

**GUIÓN DE PRÁCTICA**  
**DETERMINACIÓN DEL FLUJO DE FOTONES EN VARIAS POSICIONES DEL REACTOR**

Para validar el modelo simulado de la interacción luz-materia del seminario asistido por ordenador, se realizará la medición del flujo de fotones que llega a la superficie del catalizador. Las mediciones se realizarán utilizando un luxómetro con una sonda que mide en el intervalo de longitud de ondas de emisión de las lámparas de los reactores simulados.

**1. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA**

- Medir el flujo de fotones que lleva a la superficie del catalizador en dos sistemas de reacción.
- Comparar el flujo de fotones simulado durante el seminario con los valores experimentales obtenidos.

**2. INTRODUCCIÓN**

El estudio de la intensidad de la luz ha adquirido gran importancia a través de los años ya que ha sido usado en diversos campos como la fotografía, el cine, meteorología, higiene y seguridad en el trabajo, agricultura, entre otras. La medición de la luz suministra información útil sobre la cantidad de iluminación que posee un lugar y los efectos que podrían producirse a largo plazo en los organismos que se encuentran bajo la influencia de ella.

Por lo que con los años se han creado dispositivos de medición que han sido utilizados para medir diferentes propiedades de la luz, tal como los luxómetros, tubos fotomultiplicadores (PMT), fotodiodos, sensores de imagen CCD, espectrómetros, entre otros, que en su mayoría están compuestos por detectores o celdas que se encuentran integradas en un circuito, que al ser expuestos a una fuente luminica, tienen la capacidad de convertir la luz en señales eléctricas analógicas o digital, por lo que cuanto mayor sea la intensidad de electricidad que se emita del sensor, mayor será el valor registrado en el dispositivo. [1]

La iluminación de una superficie determinada puede medirse con precisión por medio de un luxómetro, el cual se encarga de medir la cantidad de luz o luminosidad en tiempo real existente en un ambiente. Los resultados de la medición de luz ofrecidos por el luxómetro se calculan en unidades lux (lx),  $W \cdot m^{-2}$ ,  $\mu mol(m^{-2} \cdot s)$  y  $cd \cdot m^{-2}$ .

El luxómetro moderno funciona según el principio de una celda C.C.D. o fotovoltaica, los cuales reciben cierta cantidad de luz y la transforma en una señal eléctrica. Está compuesto por 2 partes:

- ✓ **Fotorreceptor:** Es el dispositivo que recibe la luminosidad que se quiere medir.
- ✓ **Lector:** Es el dispositivo que recibe la señal eléctrica la cual es transformada en una medida de luminosidad.



Figura 3. Reactor de vidrio

**4. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN**

**LUXOMETRO PORTATIL DELTA OHM**

El HD2302.0 es un instrumento portátil con un visualizador LCD grande ver Fig. 5, usado para medir iluminación, luminancia, PAR, irradiación (a través de regiones espectrales VIS-NIR, UVA, UVB y UVC o medición de irradiación efectiva de acuerdo con la curva de acción UV)

Capaz de almacenar el valor máximo, mínimo y promedio. Funciones: REL, HOLD y apagado automático que pueden desactivarse, grado de protección IP 67.

**SONDA RADIOMETRICA**

Cuenta con una sonda radiométrica LP471UVA, ver Fig. 6, compuesta por un módulo de reconocimiento automático SICRAM para la medida de la irradiancia, útil para realizar medidas en el campo espectral UVA 315... 400 nm, pico a 360 nm, difusor para la corrección del coseno de cuarzo. Rango de medida de 0.1-10-3W/m<sup>2</sup> 2000 W/m<sup>2</sup>

**Partes del luxómetro (Fig. 4 y 5):**

1. Entrada para sondas
2. Símbolo de batería
3. Indicadores de función
4. Línea de visualización secundaria
5. Tecla DATA: muestra el valor máximo, mínimo y el promedio de las mediciones actuales
6. Tecla CLR: Reestablece el valor máximo, promedio y mínimo de las medidas capturadas.
7. Tecla HOLD: congela la medida
8. Tecla UNIT: permite seleccionar la unidad de medida
9. Tecla REL: habilita la medida relativa
10. Tecla ON-OFF: enciende y apaga el instrumento
11. Símbolos MAX: valor máximo, MIN: valor mínimo, AVG: valor medio

Algunos luxómetros contienen un filtro de corrección de espectro, el cual evita que las diferencias de espectro falseen las medidas. Cabe resaltar que el luxómetro se puede adaptar a luminosidades débiles o fuertes. [2]

