

ELECTROCROMISMO EN EL AULA: UNA APLICACIÓN PRÁCTICA PARA FÍSICA, QUÍMICA Y MATEMÁTICAS EN PRIMEROS CURSOS UNIVERSITARIOS

PADILLA MARTÍNEZ, Javier; Departamento de Física Aplicada. Universidad Politécnica de Cartagena

TRILLO MOYA, Juan Carlos; Departamento de Matemática Aplicada y Estadística. Universidad Politécnica de Cartagena,

RESUMEN

La interrelación entre distintas materias cursadas en una titulación académica determinada, dotando por tanto de coherencia al correspondiente plan de estudios, así como la relación entre las materias y la vida real, en forma de aplicaciones prácticas, constituyen un reto deseable por parte de los docentes y a la vez exigible por el alumnado y la sociedad. Asimismo, dar visibilidad a las líneas de investigación desarrolladas por los docentes cumple un triple objetivo: divulgar la ciencia, acercar la figura del docente al alumno y promover futuras vocaciones científicas.

En este trabajo mostramos como en el estudio y optimización de una aplicación práctica que se desarrolla en la actualidad, los dispositivos electrocromicos, se hace uso de conceptos que se desarrollan en los primeros cursos de titulaciones universitarias científicas, en las materias de física, química y matemáticas. En concreto, el cálculo de máximos de una función matemática, la atenuación de una radiación y la ley de Beer-Lambert en espectroscopía.

Como método didáctico se propone la creación de un video en el cuál se introducen los distintos conceptos por parte del docente en un entorno virtual. Este video puede servir a los docentes de cada una de las materias para introducir los correspondientes conceptos a desarrollar, sirviendo como motivación para los alumnos.

1. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

Los temarios de asignaturas básicas de primeros cursos de titulaciones universitarias, como pueden ser matemáticas, física y química, permanecen prácticamente inalterados en su estructura fundamental desde hace varias décadas. Por una parte, esto debe ser así, puesto que estas materias tratan de dar una visión robusta de los principios fundamentales de estas materias, ya asentados desde, en ocasiones, más de un siglo. Por otra parte, esto puede hacer que los temarios sean percibidos cada vez como más obsoletos por parte de los alumnos (aunque en realidad no sea así, puesto que esos principios siguen totalmente vigentes. Es labor del docente mostrar a los alumnos que el hecho de que estos principios sigan explicándose es motivado porque siguen siendo válidos. El método científico los descartaría sino fuera así). Si bien asignaturas de cursos superiores, más especializadas, puedan (y deban) estar más abiertas hacia actualizaciones del estado de la técnica e innovaciones, las asignaturas básicas deben mantener ese corpus aparentemente rígido en cuanto a temas a incluir en el desarrollo de la asignatura.

Esta aparente rigidez en el temario, sin embargo, no debe ser un inconveniente a la hora de introducir aspectos novedosos en el aula, desarrollos tecnológicos o aplicaciones actuales, así como una visión de la utilidad de lo explicado en la vida real.

Asimismo, y de cara a dar consistencia a un determinado plan de estudios, es conveniente mostrar las relaciones que existen entre las distintas materias que lo componen. Estas relaciones, que deben aparecer en un plan de estudios coherente, y que para un docente puedan resultar obvias, sin embargo no lo son para los alumnos, especialmente aquellos que comienzan unos estudios. Mostrando estas relaciones, el alumno percibe que los estudios que ha comenzado son consistentes, y asimismo, debe comprender que el estudio de unas materias es necesario y refuerza a las demás, evitando la fragmentación en los estudios, y las situaciones en las que alumnos de últimos años aún no han superado asignaturas básicas.

Por último, en un contexto de disminución de vocaciones científicas y de un cierto desconocimiento por parte de la sociedad sobre la labor investigadora llevada a cabo en las universidades, parece conveniente mostrar y divulgar las líneas de investigación que los docentes desarrollan. Esto permite, por una parte, acercar la figura del docente al alumno, al introducir nuevos contextos de interrelación fuera de la docencia, por otra promover en alguna medida la aparición de vocaciones científicas, tan necesarias en el ámbito universitario, y por último, una pequeña labor de divulgación hacia la sociedad (pues los alumnos forman parte de ella y pueden servir como vehículo de transmisión de esa información).

