

# Diseño e implementación de un módulo para simular láseres de modulación directa

MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN  
COMUNICACIONES ÓPTICAS

SANTIAGO JIMÉNEZ ORTIZ  
LAIA NADAL REIXATS

ENERO 2020



# Índice

---

- Resumen
- Objetivos
- Estado del arte
- Modelado
- Simulación
- Conclusiones

# Resumen

---

- Extensión del uso de redes ópticas para comunicaciones.
- Se propone implementar un módulo de simulación para emular láseres de modulación directa.
- Se parte de las ecuaciones que modelan al láser.

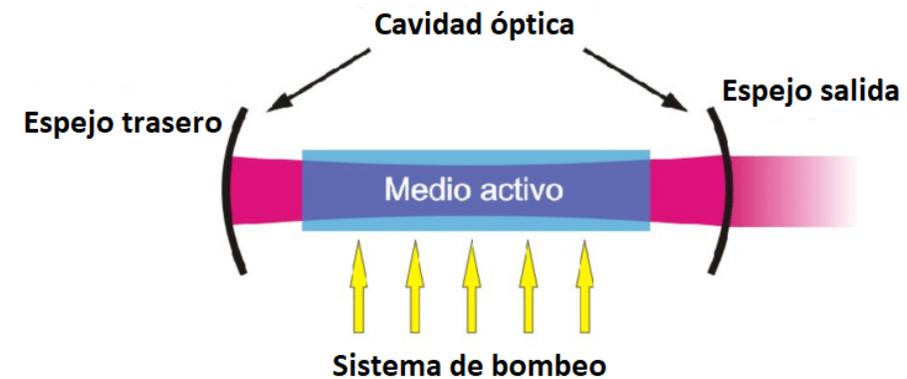
# Objetivos

---

- Estudio de los modelos teóricos actuales sobre tipos de láseres
- Diseño de un módulo de simulación de la modulación directa de los distintos tipos de láser mediante la implementación de las ecuaciones de intensidad del láser.
- Implementación del módulo de simulación usando Matlab.
- Evaluación de los resultados obtenidos.

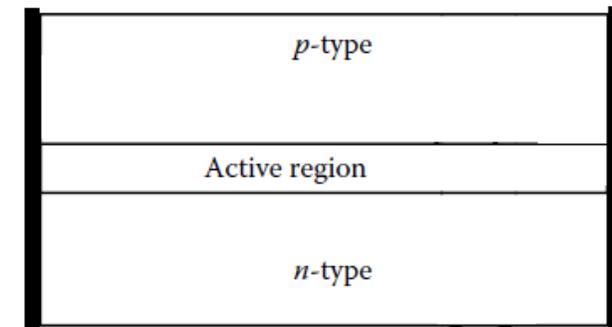
# Estado del arte - Láser

- Láser: emisor estimulado de luz coherente.
- Ventajas:
  - Tamaño compacto
  - Alta potencia
  - Estrechez espectral
  - Modulables



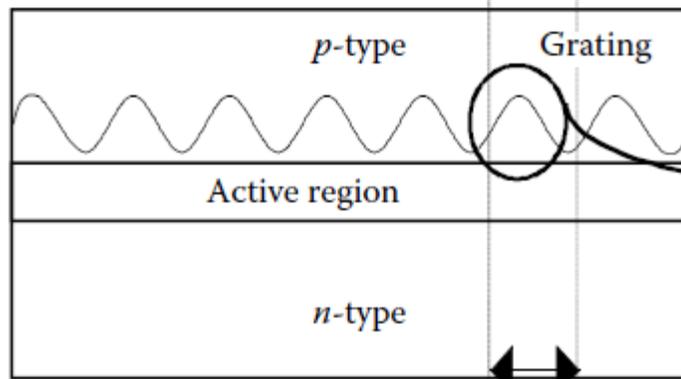
# Estado del arte – Láser de semiconductor

- Formado por una unión P-N.
  - Uno de los láseres más extendidos.
  - Láser FP: Es la base de los láseres DFB y VCSEL.
- Tipos:
    - FP
    - **DFB**
    - **VCSEL**
    - DBR
    - SQW
    - MQW



# Estado del arte – Láser DFB

- Formado por una cavidad con una rejilla corrugada
- Las variaciones en el índice de refracción difractan la onda en dirección positiva y negativa, lo que la realimenta.
- La anchura y el índice de refracción de la rejilla corrugada nos proporcionan la longitud de onda



$$\Lambda = m \left( \frac{\lambda_B}{2n_{eq}} \right)$$

## Ventajas

- Altas prestaciones
- Alta potencia
- Pureza óptica

## Inconvenientes

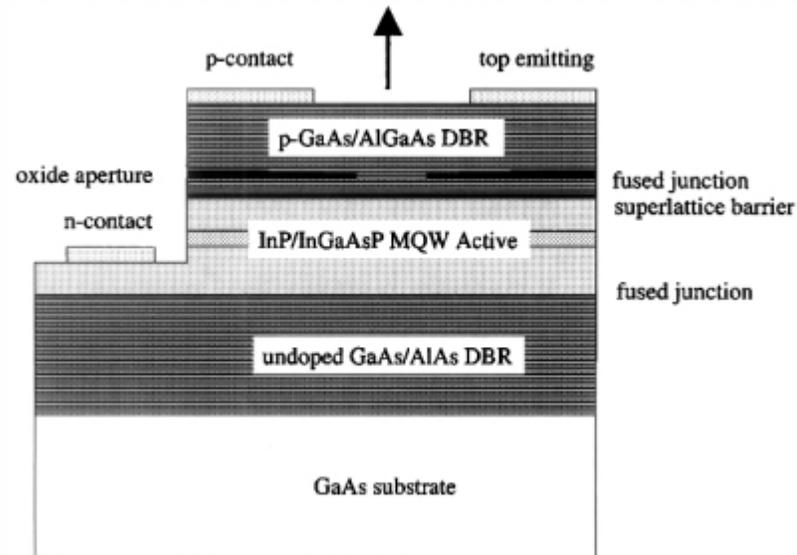
- Coste elevado
- Dificultad de fabricación

## Aplicaciones en las comunicaciones ópticas

- Enlaces de largo alcance (WAN)

# Estado del arte – Láser VCSEL

- La cavidad FP tiene forma vertical.
- El medio activo se rodea a ambos lados por espejos Bragg formados por múltiples capas de diferentes materiales.
- El grosor  $\lambda/4$  de las capas determina la longitud de onda.



