

Afinidad

REVISTA DE QUIMICA TEORICA Y APLICADA

EDITADA POR LA ASOCIACION DE QUIMICOS DEL INSTITUTO QUIMICO DE SARRIA

(5)

*Descomposición fotoquímica de soluciones
acuosas de dodecibencenosulfonato sódico en un
fotorreactor anular continuo de mezcla perfecta*

por J. Costa López, S. Esplugas Vidal y A. Ibarz Ribas
Departamento de Química Técnica. Facultad de Química de la Universidad de Barcelona

Descomposición fotoquímica de soluciones acuosas de dodecibencenosulfonato sódico en un fotorreactor anular continuo de mezcla perfecta

por J. Costa López, S. Esplugas Vidal y A. Ibarz Ribas
Departamento de Química Técnica. Facultad de Química de la Universidad de Barcelona

Photochemical decomposition of aqueous solutions of sodium dodecylbenzenesulphonate in a perfect mixing anular continuous photoreactor, by J. Costa López, S. Esplugas Vidal and A. Ibarz Ribas.

Descomposició fotoquímica de dissolucions de dodecibenzesulfonat sòdic en un fotoreactor anular continu de mescla perfecta, per J. Costa López, S. Esplugas Vidal i A. Ibarz Ribas.

Recibido: 11-X-1978

RESUMEN

La fotodescomposición de dodecibencenosulfonato sódico (DBS) se ha estudiado como un proceso de purificación del agua. Soluciones acuosas de DBS han sido irradiadas en un fotorreactor anular de mezcla perfecta, aplicándose el modelo de radiación cilíndrico esférico extenso^{1,2}.

SUMMARY

The photodecomposition of sodium dodecylbenzenesulphonate (DBS) has been studied as a purification process of water. Aqueous solutions of DBS have been irradiated in a perfect mixing anular reactor, applying the model of an extended spherical cylindrical radiation^{1,2}.

RESUM

La fotodescomposició de dodecibenzesulfonat sòdic (DBS) s'ha estudiat com un procés de purificació de l'aigua. Solucions aquoses de DBS han estat irradiades en un fotoreactor anular de mescla perfecta; s'ha aplicat el model de radiació cilíndric esfèric extens^{1,2}.

INTRODUCCION

Las aguas procedentes de la etapa secundaria, en los procesos de depuración biológica de agua contaminada, contienen productos orgánicos que son refractarios a este tratamiento biológico. Le sigue a esta etapa una terciaria de desinfección, que por regla general es una cloración, a pesar de que las aguas tratadas por este método resultan tóxicas para el ecosistema acuático, debido al cloro residual y compuestos orgánicos clorados que aparecen durante la cloración. Por tanto se han estudiado otros métodos de desinfección para suplir la cloración. Uno de estos métodos es la irradiación por luz ultravioleta, de conocido efecto bactericida³.

Con respecto a los compuestos orgánicos refractarios puede utilizarse la radiación ultravioleta sola o bien junto con peróxido de hidrógeno u ozono^{4,5}. Los compuestos orgánicos que resultan eliminados por radiación ultravioleta son múltiples, tales como pesticidas^{6,7}, ácido fórmico⁸, etc.

Por lo cual la fotooxidación puede considerarse como un buen método en la etapa terciaria de tratamiento de aguas residuales.

APARATO

La instalación en la que se han efectuado los experimentos ha sido descrita en un trabajo anterior⁸, en la que el fotorreactor es anular continuo de mezcla perfecta.

El fotorreactor está esquematizado en la figura 1 y como puede apreciarse consta de tres partes: lámpara, camisa y cámara de reacción.

