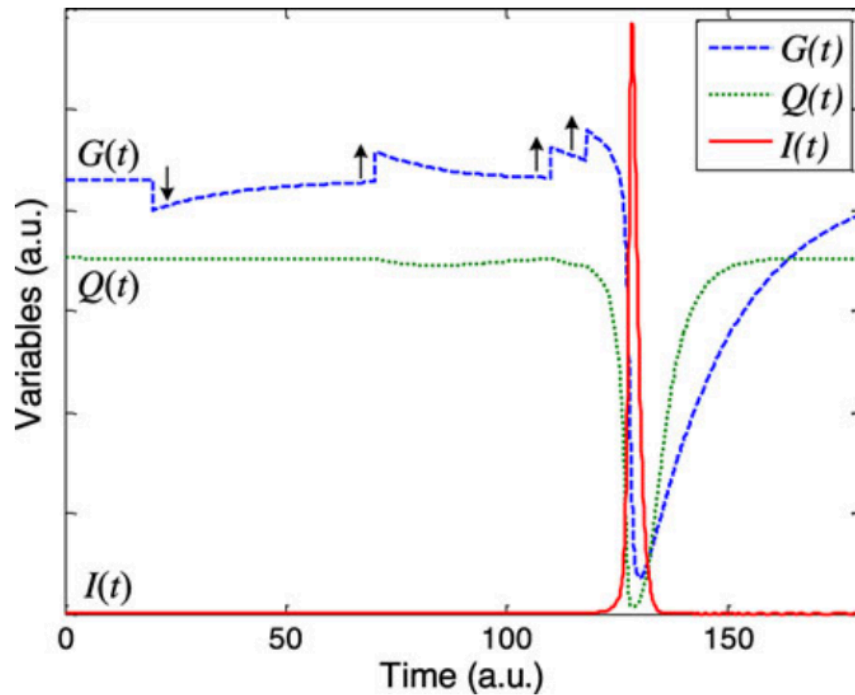
$\Rightarrow \downarrow Q$ y $\downarrow G$

$\Rightarrow G - Q - 1 < 0$

$\Rightarrow I$ decrece exponencialmente

Implementación de modelo LIF en un VCSEL

Luego del disparo ($t > 130$)

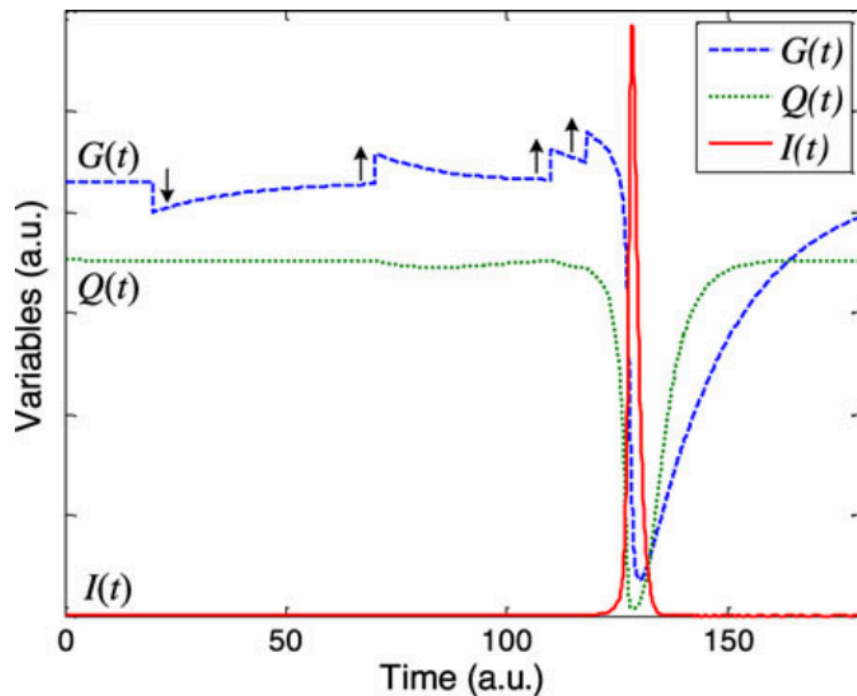


$$\begin{cases} \dot{I} = \gamma_I [G - Q - 1] I \\ \dot{G} = \gamma_G [A - G - GI] + \theta \\ \dot{Q} = \gamma_Q [B - Q - aQI] \end{cases}$$

