



# Simulador de dispositivos SLM basados en cristal líquido

N.J. Gallego-Molina, A. Puerta-Notario, M. Castillo-Vázquez,  
J.M. Garrido-Balsells.

# Contenido

## 1 Introducción

- ❑ Dispositivos SLM
- ❑ Aplicación a sistemas FSOC

## 2 Fundamentos dispositivos SLM

- ❑ Estructura molecular
- ❑ Funcionamiento

## 3 Simulación sistemas SLM

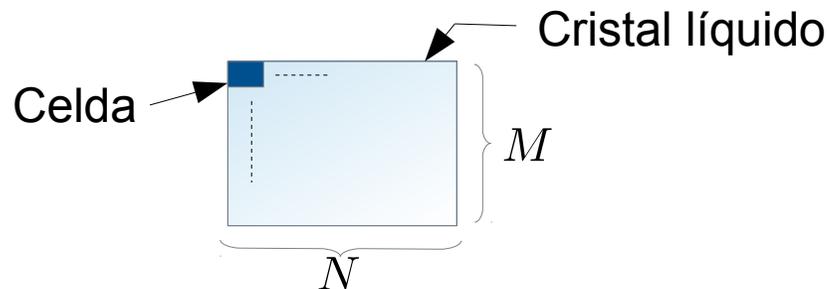
- ❑ Modelado matemático
- ❑ Desarrollo del simulador

## 4 Resultados y conclusiones

## Dispositivos SLM

### ❑ Spatial Light Modulator

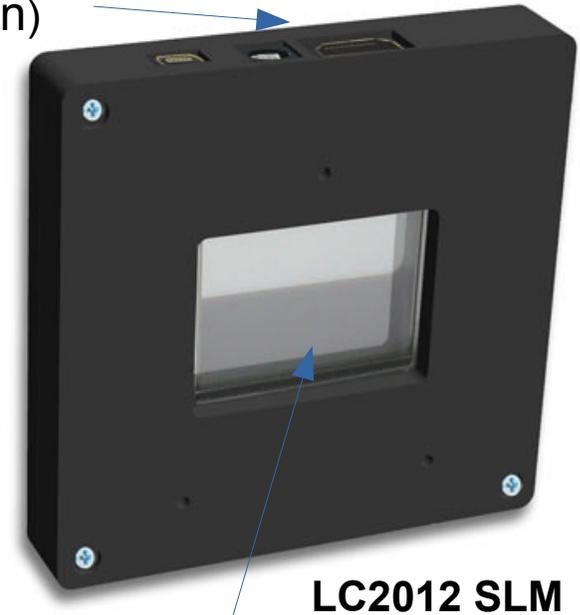
- Dispositivo capaz de modificar la amplitud, la fase y la polarización de una fuente de luz.
- La modulación se consigue al atravesar la luz un cristal líquido (LCD).
- El LCD tiene propiedades propias de los sólidos (estructura) y de los líquidos (flexibilidad).
- El LCD está formado por  $N \times M$  celdas cuyas propiedades ópticas se pueden variar de forma individual mediante la aplicación de una tensión.



- Para aplicar la tensión, se carga en el SLM una imagen en escala de grises (entrada HDMI).

Entrada HDMI  
(imagen)

**HOLOEYE**



Cristal líquido

### Características

Pantalla: LCD TN

Área activa: 36.9 x 27.6 mm

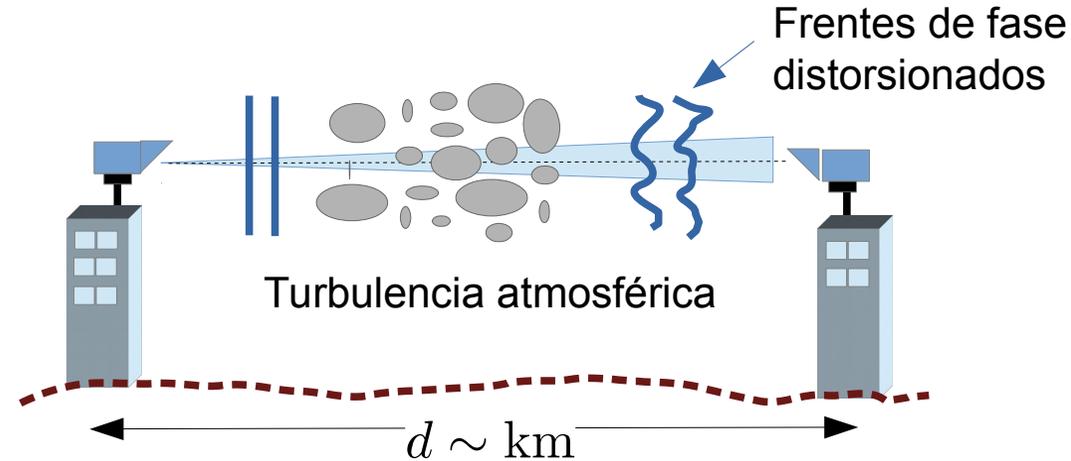
Resolución: 1024 x 768 pixels

Imagen (grises): 8 bits (256 niv.)