La fotocatalisis es un proceso que involucra la absorción de la luz por parte de un catalizador para llevar a cabo una reacción química de interés (reacción redox). El proceso consiste específicamente en la generación de un par electrón-hueco en las partículas de un material semiconductor, una de las condiciones que se deben cumplir la fotocatalisis es que el fotón procedente de la fuente luminica debe tener una energía igual o superior a la energía del *bandgap* del semiconductor, con el fin de promover un electrón de la banda de valencia hacia la banda de conducción generando un hueco en la banda de valencia de manera que se produzca la reacción química. [3]

**3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REACCIÓN**

Se realizarán las medidas de la intensidad de luz en dos tipos de foto-reactores:

• **Reactor de acero:**

Fotorreactor cilíndrico compuesto en su exterior por acero inoxidable y un cilindro interior de vidrio pyrex, ver Fig. 1<sup>a</sup> y Fig. 2, contiene en el centro la fuente de radiación compuesta por una lámpara Sylvania® F11W T5/BL368, emitiendo a 365 nm, 11 W, la fuente de luz se encuentra soportada en la superficie interna del tubo pyrex, en el sitio comprendido entre la pared interna de acero y la parte externa del vidrio pyrex circula la mezcla líquida en análisis. La longitud y el diámetro de la lámpara es de 22.5 y 1.7 cm respectivamente.

• **Reactor de vidrio**

Fotorreactor con camisa anular de vidrio de borosilicato, ver Fig. 1b y Fig. 3, contiene en el centro dos lámparas UVA que emiten a 365 nm (9W cada una). Las lámparas están centradas en el espacio interior. La longitud de la lámpara es de 12 cm. El cilindro exterior tiene un sistema para la entrada y salida de mezcla líquida que circula por el espacio anular.

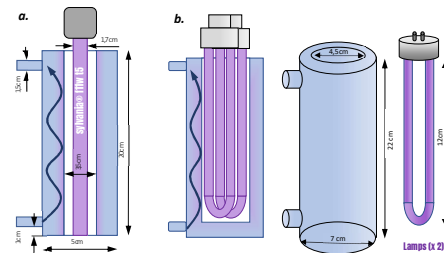


Figura 1. a. Fotorreactor anular de acero; b. Fotorreactor de vidrio.

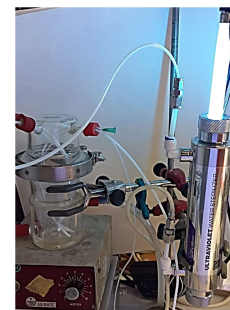


Figura 2. Reactor tubular de acero.

12. Línea de visualización principal
13. Línea para símbolos y comentarios



Figura 4. Partes del luxómetro.



Figura 5. Sondas radiométricas del luxómetro

**5. MATERIALES Y EQUIPOS**

- Luxómetro
- 2 lámparas
- 2 soportes universales
- 2 nueces dobles
- 2 abrazaderas
- Cinta métrica
- Paquímetro

**6. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

1. Medir el diámetro del reactor con el fin de saber cuál es la distancia entre la lámpara y la pared interna del reactor.
2. Medir la longitud de la lámpara y dividirla en 5 puntos equidistantes.
3. Ajustar la lámpara y el sensor del luxómetro en 2 soportes diferentes.
4. Encender el luxómetro y definir la escala de medición por medio del botón UNIT.
5. Realizar las medidas por triplicado en los 5 puntos establecidos en el paso 2.

**Recomendaciones:**

- Medir cuidadosamente sin que el detector tenga contacto directo con alguna superficie, ya que es sensible y puede dañarse.
- Las medidas deben tomarse desde el mismo ángulo y distancia a luz. Utilice correctamente los soportes de la lámpara y el sensor.



Figura 6. Ejemplo del dispositivo experimental.

## 7. RESULTADOS

Utilice la *Tabla 1* para la recogida de los datos experimentales y compare con los resultados obtenidos por el modelo desarrollado en Matlab.

*Tabla 1. Mediciones de la luz en reactor de acero*

PUNTO DE MEDICIÓN	Medición de flujo de fotones ( $W/m^2$ )		
	1	2	3
1			
2			
3			
4			
5			

## REFERENCIAS

- [1] "Conteo de eventos y estadística de fotones." Accessed: May 13, 2023. [Online]. Available: <https://stefani-lab.ar/wp-content/uploads/Conteo-de-Fotones.pdf>
- [2] J. Moreno Gil and M. Romero Minassian, "Reeae: Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07." 2010.
- [3] J. M. Aguirre-Cortés, A. I. Moral-Rodríguez, E. Bailón-García, A. David-Quiñero, A. F. Pérez-Cadenas, and F. Carrasco-Marín, "3D printing in photocatalysis: Methods and capabilities for the improved performance," *Appl Mater Today*, vol. 32, p. 101831, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.apmt.2023.101831.