En este contexto se sitúa el siguiente trabajo. En él, proponemos una experiencia docente en la cuál se presenta un caso práctico de desarrollo de una tecnología real (dispositivos electrocrómicos). Para el estudio y optimización de esta tecnología es necesario conocer diversos conceptos que forman parte de los temarios habituales de las asignaturas de física, matemáticas o química de primeros cursos de estudios universitarios de ciencias.

2.UNA TECNOLOGÍA EN DESARROLLO: DISPOSITIVOS ELECTROCRÓMICOS

Antes de explicar en que consiste esta tecnología, quizá sea interesante introducir algunos conceptos sencillos sobre el color. Los colores que observamos en los materiales son el resultado de la interacción de éstos con la luz procedente del sol (o de alguna fuente artificial) en forma de radiación electromagnética. Dentro del espectro de radiación electromagnética, nuestro ojo percibe aquellas ondas cuya longitud de onda está comprendida entre 350 y 850 nanómetros aproximadamente, lo que llamamos el espectro visible. Cuando un haz de luz incide sobre un material ciertas longitudes de onda son absorbidas y otras reflejadas; si ninguna de las longitudes de onda absorbidas está dentro del rango del visible, no percibimos ningún cambio y el material nos resulta transparente, mientras que si se producen absorciones dentro del rango visible, se genera la sensación de color. Las longitudes de onda que se pueden absorber están determinadas por la configuración de niveles energéticos del material. El color que de una determinada sustancia química percibimos es el resultado de las longitudes de onda que no son absorbidas (Figura 1).

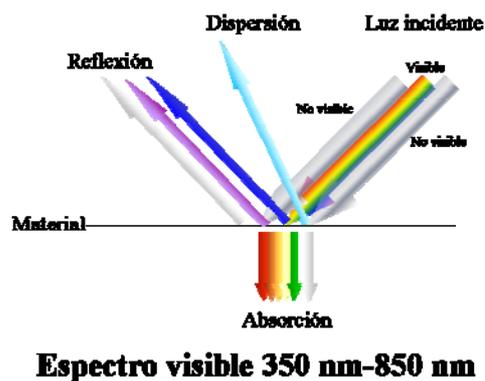


Figura 1. El ojo humano es capaz de percibir la radiación electromagnética comprendida entre 350 y 850 nm. Cuando la radiación electromagnética en este rango incide sobre un material, el color que percibimos se corresponde con las longitudes de onda que no son absorbidas.

El electrocromismo está definido como la capacidad de un material para cambiar reversiblemente su color mediante una reacción electroquímica de oxidación o reducción (es decir, la extracción o aporte de electrones al material) provocada por la aplicación de un potencial eléctrico. En la práctica, los dispositivos electrocromicos operan al inverso que una pila: si en la pila se producen reacciones químicas que dan lugar a corriente eléctrica, en los dispositivos electrocromicos provocamos esa reacción química (el cambio de color) cuando hacemos pasar corriente eléctrica.

Habitualmente el cambio de color se realiza de forma gradual y reversible entre dos colores determinados (azul a rojo, verde a amarillo, etc.). Prácticamente cualquier cambio entre distintos colores está disponible (Figura 2 superior) (bien utilizando un material o mezclas de ellos), aunque quizá el cambio más interesante es aquel en el que se produce un cambio entre un estado transparente y otro absorbente (Figura 2 inferior)

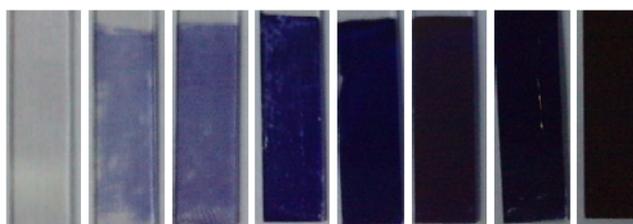
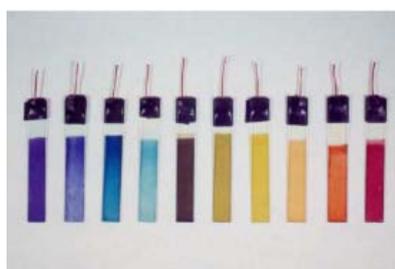


Figura 2. (Superior): Una muestra de los colores obtenibles a partir de distintos materiales. Reproducida con permiso. Copyright (1998) American Chemical Society. [1] (Inferior) Cambio gradual y reversible entre un estado transparente y otro absorbente

Las aplicaciones de estos dispositivos, algunas ya comercializadas, otras en proceso, incluyen cualquiera en la que se pretenda generar un cambio de color estático o dinámico, entre ellos (figura 3):

- Espejos retrovisores antirreflectantes, que se oscurecen cuando es necesario evitando deslumbramientos.
- Ventanas de transmisión variable, las cuales regulan la luz que pasa a su través, haciendo más confortables los habitáculos y controlando el calentamiento producido por rayos solares, de esta manera reduciendo consumos en refrigeración.
- Displays en los cuáles se muestra información, o pantallas de dispositivos tales como teléfonos móviles, o lectores de libros electrónicos
- Gafas adaptables, las cuales regulan la luz para evitar molestias en los ojos.