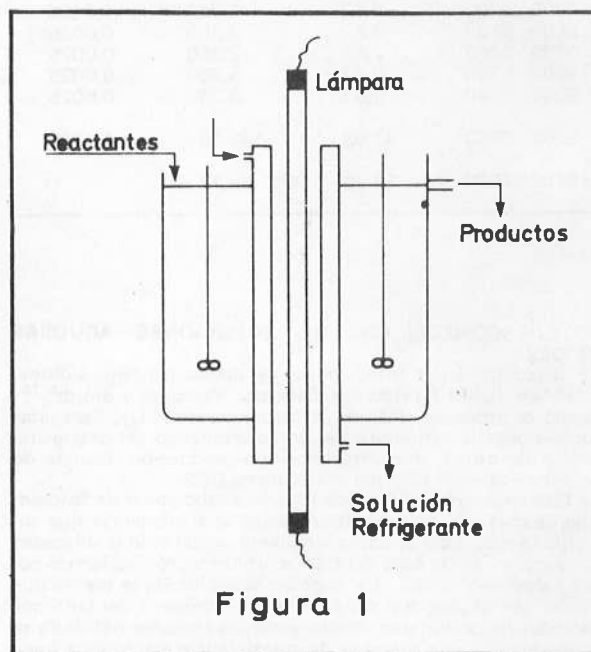


Figura 1

La lámpara es una UVIARC UA-3 de la General Electric. Se trata de una lámpara productora de luz ultravioleta de presión media con una potencia nominal de 360 vatios. La tabla 1 da sus características energéticas indicando su potencia, en cada intervalo de longitudes de onda, en vatios y en einsteins/seg.

La camisa es un cilindro de cuarzo con sección anular. El cilindro interno tiene 15 mm. de radio interior y 17 mm. de exterior. En el cilindro externo el radio interior es de 27,5 mm. y el exterior de 30,2 mm; esta última medida corresponde al radio interno de la cámara de reacción. Por el interior de la camisa se hace circular la solución refrigerante. Entre la lámpara y la camisa se hace pasar aire para refrigerar la lámpara.

La cámara de reacción es de forma anular, construida en vidrio Pirex, cuya pared interna es la exterior de la camisa y la externa un cilindro de 96,8 mm. de altura y de radio interno 63,3 mm. y externo 65,1 mm. Contiene dos agitadores para lograr la mezcla perfecta.

TABLA 1

| $\Delta\lambda$ Å | $W_{\Delta\lambda}$ vatios | $W_{\Delta\lambda}$ einsteins/seg. | $W_{\Delta\lambda}/W_{tot.}$ |
|----------------------|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| 2200 | 0,00 | 0,00 | 0,0000 |
| 2200 - 2300 | 0,72 | 1,35 | 0,0102 |
| 2300 - 2400 | 0,91 | 1,79 | 0,0135 |
| 2400 - 2500 | 1,51 | 3,09 | 0,0234 |
| 2500 - 2600 | 3,95 | 8,38 | 0,0632 |
| 2600 - 2700 | 2,94 | 6,52 | 0,0492 |
| 2700 - 2800 | 0,33 | 0,76 | 0,0058 |
| 2800 - 2900 | 1,84 | 4,38 | 0,0331 |
| 2900 - 3000 | 1,76 | 4,37 | 0,0329 |
| 3000 - 3100 | 3,26 | 8,24 | 0,0622 |
| 3100 - 3200 | 6,86 | 17,96 | 0,1355 |
| 3200 - 3300 | 0,32 | 0,87 | 0,0065 |
| 3300 - 3400 | 0,65 | 1,82 | 0,0137 |
| 3400 - 3500 | 0,17 | 0,49 | 0,0036 |
| 3500 - 3600 | 0,30 | 0,89 | 0,0067 |
| 3600 - 3700 | 9,74 | 29,76 | 0,2245 |
| 3700 - 3800 | 0,30 | 0,94 | 0,0071 |
| 3800 - 3900 | 0,75 | 2,46 | 0,0092 |
| 3900 - 4000 | 0,75 | 2,46 | 0,0093 |
| 4000 - 4100 | 3,50 | 11,84 | 0,0894 |
| 4100 - 4200 | 0,31 | 1,09 | 0,0041 |
| 4200 - 4300 | 0,31 | 1,09 | 0,0041 |
| 4300 - 4400 | 6,09 | 22,194 | 0,1674 |
| 4400 - 4500 | 0,82 | 3,360 | 0,0026 |
| 4500 - 4600 | 0,82 | 3,360 | 0,0026 |
| 4600 - 4700 | 0,82 | 3,360 | 0,0026 |
| 4700 - 4800 | 0,82 | 3,360 | 0,0026 |
| 4800 - 4900 | 0,82 | 3,360 | 0,0026 |
| 4900 - 5000 | 0,82 | 3,360 | 0,0026 |
| 5000 - 5100 | 0,82 | 3,360 | 0,0026 |
| 5100 - 5200 | 0,82 | 3,360 | 0,0026 |
| 5200 - 5300 | 0,82 | 3,360 | 0,0026 |
| 5300 - 5400 | 0,82 | 3,360 | 0,0026 |
| 2200 - 5400 | 47,03 | 132,56 | 1,0000 |
| 5400 - 7600 | 14,38 | 68,78 | |