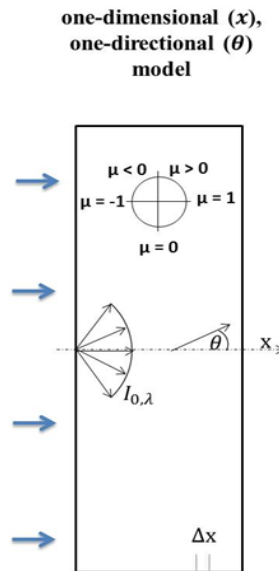
# Modelado de la interacción luz-materia

## Ecuaciones y esquemas principales

$$\frac{dI_{\lambda,\underline{\Omega}}(\underline{x})}{ds} = -\kappa_{\lambda}(\underline{x})I_{\lambda,\underline{\Omega}}(\underline{x}) - \sigma_{\lambda}(\underline{x})I_{\lambda,\underline{\Omega}}(\underline{x}) + \frac{\sigma_{\lambda}(\underline{x})}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} p(\underline{\Omega}' \rightarrow \underline{\Omega}) I_{\lambda,\underline{\Omega}'}$$

$$p(\underline{\Omega}' \rightarrow \underline{\Omega}) = \frac{1-g_{\lambda}^2}{(1+g_{\lambda}^2-2g_{\lambda}^2u_0)^{3/2}}$$

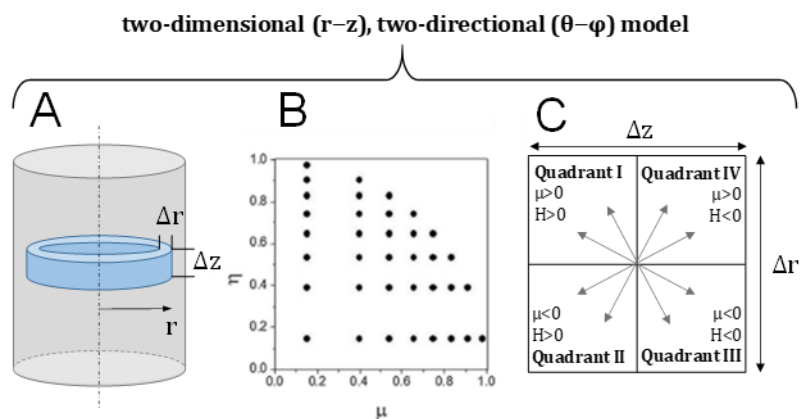
### Representación esquemática del modelo 1D-1D.



$$\sigma_{\lambda} = \beta_{\lambda} \times \omega_{\lambda}$$

$$\kappa_{\lambda} = \beta_{\lambda} - \omega_{\lambda}$$

### Representación esquemática del modelo 2D-2D



$$I_m^{i,j} = |\mu_m|(A_{i+1/2,j} - A_{i-1/2,j})D^{-1}I_m^{1\pm 1/2,j} + 2|\eta_m|B_{i,j}D^{-1}I_m^{i,j\pm 1/2} + (A_{i+1/2,j} - A_{i-1/2,j}) \cdot (v_{m+1/2} + v_{m-1/2})D^{-1}W_m^{-1}I_{m-1/2}^{i,j} + \frac{\sigma_\lambda}{4\pi} \sum_{n=1}^M I_n^{i,j} P_{nm} W_n V_{i,j} D^{-1} \quad (S5)$$

$$D = |\mu_m|(A_{i+1/2,j} - A_{i-1/2,j}) + 2|\eta_m|B_{i,j} + (A_{i+1/2,j} - A_{i-1/2,j}) \cdot (v_{m+1/2} + v_{m-1/2})W_m^{-1} + \kappa_\lambda V_{i,j} + \sigma_\lambda V_{i,j}$$

$$A_{i+1/2,j} = 2\pi r_{i+1/2} \Delta z_j$$

$$B_{i,j+1/2} = 2\pi \left( \frac{r_{i+1/2} + r_{i-1/2}}{2} \right) \Delta r_i$$

$$V_{i,j} = 2\pi \left( \frac{r_{i+1/2} + r_{i-1/2}}{2} \right) \Delta z_j \Delta r_i$$

$$v_{m+1/2} - v_{m-1/2} = -\mu_m W_m$$

$$I_m^{i,j} = \frac{(I_m^{i-1/2,j} + I_m^{i+1/2,j})}{2}$$

$$I_m^{i,j} = \frac{(I_m^{i,j-1/2} + I_m^{i,j+1/2})}{2}$$

$$I_m^{i,j} = \frac{(I_{m-1/2}^{i,j} + I_{m+1/2}^{i,j})}{2}$$


### Determinación de la Velocidad Volumétrica de Absorción de Fotones (LVRPA)

$$e^{a,v} = \int_\lambda \kappa_\lambda(\underline{x}) \cdot \int_{\Omega=4\pi} I_{\lambda,\underline{\Omega}}(\underline{x}) d\Omega d\lambda$$

#### Consultar detalles en:

M.J. Muñoz-Batista, M.M. Ballari, A. Kubacka, O.M. Alfano, M. Fernández-García. Braiding kinetics and spectroscopy in photo-catalysis: the spectro-kinetic approach. Chem. Soc. Rev., 48 (2019), pp. 637-682, 10.1039/c8cs00108a.