## Aplicación a sistemas FSOC

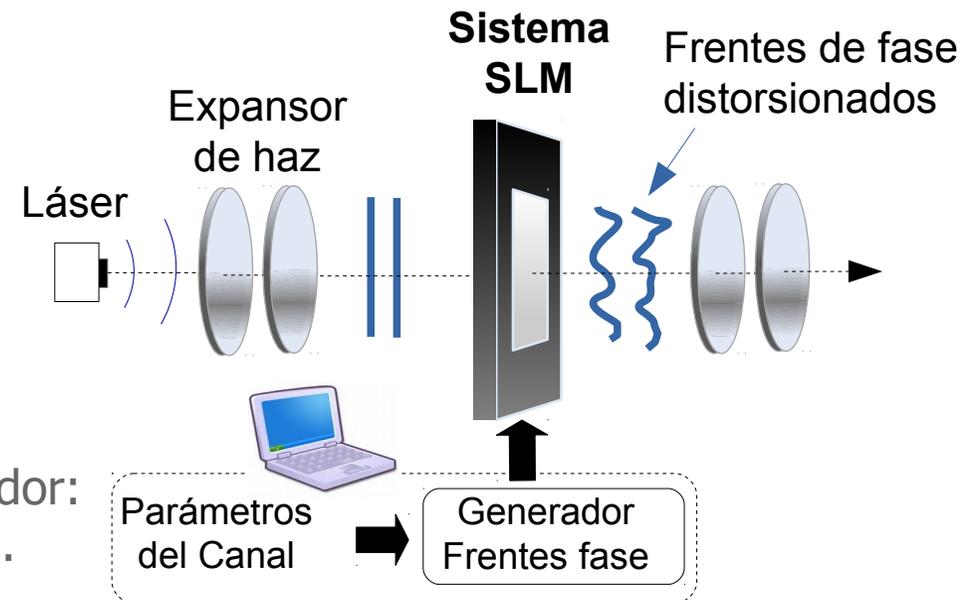
### ❑ Sistemas FSOC

- Gran capacidad y seguridad
- No regulación y rápido despliegue
- Sistemas todo-ópticos
- Absorción y distorsión por turbulencias atmosféricas



### ❑ Emulador de turbulencias

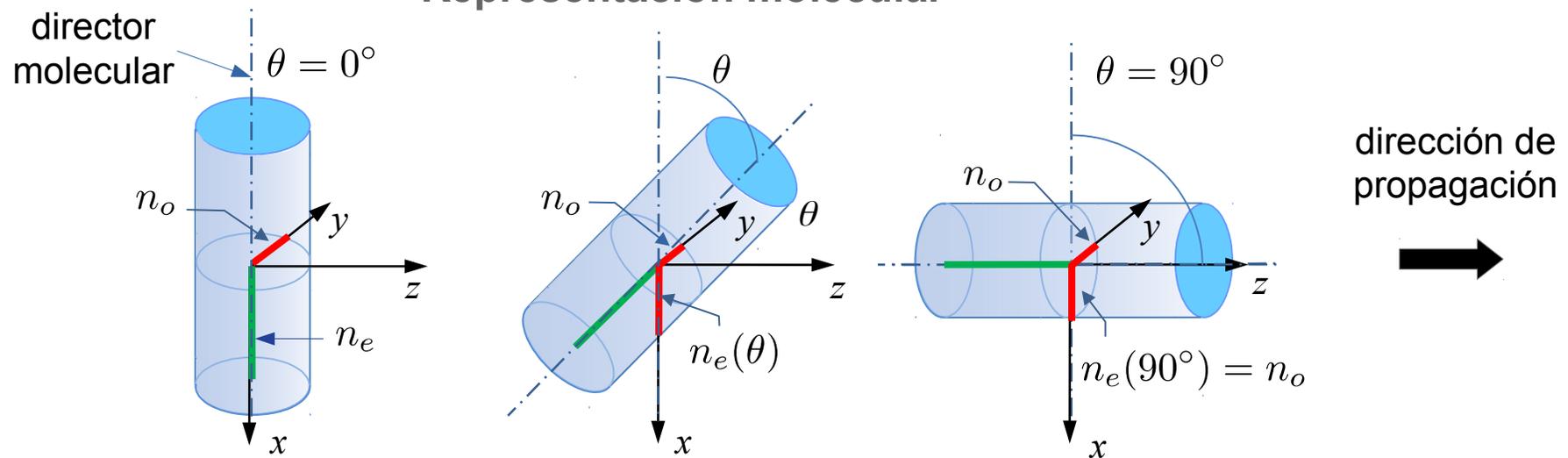
- Está formado por: láser, expansor, SLM, Polarizadores y SW generador de frentes con distorsión de fase.
- El SW genera una matriz de fase a partir de los parámetros de turbulencia del canal.
- Existen otras alternativas para el emulador: cámara turbulencias y óptica adaptativa.