## Ventajas

- Bajo coste
- Pequeño tamaño

## Inconvenientes

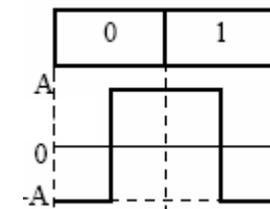
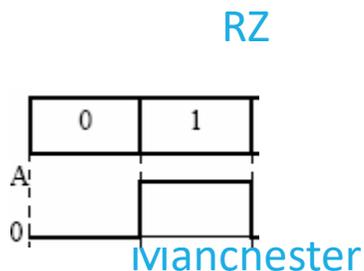
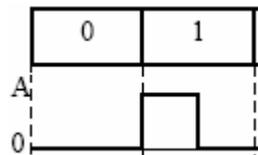
- Baja potencia
- Bajas prestaciones

## Aplicaciones en las comunicaciones ópticas

- Enlaces de medio (MAN) y corto alcance (LAN)
- Comunicaciones en *datacenters*

# Estado del arte – Modulación directa

- Estimulación de la emisión de un láser mediante una corriente eléctrica que incide sobre la cavidad del láser.
- La más típica: OOK (*On/Off Keying*).
- Ventajas: simpleza y bajo coste.
- Desventajas: *chirp*.
- Tipos:



# Modelado – *Rate equations*

---

- Para evaluar el comportamiento de los láseres, haremos uso de las *rate equations*.
- Las *rate equations* son un conjunto de ecuaciones diferenciales que modelan el láser.
- Nos proporcionarán la densidad de portadores, de electrones y la fase de cada láser.
- Con esos datos, se calcula la potencia emitida.
- Método de resolución → Método Runge-Kutta

# Modelado – Láser DFB

- ~~Rate equations:~~

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{qV_a} - \frac{N(t)}{\tau_n} - v_g a_o \frac{N(t) - N_o}{1 + \epsilon_c S(t)} S(t) + N(0,1) \sqrt{2 \left( \frac{\beta V_a N_{sd} (V_a S_{sd} + 1)^3}{\tau_n} \right)}$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \left( \Gamma a_o v_g \frac{N(t) - N_o}{1 + \epsilon_c S(t)} - \frac{1}{\tau_p} \right) S(t) + \frac{\beta \Gamma N(t)}{\tau_n} + N(0,1) \sqrt{2 \left( \frac{V_a N_{sd} (V_a S_{sd} + 1)}{\tau_n} \right)}$$

$$\frac{d\phi_m(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2} \left( \Gamma v_g a_o (N(t) - N_p) - \frac{1}{\tau_p} \right) + N(0,1) \sqrt{\frac{\Gamma v_g \sigma_g (N(t) - N_o)}{\tau_n}}$$

- Potencia:
- Potencia:  $m(t) = \frac{S(t) V_a \eta_o h \nu}{2 \Gamma \tau_p}$
- Chirp:
- Chirp:  $\Delta \nu(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_m(t)}{dt}$

- Estados iniciales

$$N(0) = \frac{\tau_n}{(\beta - 1)} \left( \frac{S(0)}{\Gamma \tau_p} - \frac{I_{bias}}{qV_a} \right)$$

$$S(0) = \frac{qV_a(\beta - 1)[1 + N_o \Gamma a_o v_g \tau_p] + \tau_n I_{bias} \Gamma a_o v_g \tau_p}{qV_a[\tau_n a_o v_g - \epsilon_c(\beta - 1)]}$$

$$\phi_m(0) = 0$$

# Modelado – Láser VCSEL

- **Rate equations:**

$$\frac{dN_0}{dt} = \frac{\eta_i I}{q} - \frac{N_0}{\tau_n} - \frac{G(T)[\gamma_{00}(N_0 - N_t(T)) - \gamma_{01}N_1]}{1 + \epsilon S} S - \frac{I_l(N_0, T)}{q}$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{N_1}{\tau_n} (1 + h_{diff}) + \frac{G(T)[\phi_{100}(N_0 - N_t(T)) - \phi_{101}N_1]}{1 + \epsilon S} S$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S}{\tau_p} + \frac{\beta N_0}{\tau_n} - \frac{G(T)[\gamma_{00}(N_0 - N_t(T)) - \gamma_{01}N_1]}{1 + \epsilon S} S$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\alpha}{2} \frac{G(T)[\gamma_{00}(N_0 - N_{th}) - \gamma_{01}N_1]}{1 + \epsilon S} S$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_0 - T + (I_{tot}V - P_{out})R_{th}}{\tau_{th}}$$