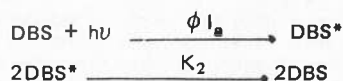
FOTODESCOMPOSICION DE SOLUCIONES ACUOSAS DE DBS

La descomposición fotoquímica de dodecibenceno sulfonato sódico (DBS) ha sido estudiada por Matsuura y Smith^{9,10}, siendo el producto final de la fotooxidación CO₂. Para altas conversiones la estructura del anillo aromático del detergente resulta destruída, encontrándose una producción máxima de siete moléculas de CO₂ por molécula de DBS.

La fotodescomposición puede llevarse a cabo con o sin fotosensibilizadores. Un fotosensibilizador es una substancia que aumenta la absorción de energía radiante, acelerando la velocidad de reacción. En el caso del DBS se utiliza hidróxido férrico como fotosensibilizador. La reacción sensibilizada se piensa que ocurre por abstracción de átomos de hidrógeno del DBS por radicales hidroxilo; presumiblemente los radicales hidroxilo se producen por una reacción de transferencia electrónica involucrando iones férricos activados por luz, el ión férrico es reducido a ferroso formándose el radical hidroxilo.

En el presente artículo se estudia el caso de fotodescomposición no sensibilizada, que según Matsuura y Smith⁹ transcurre mediante el siguiente mecanismo:

- Etapas de activación y desactivación:



donde la velocidad de la etapa de activación es proporcional a la intensidad de luz absorbida.

- La descomposición de DBS se supone que ocurre muy lentamente por un proceso de primer orden:



Las velocidades de generación serán:

$$\rho (DBS^*) = \phi \cdot I_a - K_2 (DBS^*)^2$$

$$\rho (DBS) = -K_3 (DBS^*)$$

donde K₂ y K₃ son las constantes cinéticas de las correspondientes reacciones.

Aplicando la hipótesis de estado pseudoestacionario para los intermedios de reacción:

$$\rho (DBS^*) = 0$$

queda

$$(DBS^*) = \left[\frac{\phi \cdot I_a}{K_2} \right]^{1/2}$$

siendo I_a el valor de la intensidad absorbida:

$$I_a = \sum_{\lambda} \epsilon_{\lambda} \cdot I_{\lambda} (DBS) \tag{1}$$

en la que I_λ y ε_λ son la intensidad de radiación y el coeficiente de extinción molar del DBS, correspondientes a la longitud de onda λ.

Con lo cual:

$$\rho (DBS) = -K_3 \left(\frac{\phi}{K_2} \right)^{1/2} \cdot \left(\sum_{\lambda} \epsilon_{\lambda} \cdot I_{\lambda} \right)^{1/2} \cdot (DBS)^{1/2} \tag{2}$$

Por tanto resulta una ecuación cinética del tipo:

$$\rho (DBS) = -K I^{1/2} C^{1/2} \tag{3}$$

es decir, de orden 0,5 respecto a la intensidad de radiación y a la concentración de DBS.

ACTINOMETRIA

Una actinometría es una reacción fotoquímica que sirve para calibrar la instalación experimental en la que se va a trabajar. Este calibrado consiste en la determinación de la intensidad de radiación en la pared interna del reactor, o lo que es lo mismo la intensidad que incide en el reactor.

La descomposición fotoquímica de ácido oxálico en presencia de sales de uranilo^{11,12,13} ha sido la reacción actinométrica empleada para este calibrado. En el transcurso de la fotodescomposición de ácido oxálico no se consume sal de uranilo con lo que la cinética global es de primer orden con respecto a la intensidad de radiación absorbida y sólo depende de ésta, es decir:

$$\rho (C_2O_4H_2) = - \sum_{i=1}^n \phi_{\lambda_i} \cdot \mu_{\lambda_i} \cdot I_{\lambda_i} \tag{4}$$

La tabla 2 muestra los valores de los coeficientes de extinción molar ε_λ y los rendimientos cuánticos φ_λ para distintas longitudes de onda.