## Estructura molecular

El cristal líquido está compuesto por moléculas alargadas. Las moléculas están orientadas por lo que el material es anisótropo. Presenta dos índices de refracción (birrefringencia).

### Representación molecular



El director molecular se reorienta por la acción de un campo eléctrico, superado un umbral. Por tanto, la birrefringencia del material se controla mediante la aplicación de un voltaje.

$\theta$  - Ángulo de inclinación

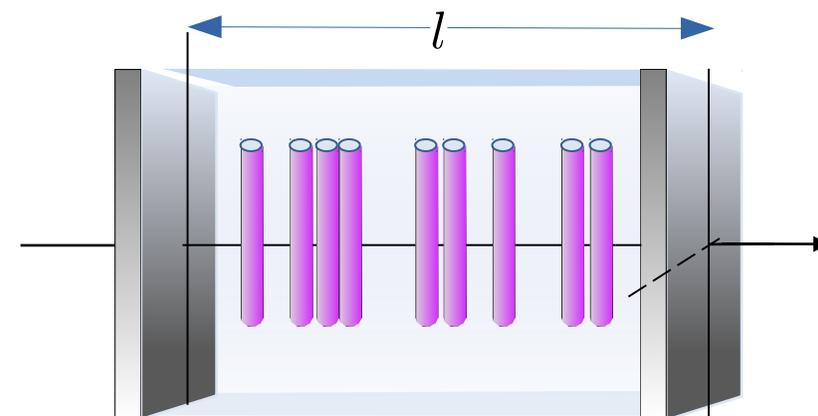
$n_o$  - Índice de refracción ordinario

$n_e$  - Índice de refracción extraordinario

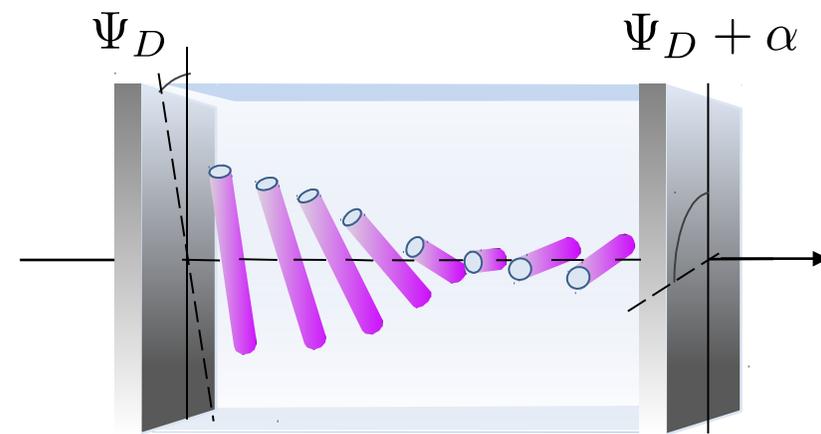
$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\cos^2(\theta)}{n_e^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{n_o^2}$$

## Estructura molecular

- ❑ **LC nemático (NLC)**  
Moléculas orientadas en una dirección pero con posiciones aleatorias dentro del material.
- ❑ **LC nemático de giro helicoidal (TNLC)**  
Moléculas que van girando progresivamente a lo largo del cristal.  
Tienen mayor resolución espacial, facilidad de control y menor coste.



Celda NLC



Celda TNLC

Las direcciones de orientación de las moléculas en ambos extremos se fijan mediante pulido (microrrugosidades). Se impone el giro.

Se definen los ángulos:

$\Psi_D$  - Ángulo director molecular (entrada)