- **Potencia:**  $P_{out}(t) = k_f S(t)$

- **Estados iniciales:**

$$N_0(0) = N_{tr}$$

$$N_1(0) = 0.01 \cdot N_{tr}$$

$$S(0) = 100$$

$$\phi(0) = 0$$

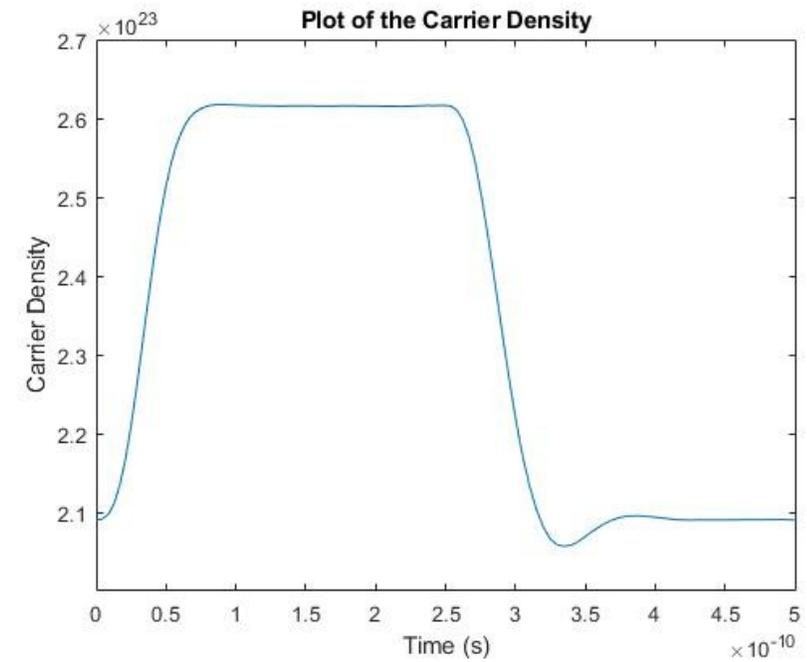
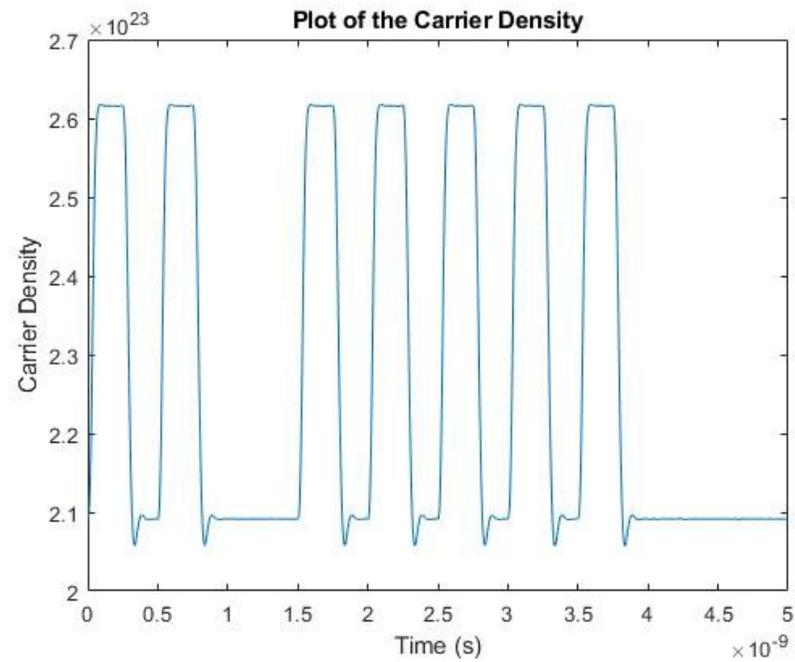
$$T(0) = 300$$

# Simulación – Láser DFB

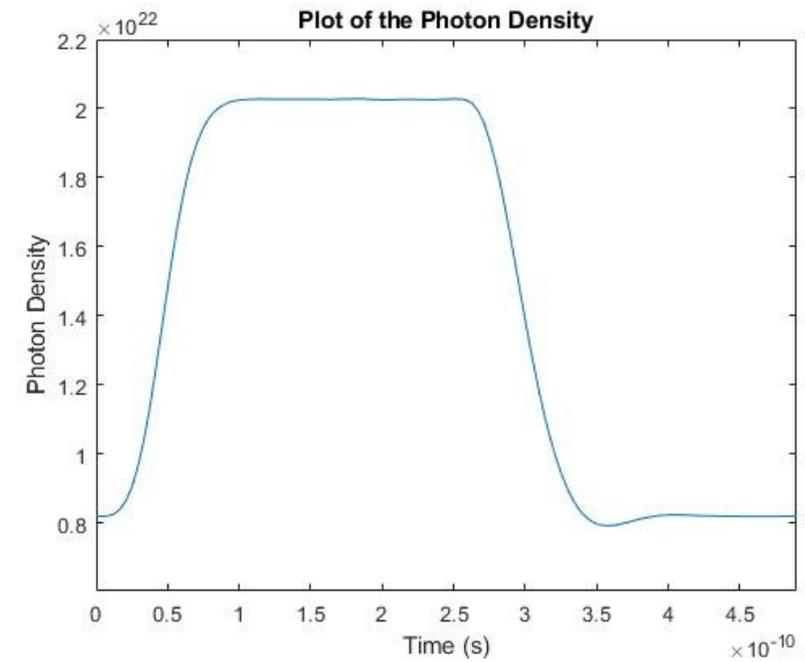
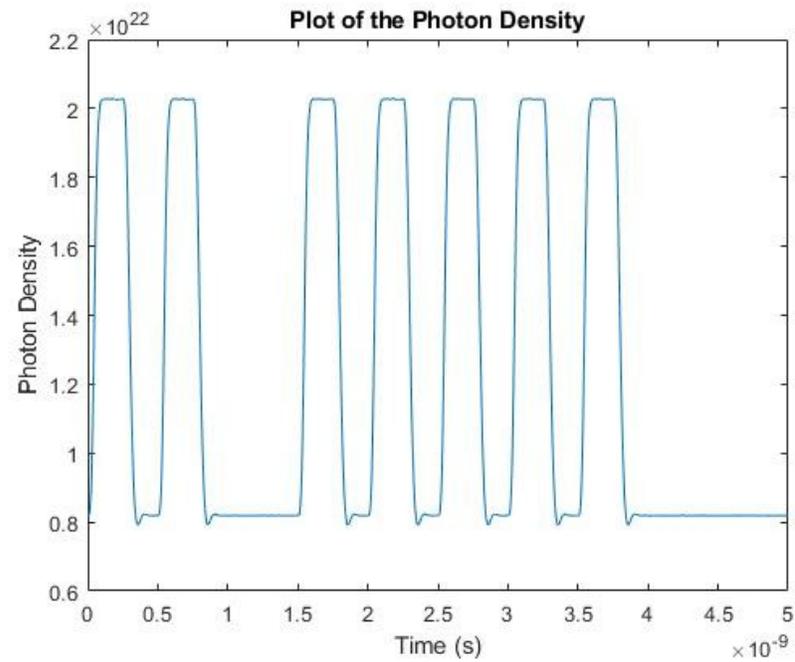
- Señal de entrada: señal RZ cuadrada de periodo 0.5 ns y duración 5 ns.
- Secuencia: 1101111100
- Valores para el modelado:

Constante	Valor
	0.8
	$7.5 \cdot 10^7$ m/s
	$3.2 \cdot 10^{-20}$
	$10^{12}$
	$2.5 \cdot 10^{-23}$
	$3 \cdot 10^{-12}$ s
	$0.3 \cdot 10^{-9}$ s
	$3 \cdot 10^5$
	$1.5 \cdot 10^{-16}$ m <sup>3</sup>
	1
	$1.6 \cdot 10^{-19}$ C

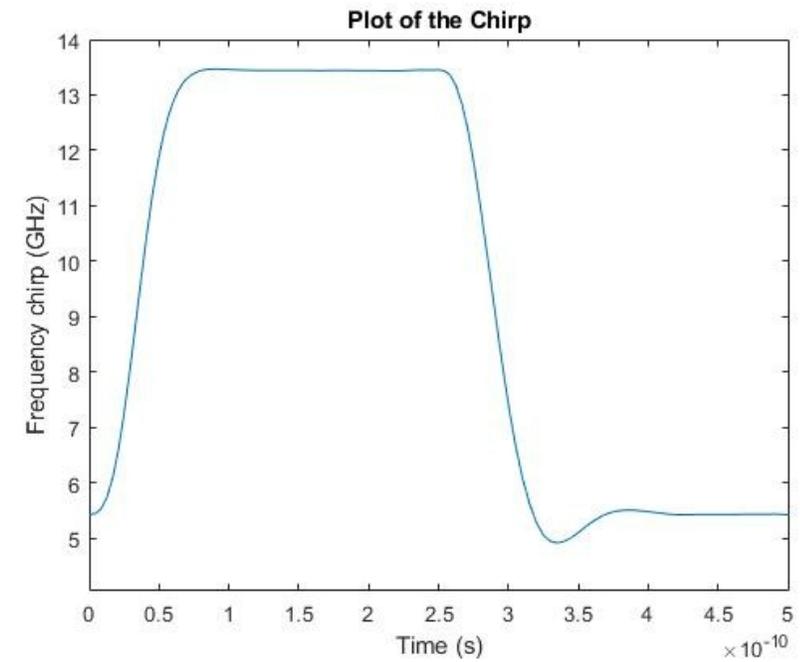
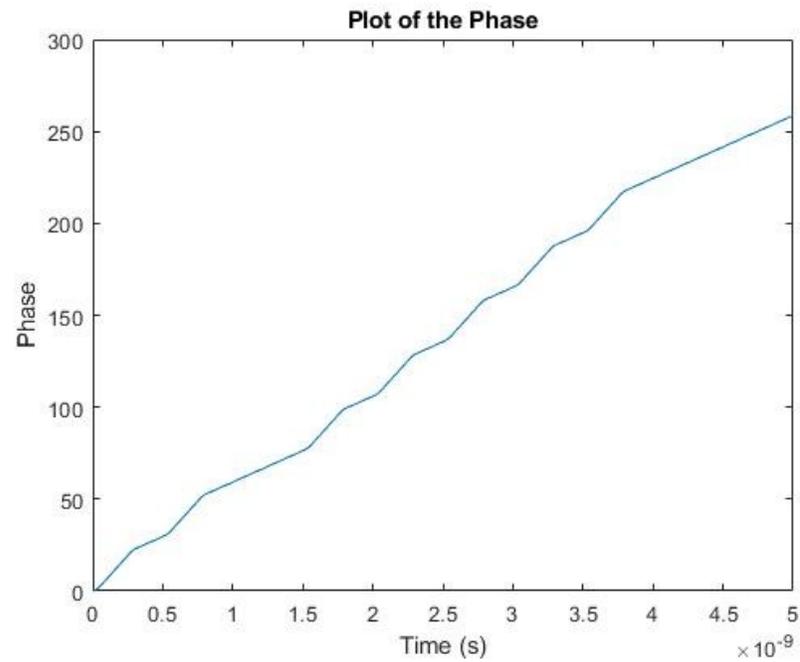
# Simulación – Densidad de portadores