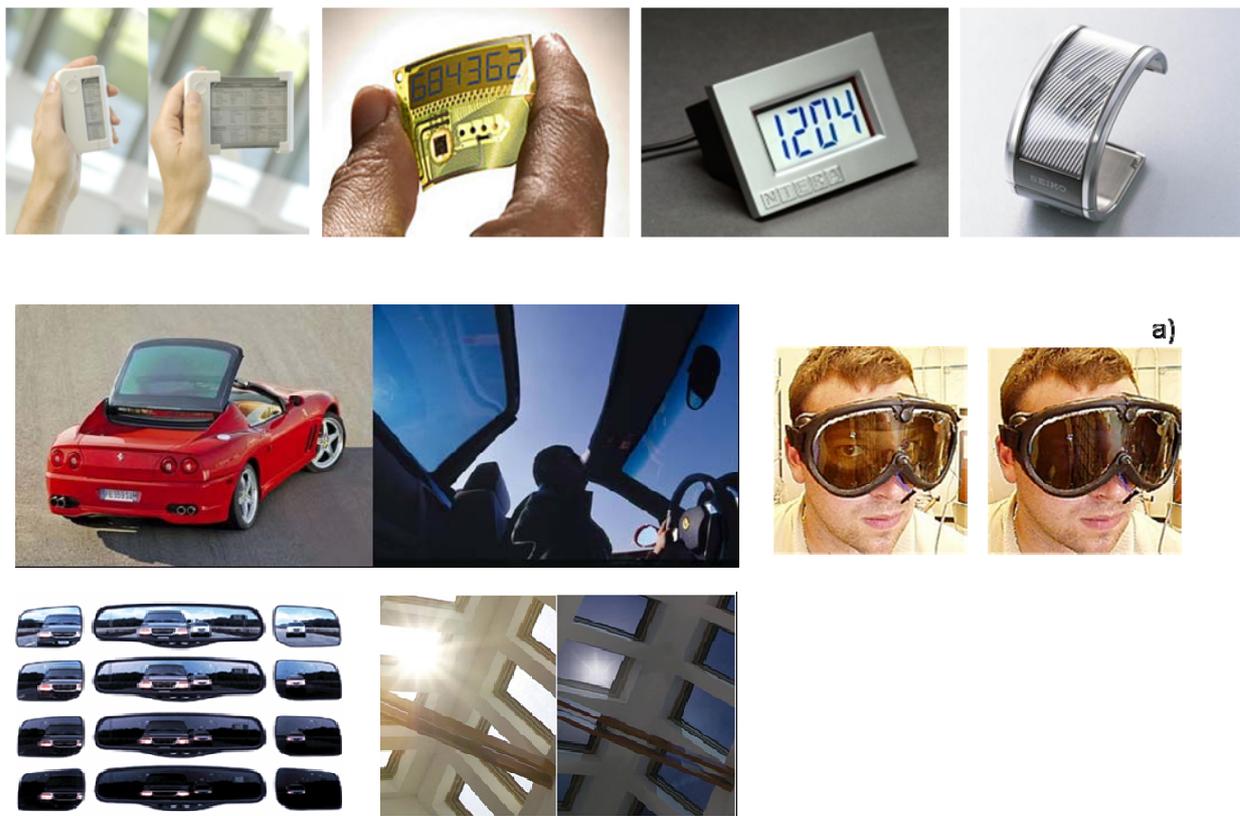


Figura 3. Distintas aplicaciones para dispositivos electrocrómicos

3. PROBLEMA PRESENTADO: OPTIMIZACIÓN DE PROPIEDADES

A la hora de estudiar estos dispositivos, una magnitud fundamental para su caracterización es el contraste: desde un punto de vista simple, este mide las diferencias entre el color de un estado y otro, y con él podemos saber si el dispositivo cumple con su función, que no es otra que la de generar un cambio de color apreciable. La definición rigurosa de contraste es la diferencia entre la luz transmitida cuando el material pasa de un color a otro, y normalmente se mide en tanto por ciento. Para que un dispositivo sea aceptable (y que el ojo lo perciba), al

menos debe de tener un contraste de un 20-30 % . Con los materiales actuales, estos valores llegan habitualmente a un 70-80 %. El contraste por tanto se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta T = \%T_c - \%T_d \quad (1)$$