$\alpha$  - Ángulo de giro  $\alpha = 45^\circ, 90^\circ, 300^\circ$

## Funcionamiento

### Depende de voltaje aplicado

$$V = 0$$

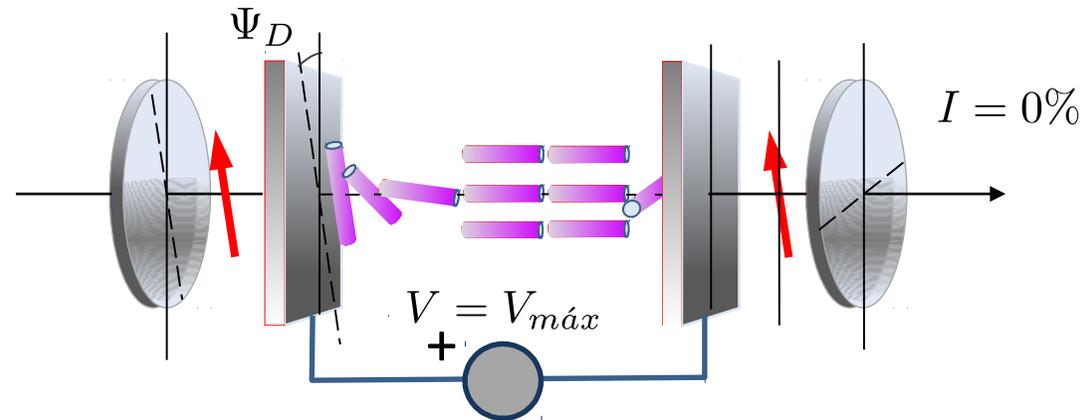
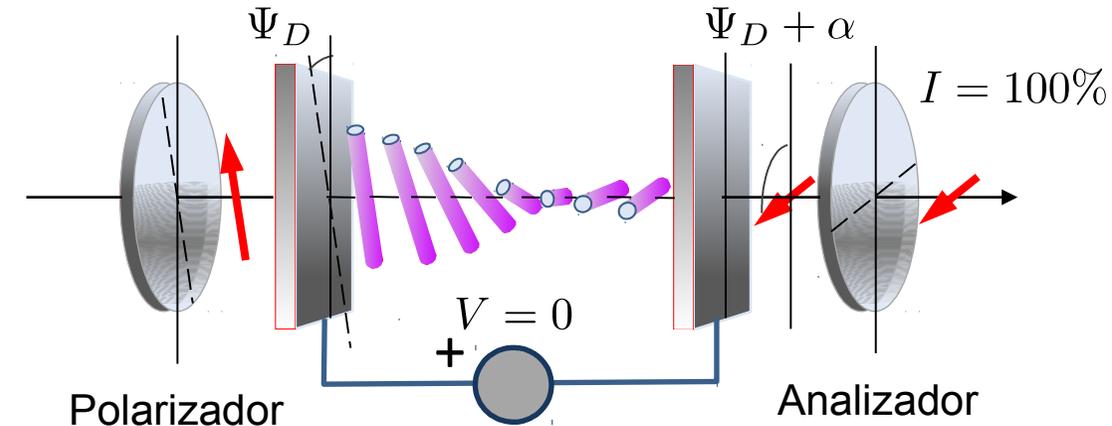
No hay reorientación molecular.  
Efecto guidor de la polarización.

$$V_c < V < V_{opt}$$

Hay reorientación molecular y cambio de índice refracción. Se mantiene la estructura helicoidal y el guiado. Modulador de fase.

$$V > V_{opt}$$

La reorientación molecular rompe la estructura helicoidal. Se modifica el índice de refracción. Modulador de intensidad y fase.



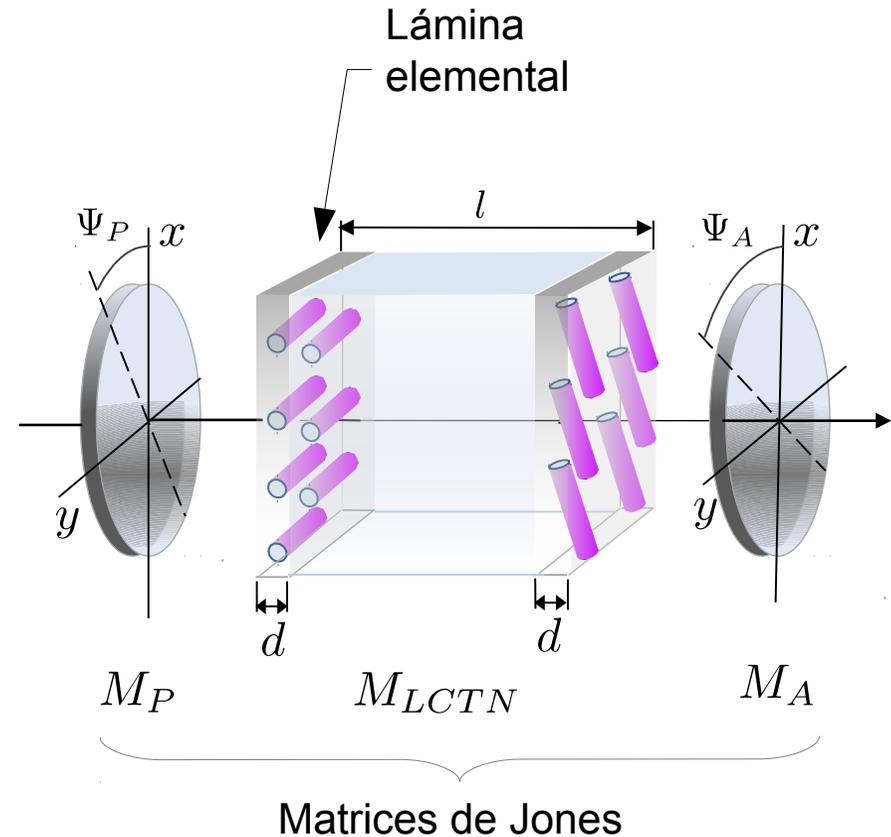
$V_c$  - Tensión umbral inicial  
 $V_{opt}$  - Tensión umbral óptica