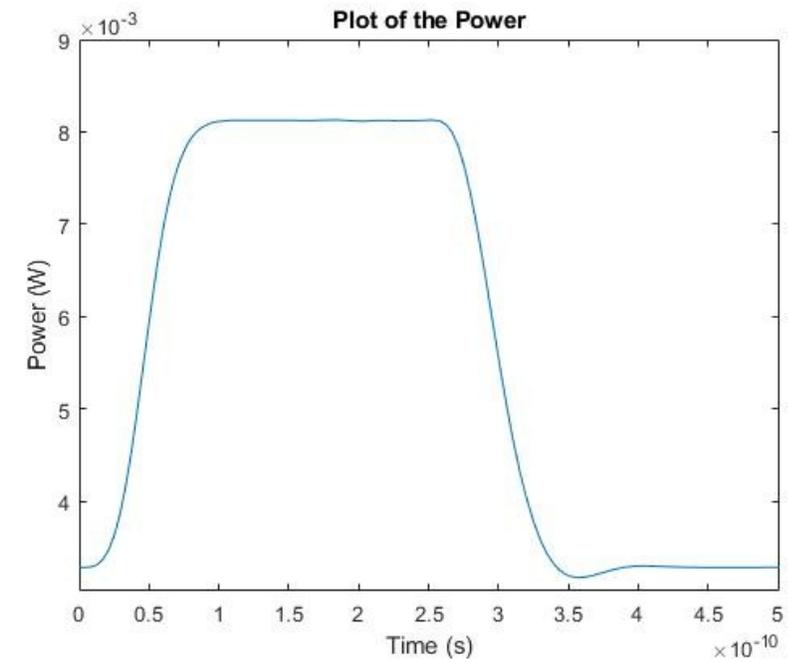
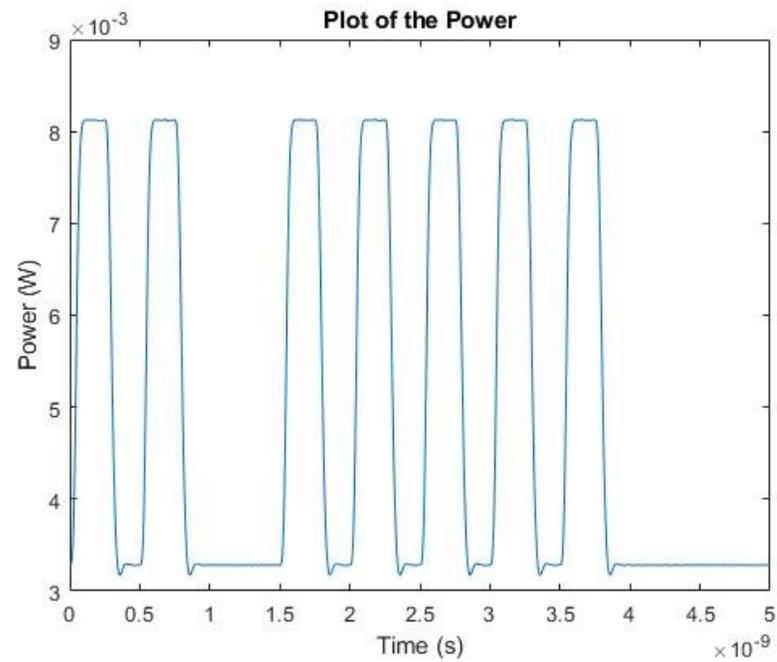
# Simulación – Densidad de fotones