Introduciendo la ecuación cinética (ecuación 4) en el balance de materias para el fotorreactor anular de mezcla perfecta, se obtiene para régimen estacionario:

$$qC_0 - \int_V \sum_{i=1}^n \phi_{\lambda_i} \cdot \mu_{\lambda_i} \cdot I_{\lambda_i} \cdot dV = qC \tag{5}$$

Si se define ψ = C/C₀ como una medida de la conversión y

$$\theta_r = \frac{V}{q} \text{ tiempo de residencia.}$$

TABLA 2

| λ Å | $\epsilon_{\lambda} \cdot 10^{-5}$ cm ² /gr.mol | ϕ_{λ} gr.mol/einstein |
|----------------|---|-------------------------------------|
| 2250 | 167,10 | 0,56 |
| 2350 | 126,76 | 0,58 |
| 2450 | 98,39 | 0,59 |
| 2550 | 65,00 | 0,60 |
| 2650 | 56,61 | 0,59 |
| 2750 | 41,01 | 0,58 |
| 2850 | 29,03 | 0,58 |
| 2950 | 19,63 | 0,57 |
| 3050 | 13,27 | 0,56 |
| 3150 | 9,61 | 0,56 |
| 3250 | 5,79 | 0,54 |
| 3350 | 3,65 | 0,52 |
| 3450 | 1,67 | 0,51 |
| 3550 | 0,81 | 0,50 |
| 3650 | 0,41 | 0,49 |
| 3750 | 0,37 | 0,49 |
| 3850 | 0,37 | 0,52 |
| 3950 | 0,37 | 0,54 |
| 4050 | 0,37 | 0,56 |
| 4150 | 0,35 | 0,57 |
| 4250 | 0,340 | 0,58 |
| 4350 | 0,325 | 0,58 |
| 4450 | 0,258 | 0,57 |
| 4550 | 0,187 | 0,54 |
| 4650 | 0,110 | 0,47 |
| 4750 | 0,055 | 0,37 |
| 4850 | 0,029 | 0,29 |
| 4950 | 0,016 | 0,22 |
| 5050 | 0,009 | 0,18 |
| 5150 | 0,006 | 0,12 |
| 5250 | 0,004 | 0,08 |
| 5350 | 0,003 | 0,02 |

Operando se obtiene:

$$1 - \psi = \frac{\theta_r}{C_0 \cdot V} \int_V \sum_{i=1}^n \phi_{\lambda_i} \cdot \mu_{\lambda_i} \cdot I_{\lambda_i} \cdot dV \quad (6)$$

Es conveniente adoptar la hipótesis de que la distribución de energía radiante según las distintas longitudes de onda por unidad de volumen de la lámpara ($S_{V,\lambda}$) es análoga a la de la energía luminosa emitida por la lámpara por unidad de tiempo (W_{λ}), siendo ésta un dato del fabricante de la lámpara:

$$\frac{S_{V,\lambda}}{S_V} = \frac{W_{\lambda}}{W}$$

siendo

$$S_V = \sum_{\lambda} S_{V,\lambda} \quad y \quad W = \sum_{\lambda} W_{\lambda}$$

Si se adopta el modelo de emisión esférica² el valor de I_{λ} intensidad de radiación en un punto del fotorreactor de coordenadas (r,z) se deduce aplicando un balance de radiación en dicho punto. Definiendo un parámetro (σ_{λ}) que es una función muy compleja que depende de la absorbancia, coordenadas del punto y geometría del sistema reactor-lámpara^{1,2}, se tiene:

$$\sigma_{\lambda}(r,z) = \frac{I_{\lambda}}{U_{\lambda}} \quad (7)$$

en la que

$$U_{\lambda} = \frac{S_{V,\lambda} \cdot r_L}{2\pi} \quad y \quad U = \sum_{\lambda} U_{\lambda}$$

siendo $S_{V,\lambda}$ la energía emitida por la lámpara por unidad de volumen a la longitud de onda λ y r_L el radio de la lámpara. Por tanto la ecuación 5 toma la forma:

$$\frac{C_0 - C}{C_0} = \frac{\theta_r \cdot U}{C_0 \cdot V} \sum_{i=1}^n \frac{W_{\lambda_i}}{W} \cdot \phi_{\lambda_i} \cdot \mu_{\lambda_i} \int_V \sigma_{\lambda_i} \cdot dV \quad (9)$$

De esta ecuación se despeja U y a partir de los datos de las tablas 1 y 2 se pueden determinar los otros términos a excepción de $(1 - \psi)/\theta_r$, que se calcula experimentalmente. Para calcular el valor de $(1 - \psi)/\theta_r$ se han hecho una serie de experimentos (Tabla 3) usando soluciones de ácido oxálico 0,050 molar y nitrato de uranilo 0,001 molar.