## Modelado matemático

- 1) Dividimos el material (no homogéneo) en  $N$  láminas elementales de grosor  $d = l/N$  de modo que el medio sea homogéneo en cada una.
- 2) En cada lámina se gira el eje director de forma progresiva. El giro es  $m\alpha/N$  con  $m = 1, \dots, N$
- 3) Cada lámina y cada elemento óptico se caracteriza por su matriz de *Jones*.

$$\bar{E}_{out} = M\bar{E}_{in}$$

- 4) La matriz de *Jones* total se obtiene multiplicando las matrices de todos los elementos con las rotaciones necesarias para el ajuste de ejes.



## Modelado matemático

### □ Lámina elemental

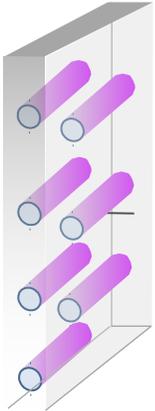


Lámina retardadora

$$W_0 = e^{-j\phi/N} \begin{bmatrix} e^{-j\beta/N} & 0 \\ 0 & e^{j\beta/N} \end{bmatrix}$$

Birrefringencia

$$\beta(\theta) = (n_e(\theta) - n_o) \frac{\pi l}{\lambda} \rightarrow \begin{cases} \beta_{m\acute{a}x} = \beta(90^\circ) = (n_e - n_o) \frac{\pi l}{\lambda} \\ \beta_{m\acute{i}n} = \beta(0^\circ) = 0 \end{cases}$$

Desfase absoluto

$$\phi(\theta) = (n_e(\theta) + n_o) \frac{\pi l}{\lambda}$$

Lámina retardadora girada

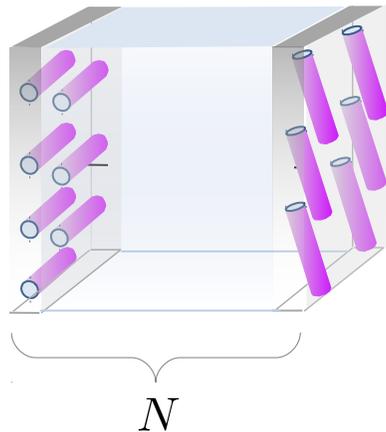
$$M_1 = R(-\alpha/N)W_0R(\alpha/N)$$

Matriz de rotación

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

## Modelado matemático

### □ Infinitas láminas elementales



$N$  láminas

$$M_N = M_N M_{N-1} \cdots M_2 M_1 = \prod_{m=N}^1 R(-m\alpha/N) W_0 R(m\alpha/N)$$

$N \rightarrow \infty$

$$M_{TNLC} = e^{-j\phi} R(-\alpha) \begin{bmatrix} \cos(\gamma) - j \frac{\beta}{\gamma} \sin(\gamma) & \frac{\alpha}{\gamma} \sin(\gamma) \\ -\frac{\alpha}{\gamma} \sin(\gamma) & \cos(\gamma) + j \frac{\beta}{\gamma} \sin(\gamma) \end{bmatrix}$$

$$\gamma(\theta) = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2(\theta)}$$