# Simulación – Fase y *chirp*

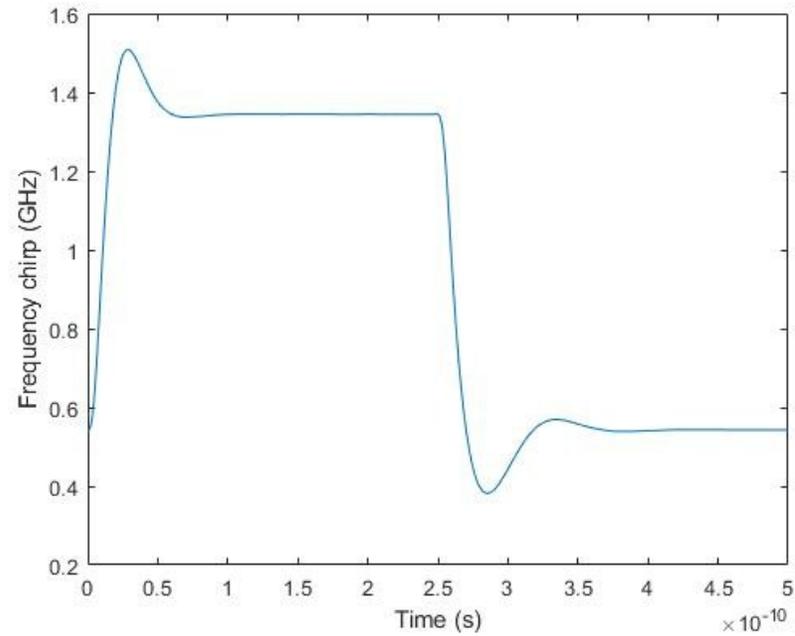


# Simulación – Potencia

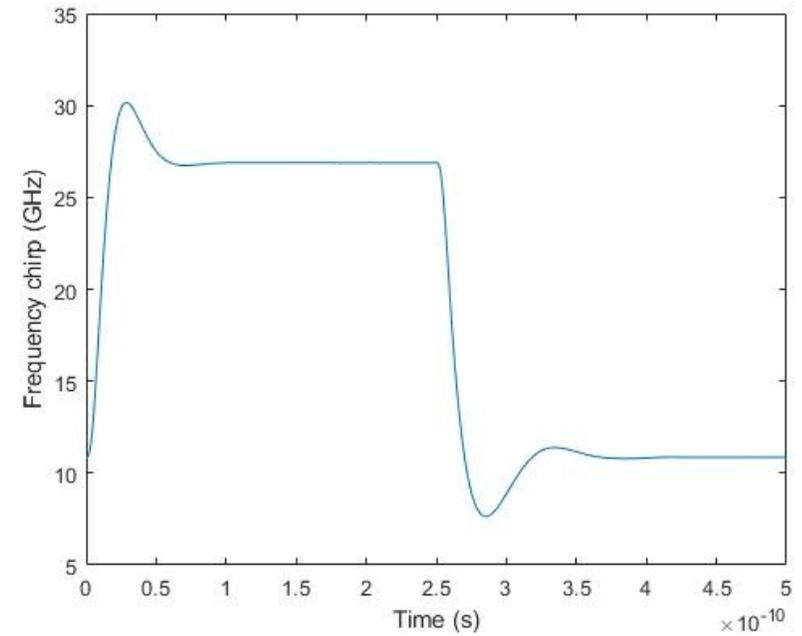


# Simulación – Efecto del *chirp*

$\alpha = 0.1$



$\alpha = 2$

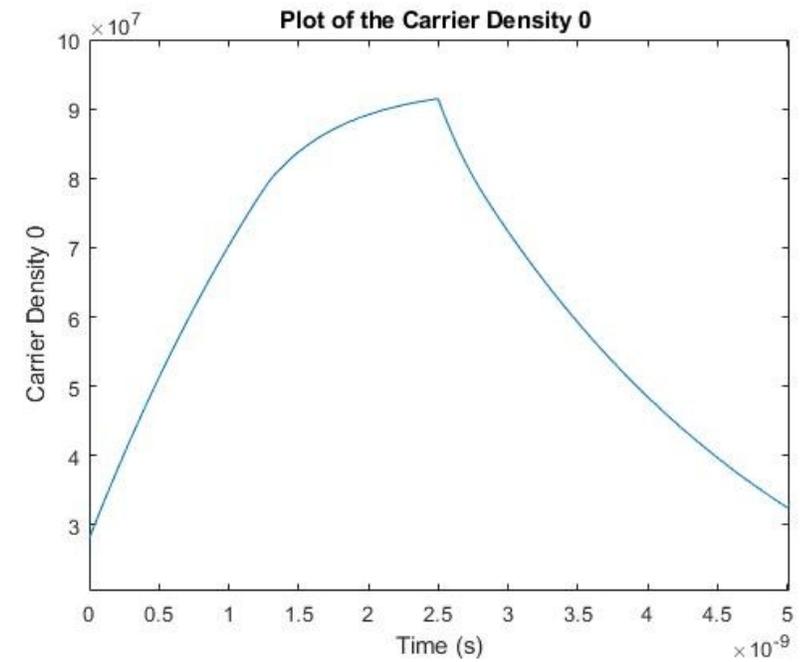
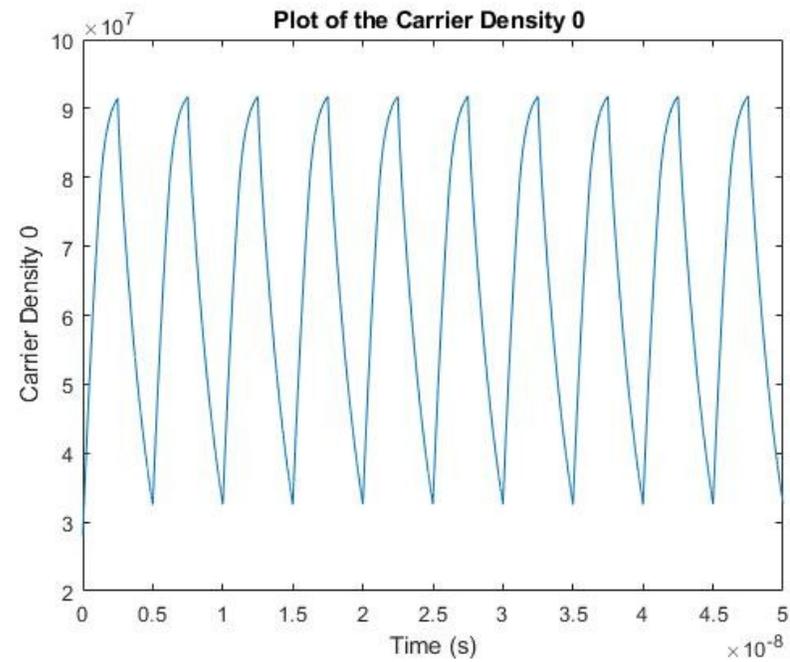


# Simulación – Láser VCSEL

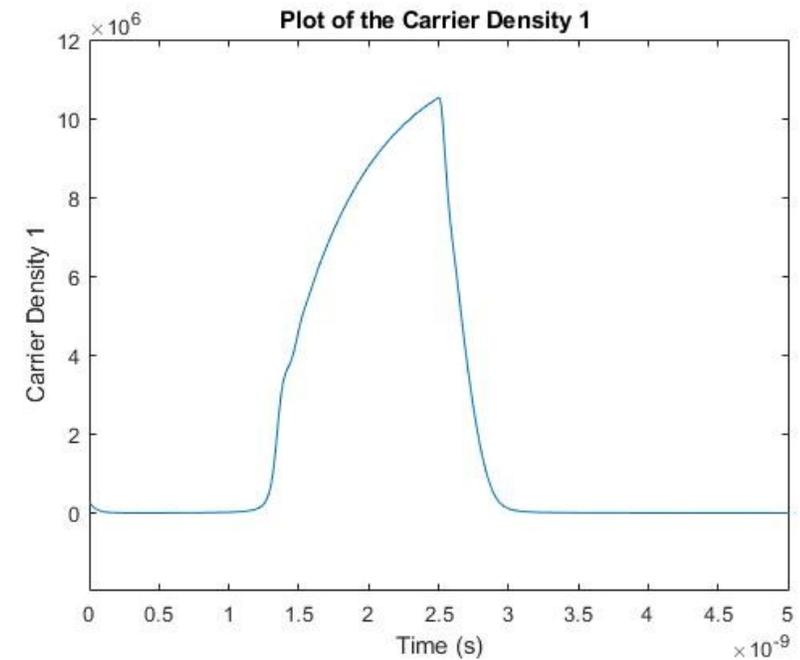
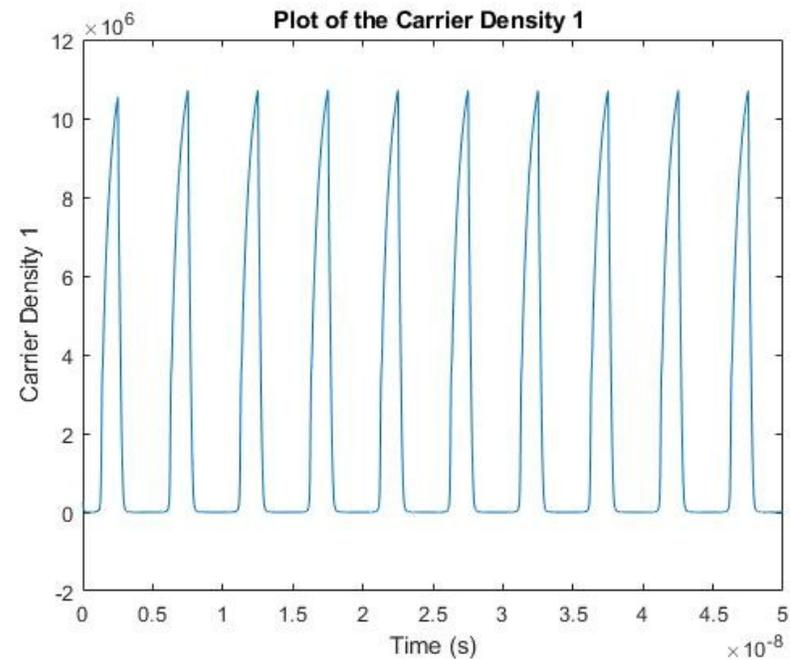
- Señal de entrada: señal RZ cuadrada de periodo 0.5 ns y duración 5 ns.
- Valores para el modelado:
- Secuencia: 1111111111