TABLA 3

| $(1 - \psi) \cdot 10^2$ | θ_r seg. |
|-------------------------|--------------------|
| 6,09 | 156,2 |
| 5,92 | 163,1 |
| 6,01 | 167,5 |
| 6,46 | 170,1 |
| 7,18 | 192,5 |
| 8,11 | 216,8 |
| 9,35 | 255,0 |
| 11,37 | 286,7 |
| 12,16 | 326,1 |

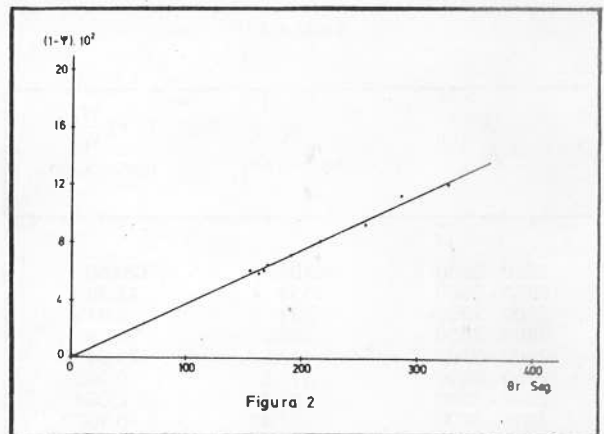


Figura 2

Con los datos experimentales se representa gráficamente $(1 - \psi) \cdot 10^2$ frente a θ_r (Figura 2), ajustando a una recta por el método de los mínimos cuadrados. Se ha obtenido la ecuación:

$$1 - \psi = 3,79 \cdot 10^{-4} \theta_r - 4,95 \cdot 10^{-4} \quad (10)$$

Con los datos geométricos del fotorreactor, los valores de la absorbancia y el rendimiento cuántico (Tabla 2) y la distribución energética de la lámpara (Tabla 1), mediante un programa por ordenador¹ se obtiene el término sumatorio de la ecuación 9.

El valor de U será:

$$U = \frac{(C_0 - C)/C_0}{\theta_r} \cdot \frac{V \cdot C_0}{\sum \frac{W_{\lambda_i}}{W} \cdot \phi_{\lambda_i} \cdot \mu_{\lambda_i} \int_V \sigma_{\lambda_i} \cdot dV}$$

$$U = 3,790 \cdot 10^{-4} \cdot 1,196 \cdot 10^{-3} = 4,533 \cdot 10^{-4} \frac{\text{einstein}}{\text{cm}^2 \cdot \text{seg}}$$

CINETICA DE LA FOTODESCOMPOSICION DE DBS

Del balance de DBS en el fotoreactor se obtiene:

$$\frac{C_0 - C}{\theta_r} = K \cdot C^{1/2} \cdot \frac{1}{V} \int_V \sum_{\lambda} (\epsilon_{\lambda} \cdot I_{\lambda})^{1/2} \cdot dV \quad (11)$$

Mediante un programa de cálculo¹ se puede evaluar el valor de la integral de esta ecuación.

$$I_n = \frac{1}{V} \int_V \sum_{\lambda} (\epsilon_{\lambda} \cdot I_{\lambda})^{1/2} \cdot dV =$$

$$I_n = \frac{1}{V} \int_V \sum_{\lambda} \left(\epsilon_{\lambda} \cdot \frac{W_{\lambda}}{W} \cdot U \cdot \sigma_{\lambda} \right)^{1/2} \cdot dV \quad (12)$$

con lo que la ecuación 11 toma la forma:

$$\frac{C_0 - C}{\theta_r} = K \cdot C^{1/2} \cdot I_n$$

o lo que es lo mismo:

$$\frac{(C_0 - C) \cdot C^{1/2}}{\theta_r \cdot I_n} = K \cdot C \quad (13)$$

ecuación de una recta de pendiente K.