[3]

Implementación de modelo LIF en un VCSEL

Luego del disparo ($t > 130$)



[3]

$$\begin{cases} \dot{I} = \gamma_I [G - Q - 1] I \\ \dot{G} = \gamma_G [A - G - GI] + \theta \\ \dot{Q} = \gamma_Q [B - Q - aQI] \end{cases}$$

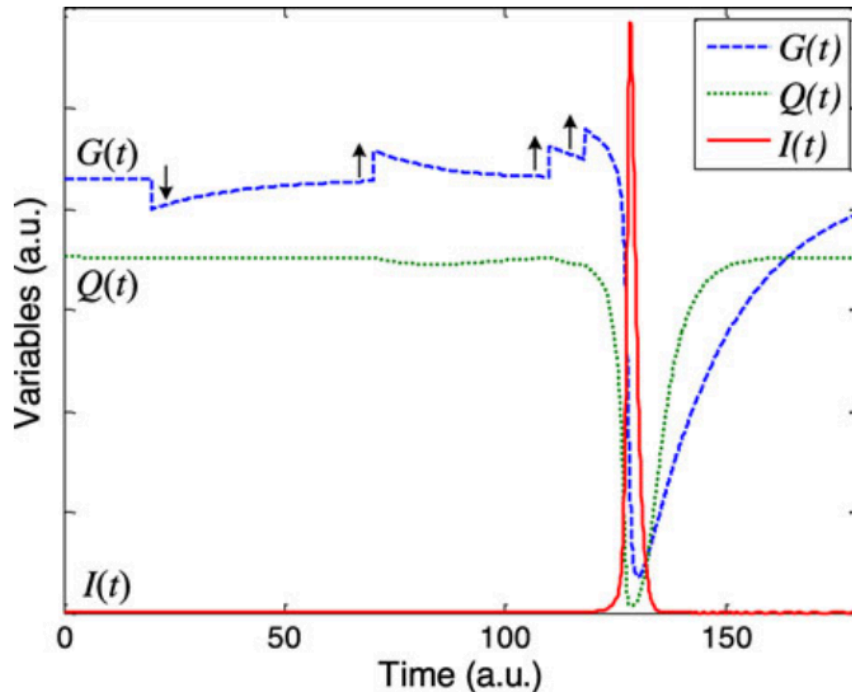
\Downarrow

$$\begin{cases} I = I_{eq} \approx 0 \\ \dot{G} = \gamma_G [A - G] + \theta \\ Q = Q_{eq} = B \end{cases}$$

(Recordar que $\frac{1}{\gamma_I} \ll \frac{1}{\gamma_Q} \ll \frac{1}{\gamma_G}$)

Implementación de modelo LIF en un VCSEL

Repaso de condiciones necesarias para implementaciones de modelo LIF



- ✓ Integrar con pérdidas la señal de entrada.
- ✓ Comparar la integral con un valor umbral.
- ✓ Generar un pulso cuando la integral supere el umbral.
- ✓ Restablecer el valor de la integral luego de que supere el umbral.

⇒ El VCSEL con absorbente saturable implementa el modelo neuronal LIF!

¡Muchas gracias!

References

Referencias

- Wikimedia Commons, “Leaky Integrate-and-Fire model neuron.” [Online]. Available:
- [1] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Leaky_Integrate-and-Fire_model_neuron_%28schematic%29.jpg
 - M. Yamada, “A theoretical analysis of self-sustained pulsation phenomena in narrow-stripe semiconductor lasers,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 29, no. 5, pp. 1330–1336, 1993, doi: [10.1109/3.236146](https://doi.org/10.1109/3.236146).
 - [2] M. A. Nahmias, B. J. Shastri, A. N. Tait, and P. R. Prucnal, “A Leaky Integrate-and-Fire Laser Neuron for Ultrafast Cognitive Computing,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1–12, 2013, doi: [10.1109/JSTQE.2013.2257700](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2013.2257700).
 - [3]