### □ Efecto del angulo director molecular

$$M_{TNLC}^D = R(-\Psi_D) M_{TNLC} R(\Psi_D)$$

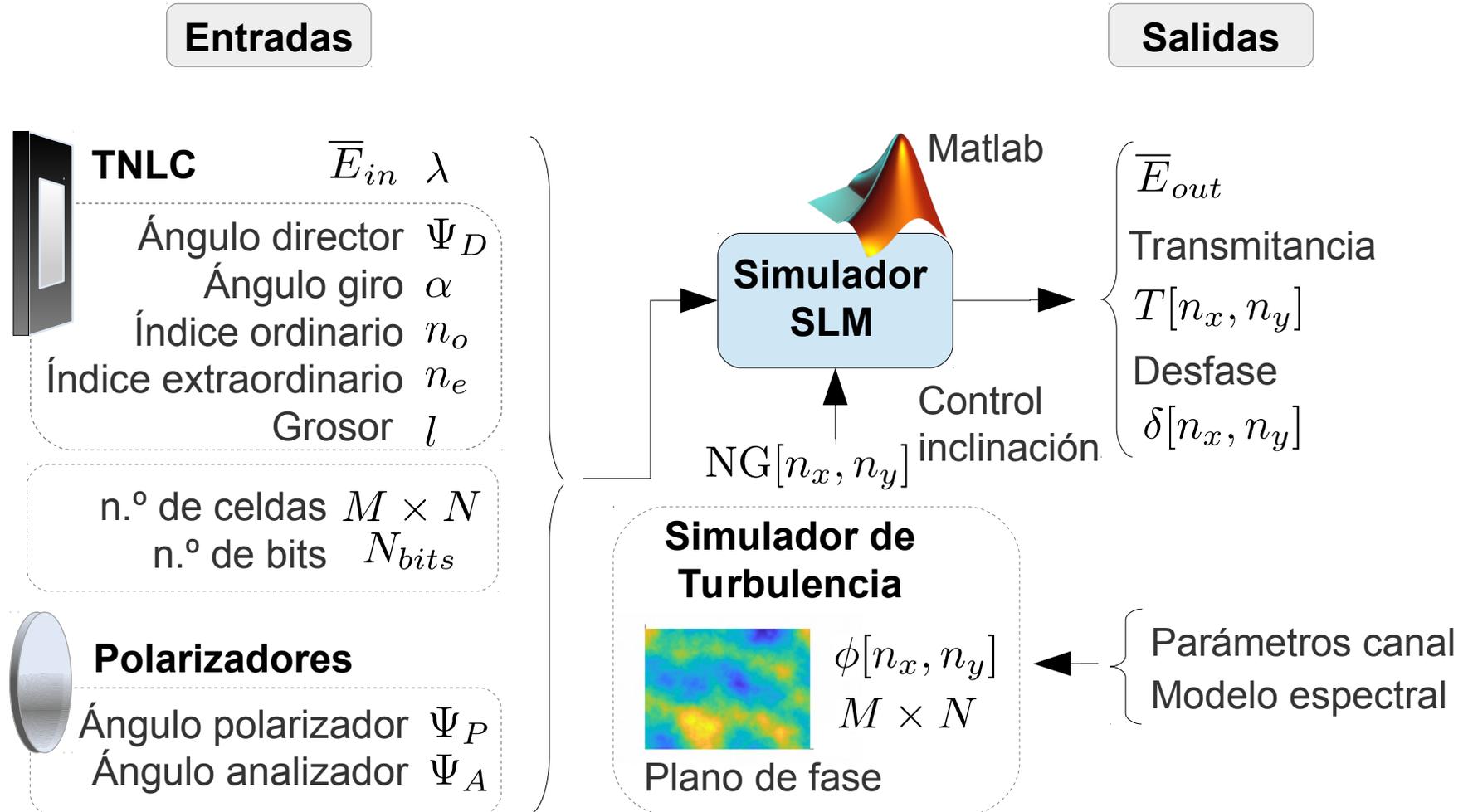
Matriz de un polarizador

### □ Efecto de los polarizadores

$$M_P(\Psi) = \begin{bmatrix} \cos^2(\Psi) & \sin(\Psi) \cos(\Psi) \\ \sin(\Psi) \cos(\Psi) & \sin^2(\Psi) \end{bmatrix}$$

$$\bar{E}_{out} = M_P(\Psi_A) R(-\Psi_D) M_{TNLC} R(\Psi_D) M_P(\Psi_P) \bar{E}_{in}$$