TABLA 4

| $\Delta\lambda$ Å | ϵ_{λ} l/gr.mol.cm. | $\frac{W_{\lambda}}{\epsilon_{\lambda} W}$ l/gr.mol.cm. |
|----------------------|--------------------------------------|--|
| 2200 - 2300 | 12400 | 126,50 |
| 2300 - 2400 | 3131 | 42,26 |
| 2400 - 2500 | 381 | 6,915 |
| 2500 - 2600 | 463,5 | 29,29 |
| 2600 - 2700 | 413,5 | 20,34 |
| 2700 - 2800 | 170,5 | 0,988 |
| 2800 - 2900 | 32,75 | 1,084 |
| 2900 - 3000 | 21,45 | 0,7057 |
| 3000 - 3100 | 15,1 | 0,9392 |
| 3100 - 3200 | 15,1 | 2,046 |
| 3200 - 3300 | 6,7 | 0,04355 |
| 3300 - 3400 | 6,7 | 0,09179 |

TABLA 5

| $\Delta\lambda$ Å | ϵ_{λ} l/gr.mol.cm. | $\frac{W_{\lambda}}{\epsilon_{\lambda} W} \cdot U \cdot 10^4$ einstein/gr.mol.seg. |
|----------------------|--------------------------------------|---|
| 2200 - 2300 | 12400 | 573,475 |
| 2300 - 2400 | 3131 | 191,582 |
| 2400 - 2800 | 357,1 | 260,821 |
| 2800 - 3200 | 21,1 | 21,647 |
| 3200 - 3400 | 6,7 | 0,613 |

El espectro de absorción de DBS (Tabla 4) da el coeficiente de absorbancia molar ϵ_{λ} ; a partir de esta tabla junto con los datos de distribución energética de la lámpara (Tabla 1) y del valor U, obtenido por actinometría, se construye la Tabla 5, y de ésta mediante un programa por ordenador^{1,2} se calculan los valores de I_n , que para el rango de concentraciones de DBS utilizadas en la parte experimental se ajustan, por el método de los mínimos cuadrados, a la ecuación:

$$I_n = 5,98 \cdot 10^{-7} \cdot C^{-0,249}$$

con un coeficiente de regresión de 0,999.

Se han realizado experimentos a distintas concentraciones, de los resultados obtenidos y de la Tabla 6 se calculan los valores de $(C_0 - C) \cdot C^{1/2} / (\theta_r \cdot I_n)$. Estos valores se representan gráficamente frente a la concentración de salida y se ajustan a una recta por el método de los mínimos cuadrados (Figura 3), obteniéndose un coeficiente de regresión de 0,982, una pendiente de $3,031 \cdot 10^{-2}$ y ordenada en el origen $-11,035 \cdot 10^{-9}$, es decir una ecuación del tipo:

$$\frac{(C_0 - C) \cdot C^{1/2}}{\theta_r \cdot I_n} = 3,031 \cdot 10^{-2} \cdot C - 11,035 \cdot 10^{-9} \quad (14)$$

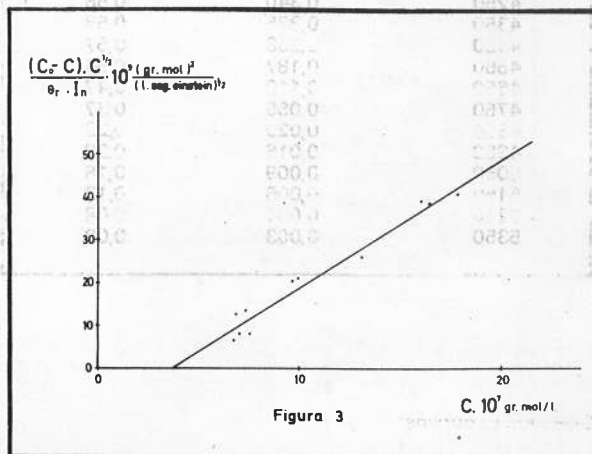


Figura 3

Comparando las ecuaciones 13 y 14 resulta:

$$K = 3,031 \cdot 10^{-2} \text{ gr.mol/(einstein} \cdot \text{l} \cdot \text{seg.)}^{1/2}$$

que es la constante global de la fotodescomposición completa.

Según la ecuación 13 la recta debería pasar por el origen, sin embargo puede observarse que no ocurre así, sino que tiene una ordenada en el origen, que podría ser debida a que se ha partido de DBS obtenido por neutralización con hidróxido sódico del ácido dodecibenceno sulfónico de 95% de pureza y que contenía otros ácidos tensioactivos, pudiendo ocurrir que la cinética de fotodescomposición de las sales de estos últimos ácidos no sea la misma que la del DBS. Por otra parte puede comprobarse que este valor es pequeño y muy bien podría desprejiciarse.