Apéndice

Ejemplo de redes mínimas

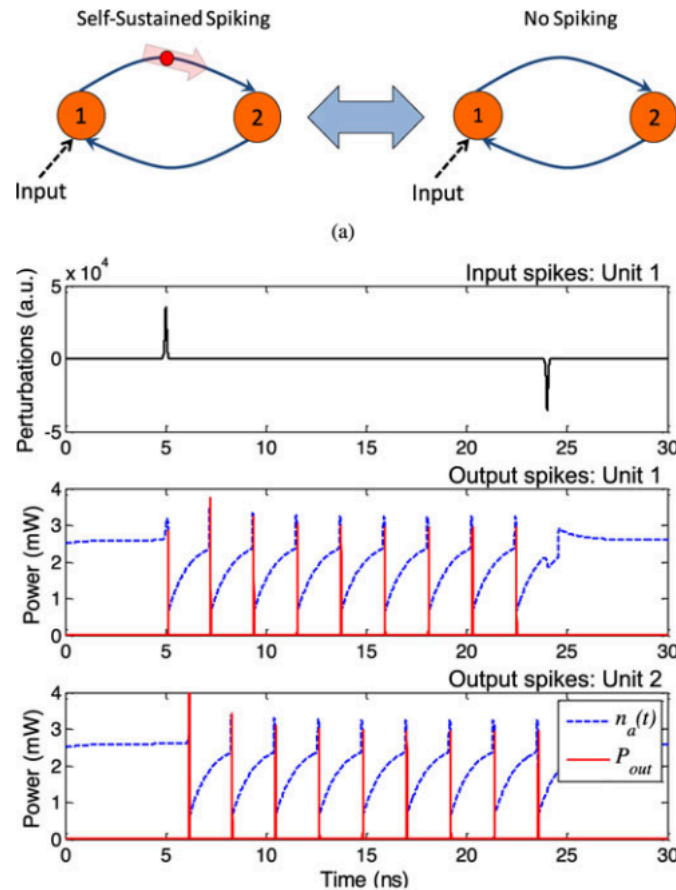


Figure: Circuito biestable formado por dos neuronas interconectadas.

Ejemplo de redes mínimas

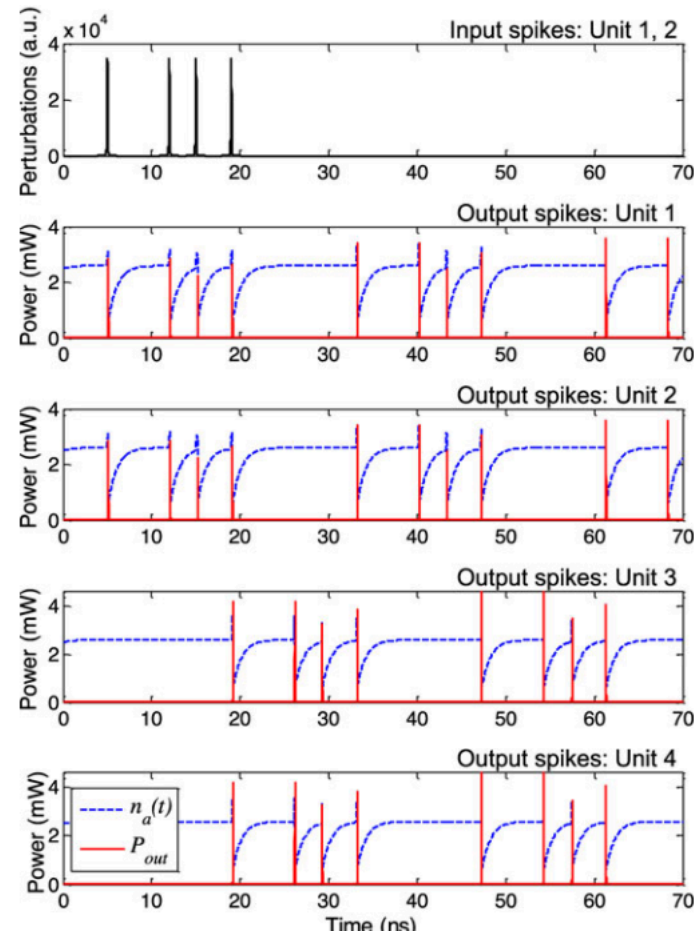
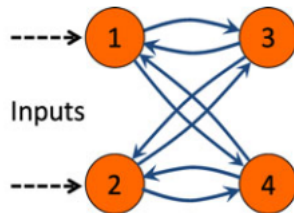