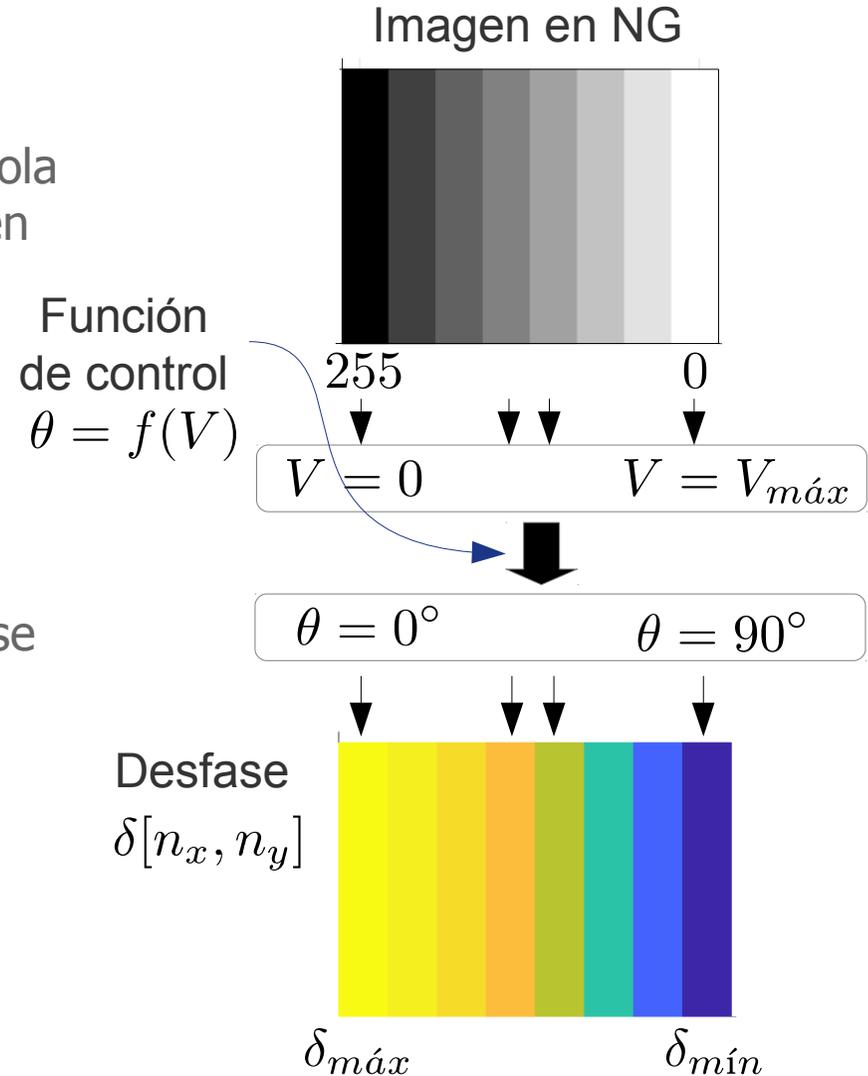
## Desarrollo del simulador



## Desarrollo del simulador

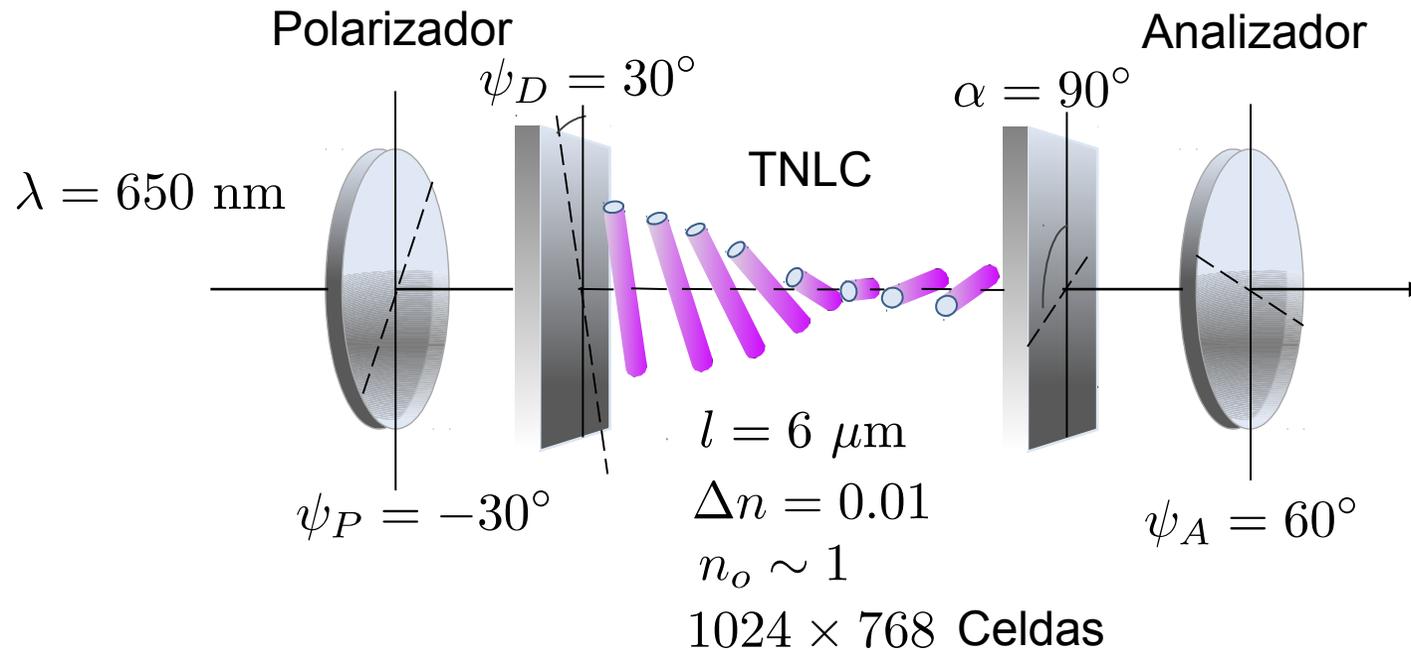
### Control de la inclinación

- La inclinación de las moléculas se controla mediante la aplicación de una imagen en niveles de gris (NG).
- Para 8 bits se tienen 256 NG.
- A medida que aumenta el ángulo de inclinación, se reduce el desfase final obtenido.
- Para este trabajo la función de control se ha supuesto lineal.
- El desfase máximo final depende de las características del TNLC (birrefringencia del cristal líquido).