CONCLUSIONES

— Se han determinado los valores de la intensidad de radiación en la pared del reactor, siendo el valor máximo de la misma:

$$(I_w)_{\max.} = 4,5334 \cdot 10^{-7} \text{ einsteins/(cm}^2 \cdot \text{seg.)}$$

en la zona media de la pared interna del fotoreactor.

— Se ha determinado la ecuación cinética para la fotodescomposición de soluciones acuosas de dodecibencenosulfonato sódico, que para el intervalo de concentraciones utilizadas resultó ser:

$$\rho = -3,031 \cdot 10^{-2} : I_n \cdot C^{1/2} - 11,035 \cdot 10^{-9} : I_n / C^{1/2}$$

— Para el cálculo de I_n se ha encontrado la ecuación:

$$I_n = 5,98 \cdot 10^{-7} \cdot C^{-0,249}$$

en función de la concentración en el intervalo de concentraciones utilizadas, que supone un ahorro de tiempo, dando resultados satisfactorios con un error menor de 0,5%.

NOMENCLATURA

| | |
|--------------------|---|
| C | =concentración de una especie química cuando es la única considerada. |
| C_0 | =concentración de una especie química en la entrada del reactor cuando es la única considerada. |
| h | =constante de Planck. |
| I_n | =intensidad de radiación absorbida. |
| I_λ | =intensidad de radiación correspondiente a la longitud de onda λ . |
| K | =constante de velocidad de reacción. |
| q | =caudal de entrada al reactor. |
| r | =coordenada cilíndrica radial. |
| r _l | =radio de la lámpara. |
| $S_{V,\lambda}$ | =energía emitida por unidad de volumen de la lámpara correspondiente a la longitud de onda λ . |
| U_λ | =parámetro adimensional; véase ecuación 8. |
| V | =volumen del reactor. |
| W_λ | =energía luminosa emitida por la lámpara por unidad de tiempo correspondiente a la longitud de onda λ . |
| z | =coordenada cilíndrica axial. |
| ϵ_λ | =coeficiente de extinción molar correspondiente a la longitud de onda λ . |
| θ_r | =tiempo de residencia. |
| λ_r | =longitud de onda. |
| μ_λ | =absorbancia correspondiente a la longitud de onda λ . |
| ν | =frecuencia. |
| ρ_i | =velocidad de reacción referida a la especie i. |

| | |
|----------------|---|
| ρ_λ | =intensidad de radiación adimensional correspondiente a la longitud de onda λ . |
| ϕ_λ | =rendimiento cuántico correspondiente a la longitud de onda λ . |
| ψ | =conversión adimensional. |

BIBLIOGRAFIA

1. Esplugas, S.: "Contribución al estudio de los fotorreactores de mezcla perfecta". Tesis, Universidad de Barcelona (1975).
2. Esplugas, S. y Costa, J.: "El fotorreactor anular continuo de mezcla perfecta". Ingeniería Química N° 100, Julio 1977.
3. Oliver, B.G. y Gosgrove, E.G.: Canadian J. Chem. Engng. 53, 170-174 (1975).
4. Koubek, E.: Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev. 14, (3), 348 (1975).
5. Prengle, H.W.: Hydrocarbon Process. 54, 10, 82 (1975).
6. Crosby, D.G. y Wong, A.S.: J. Agr. Food Chem. 21, 1049 (1973).
7. Boval, B. y Smith, J.M.: Chem. Engng. Science 28,1661 (1973).
8. Costa, J. y Esplugas, S.: Ingeniería Química N° 101 (1977).
9. Matsuura, T. y Smith, J.M.: Ind. Eng. Chem. Fundam. 9, (2), 252 (1970).
10. Matsuura, T. y Smith, J.M.: Ind. Eng. Chem. Fundam. 10, (2), 316 (1971).
11. Ellis, C., Wells, H. y Heyroth, F.: "Chemical action of ultraviolet rays", Reinhold Publishing Corp., Nueva York (1941).
12. Calvert, J.G. y Pitts, J.N.: "Photochemistry", Ed. Wiley, Nueva York (1967).
13. Cassano, A.E.: Rev. Fctad. Ing. Quim. Sta. Fe (Argentina) 37, 469 (1968).