O. Fontelles-Carceller, M.J. Muñoz-Batista, J.C. Conesa, A. Kubacka, M. Fernández-García. H2 photo-production from methanol, ethanol and 2-propanol: Pt-(Nb)TiO<sub>2</sub> performance under UV and visible light Mol. Catal., 446 (2018), pp. 88-97, 10.1016/j.mcat.2017.12.023.



# PLANTILLAS PARA EL MODELADO DE FOTOREACTORES 1D Y 2D

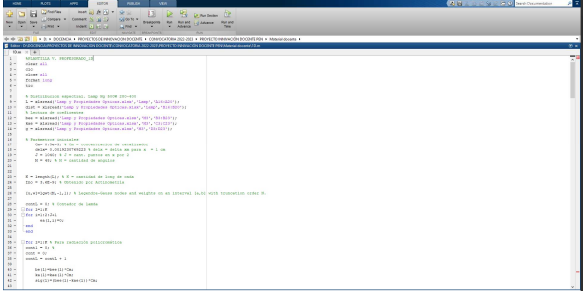
PROYECTO DE INNOVACIÓN DOCENTE

Diseño de un Seminario/Laboratorio asistido por ordenador para el estudio de procesos de fotodescontaminación de efluentes gaseosos en MATLAB®

1

1

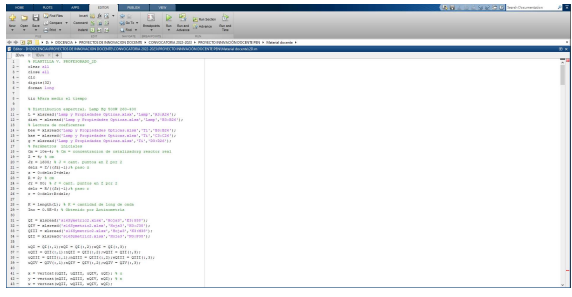
## 1. Plantilla V. Profesorado. Modelo 1D



2


2

## 1. Plantilla V. Profesorado. Modelo 1D



3

3



## Legendre-Gauss Quadrature Weights and Nodes

PROYECTO DE INNOVACIÓN DOCENTE

Diseño de un Seminario/Laboratorio asistido por ordenador para el estudio de procesos de fotodescontaminación de efluentes gaseosos en MATLAB®

4

4

```

function [N,w]=lgwt(N,a,b)
% lgwt.m
%
% This script is for computing definite integrals using Legendre-Gauss
% quadrature. Computes the Legendre-Gauss nodes and weights on an interval
% [a,b] with truncation order N
%
% Suppose you have a continuous function f(x) which is defined on [a,b]
% which you can evaluate at any x in [a,b]. Simply evaluate it at all of
% the values contained in the x vector to obtain a vector f. Then compute
% the definite integral using sum(f.*w)/2.
%
% Written by Greg von Winckel - 02/23/2004
N=N-1; N2=N^2;
w= linspace(-1,1,N1)';

% Initial guess
[x]=linspace(1+(0.05)*pi/(2*N2),1+(0.27/N2)*pi,pi*w*N2);
% Legendre-Gauss Vandermonde Matrix
L= zeros(N1,N1);
% Derivative of LGM
Lp= zeros(N1,N1);
% Compute the zeros of the N+1 Legendre Polynomial
% using the recursion relation and the Newton-Raphson method
w=0;
% Iterate until new points are uniformly within epsilon of old points
while max(abs(x-y))>eps
    L(i,1)=x;
    Lp(i,1)=0;
    L(i,2)=y;
    Lp(i,2)=y;
    for n=2:N1
        L(i,n)=1+(2*n-1)*y.*L(i,n-1)-(n-1)*L(i,n-2) / (1-y.^2);
        Lp(i,n)=L(i,n-1)*Lp(i,n-1) / (1-y.^2);
    end
    y=y-y.*Lp(i,N1)/Lp(i,N1);
end
% Linear map from [-1,1] to [a,b]
x=(a+(1-y)*b+(1+y)*a)/2;
% Compute the weights
w=(b-a)/((1-y.^2)^(1/2))*Lp(i,2)/L(i,N1)^2;

```

5

5

6

6