## Resultados simulación

### □ Datos configuración del sistema

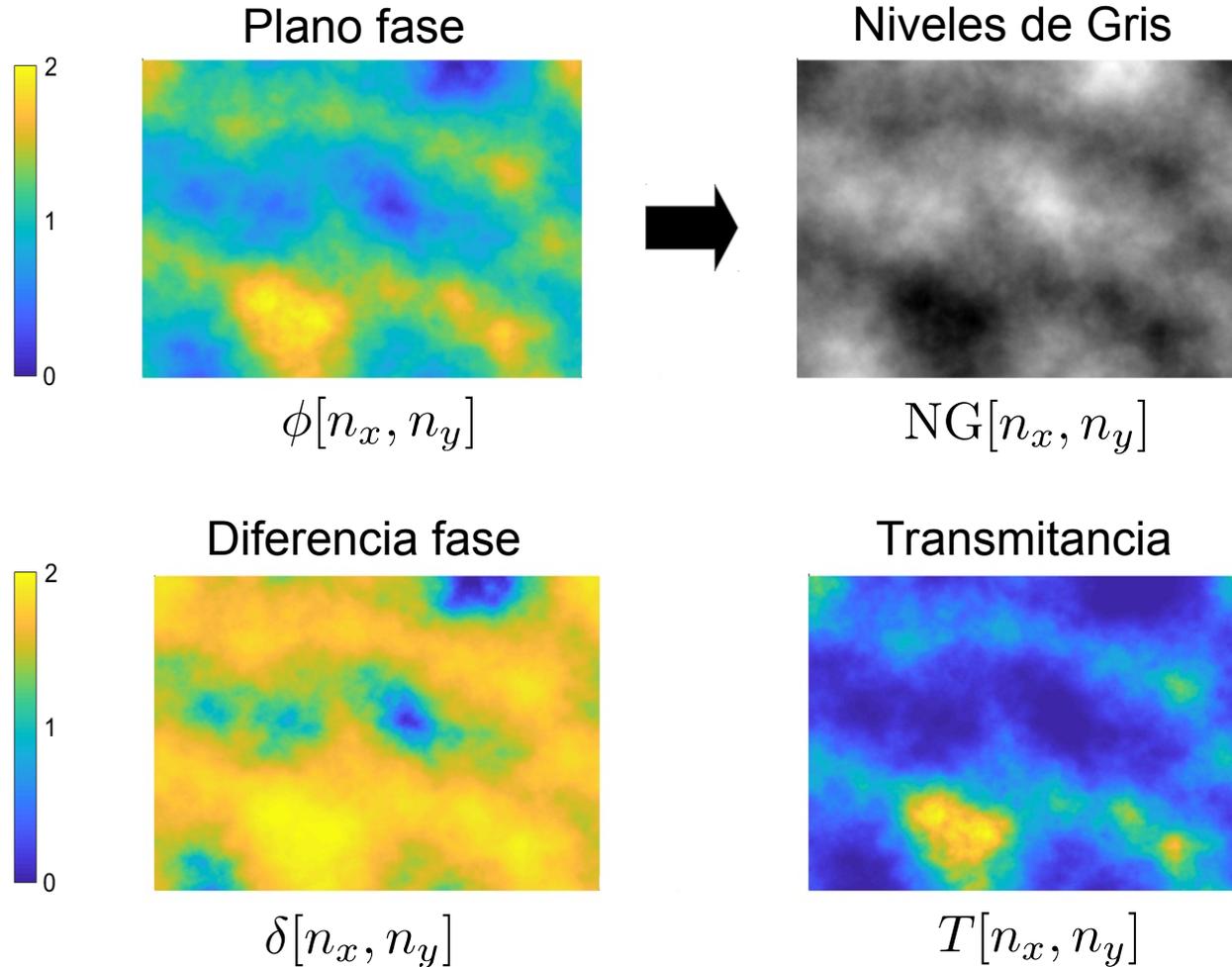


Desfase  $\delta_{m\acute{a}x} = 2.006 \text{ [rad]}$

## Resultados simulación: Plano con distorsión de fase

**Entrada**

1024 × 768



**Salida**

## Conclusiones

- ❑ Se ha presentado el desarrollo de un simulador de SLM basado en dispositivos TNLCD (1ª versión).
- ❑ El simulador puede ser empleado como emulador de canal óptico turbulento para sistemas FSOC.
- ❑ La precisión en el control del desfase total es un aspecto a mejorar.
- ❑ Otro aspecto a mejorar sería incluir el efecto de los bordes de las celdas TNLC en el modelado matemático.
- ❑ Se confía en poder usar el simulador en el estudio de la modulación del momento angular orbital (OAM).
- ❑ El simulador desarrollado constituye un bloque dentro de otro simulador general para sistemas de comunicaciones ópticas atmosféricas FSOC actualmente en desarrollo.



# Simulador de dispositivos SLM basados en cristal líquido

N.J. Gallego-Molina, A. Puerta-Notario, M. Castillo-Vázquez,  
J.M. Garrido-Balsells.