Figure: Circuito de 4 neuronas con capacidad de repetir un patrón de pulsos de entrada. [3]

Ejemplo de redes mínimas

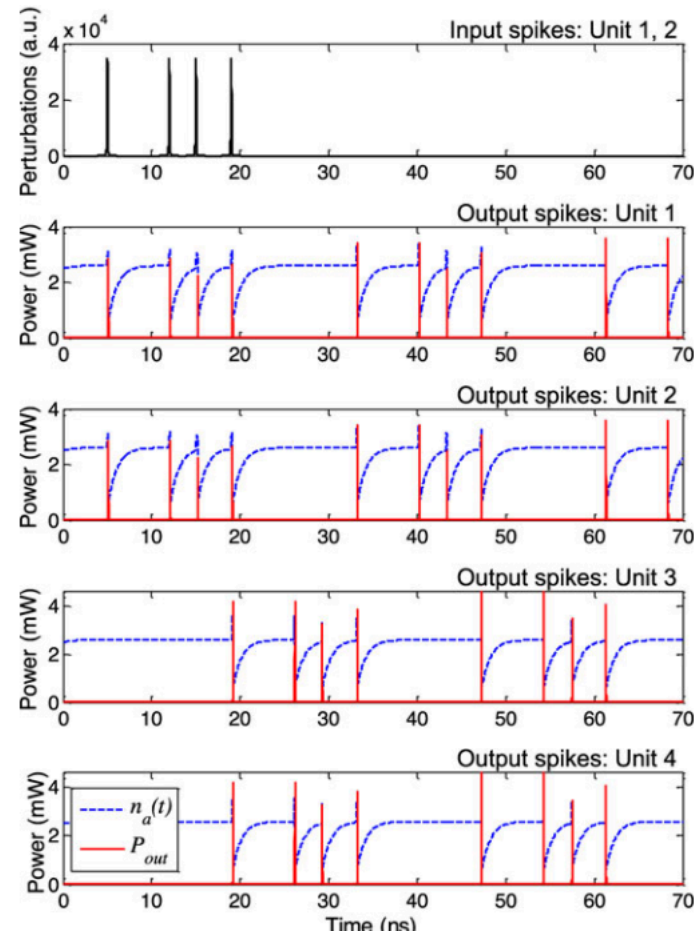
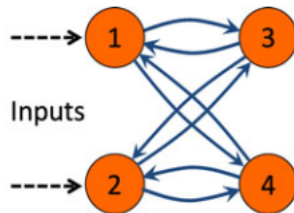


Figure: Circuito de 4 neuronas con capacidad de repetir un patrón de pulsos de entrada. [3]

Conexiones entre neuronas fotónicas

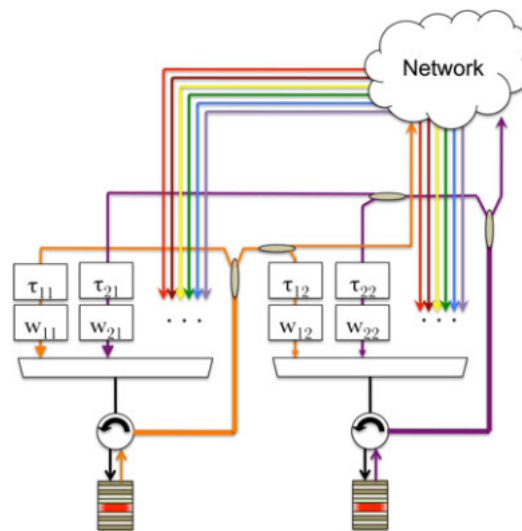


Figure: Esquemático de conexiones en una SNN fotónica. [3]