Constante	Valor
	0.3
	0.37978
	2.3412
	1.8193
	$5 \cdot 10^{-7}$
	$2.5 \cdot 10^{-12} \text{ s}$
	$2.5 \cdot 10^{-9} \text{ s}$
	$1 \cdot 10^{-3}$
	900 $\Omega/\text{W}$
	$1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
	$3 \cdot 10^4$
	9.61 A
	$2.8 \cdot 10^7$
	278 K
	1.75 V
	$1.5 \cdot 10^{-8} \text{ W}$

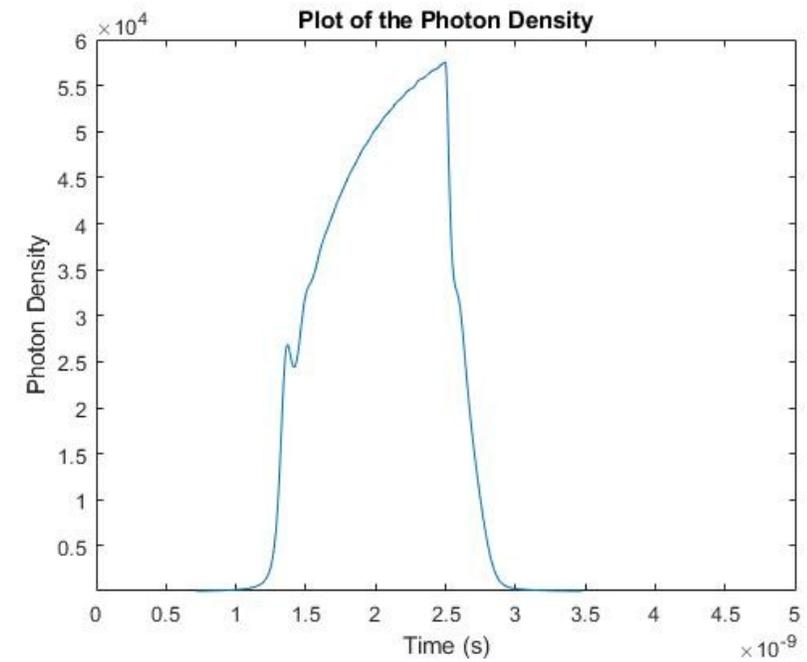
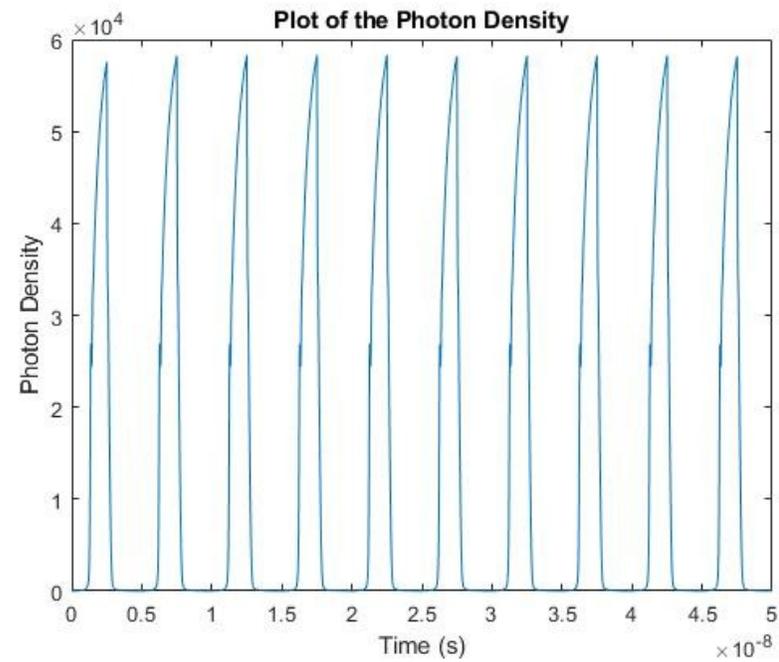
# Simulación – Densidad de portadores 0



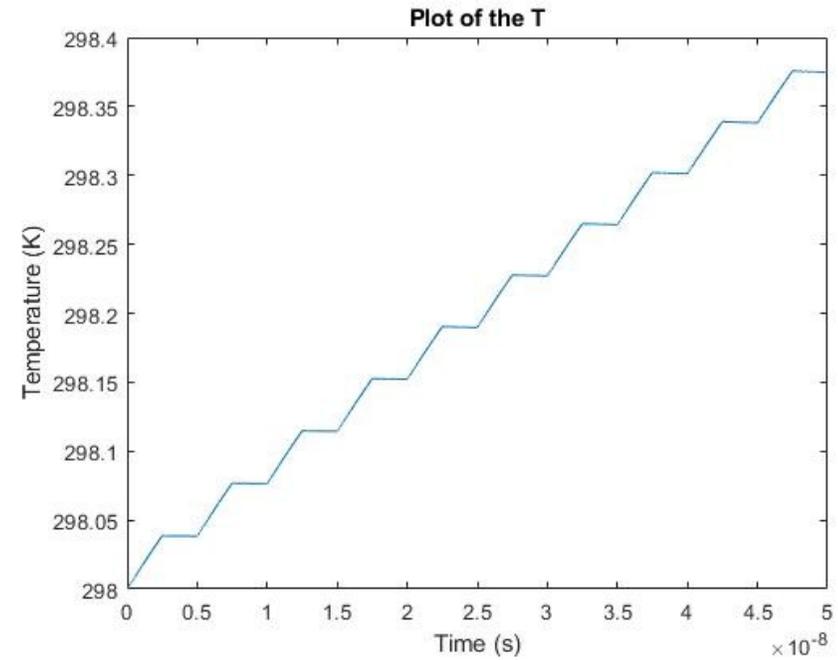
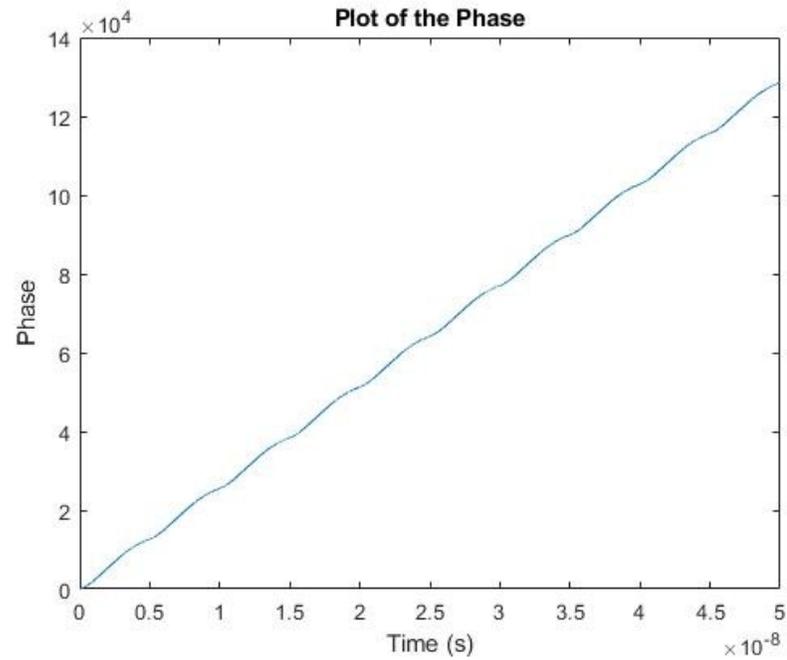
# Simulación – Densidad de portadores 1



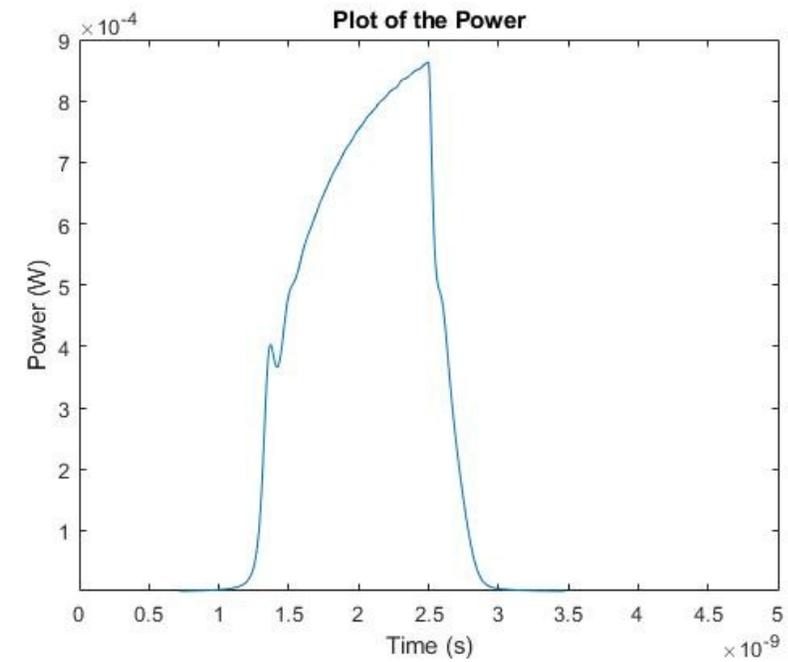
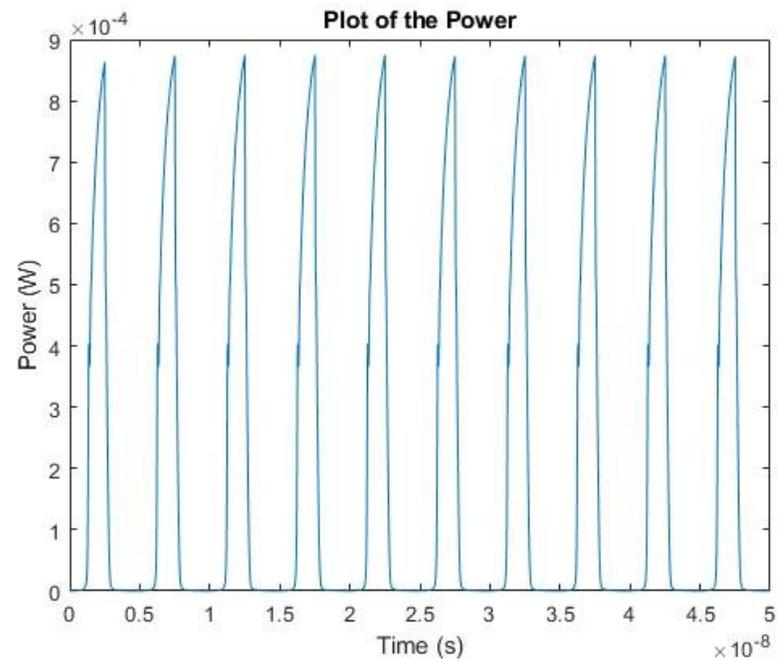
# Simulación – Densidad de fotones



# Simulación – Fase y temperatura



# Simulación – Potencia



# Conclusiones y líneas futuras

---

- Se ha hecho un estudio sobre el modelado de un láser en modulación directa, basado en sus *rate equations*.
- Se ha logrado desarrollar un módulo para la simulación tanto de un láser DFB como de un láser VCSEL.
  
- Líneas futuras:
  - Ampliación del módulo para más tipos de láser.
  - Estudio del comportamiento de los parámetros del VCSEL.