Siendo T_c y T_d , las transmitancias en dos estados, el estado transparente (*clear* en inglés, de ahí el subíndice c) y coloreado o absorbente (del inglés *dark*). La transmitancia es una medida de la cantidad de luz que se transmite a través de un material: un material transparente tendrá una transmitancia del 100 %, y uno opaco del 0%. Otra magnitud que nos da la misma información es la absorbancia A , que mide cuanta luz absorbe el material (realmente hay una tercera magnitud a considerar que sería cuanto se refleja, pero no la vamos a considerar por simplicidad). Estas dos se relacionan por

$$\%T = 10^{(2-A)} \quad (2)$$

Normalmente el primer esfuerzo para desarrollar un dispositivo de este tipo consiste en sintetizar un material que sea electrocrómico. Una vez que está desarrollado, tenemos que optimizar el material, es decir, sacar el máximo contraste posible de él. Para utilizar estos materiales dentro de un dispositivo, habitualmente los depositamos en forma de película delgada, en la cuál podemos variar el grosor depositado y la “calidad” del material (si cambia fácilmente de color o no). Esta calidad se mide por la capacidad del material para ser oxidado o reducido, es decir, para quitarle o darle electrones: es este proceso (el quitar o dar electrones) el que provoca el cambio de color, por eso hablamos de películas de mayor o menor “calidad”. En realidad, esta “calidad” se cuantifica por lo que denominamos carga redox del material. Simplificando mucho, cuanto mayor carga redox tenga (para una misma cantidad de material) más cambio de color se puede producir.

Para poder optimizar el material necesitamos una función que nos relacione el cambio de color con las propiedades del material (carga redox, grosor, etc.)

El teorema de Beer-Lambert se utiliza frecuentemente para relacionar el color de un material con la cantidad presente de éste: nos dice que la absorbancia de un material es proporcional a la concentración de éste y a su espesor. Cuanto mas material haya (mayor concentración) más luz se absorberá, e igualmente cuanto mayor distancia tenga que atravesar esa luz. (Esta ley, aunque no en esa forma matemática, es la misma que rige la atenuación de una onda cuando atraviesa un material) Normalmente se expresa así:

$$A = \varepsilon Cl \quad (3)$$

Con A la absorbancia, C la concentración, l el espesor y ε una constante de absorción propia de cada material. Experimentalmente se suele utilizar para medir concentraciones de un material, disolviéndolo dentro de un recipiente de longitud conocida l y conociendo el parámetro ε , o viceversa, determinar el parámetro ε , conociendo la concentración de la sustancia, y midiendo en ambos casos la absorbancia A , por medio de un espectrofotómetro [2], equipo disponible habitualmente en laboratorios de química.

Expresada de esta forma (ec. 3), la ley se refiere a materiales en disolución, por lo que no es directamente aplicable a materiales electrocrómicos, ya que estos, como hemos comentado, se encuentran depositados en forma de una película fina (hay cierto tipo de dispositivos electrocrómicos en los que los materiales se encuentran disueltos, pero su estudio se escapa de los objetivos de este trabajo [3]). Sin embargo, mediante sencillas suposiciones [4] se puede comprobar como la ley se puede expresar alternativamente de este modo:

$$A = \eta q \quad (4)$$

Siendo q la carga redox del material, anteriormente citada, y η un nuevo parámetro de absorción directamente relacionado con ε , y que se suele denominar eficiencia de coloración. La carga redox q es un parámetro fácilmente medible y controlable experimentalmente. Si consideramos la ec. 2, podemos convertir la absorbancia en transmitancia, y obtener una expresión para el contraste así [4]:

$$\Delta T = 100[\exp(-\mu_c q) - \exp(-\mu_d q)] \quad (5)$$

Los valores de μ están directamente relacionados con los de η , y experimentalmente se pueden obtener, de medidas de T para películas con diferentes q . La relación entre estas dos variables debe ser lineal, según la ley de Beer-Lambert, y de la pendiente de la recta podremos extraer el valor de esas constantes. Es importante señalar que la ley tiene un rango de validez y en cualquier caso debemos comprobar experimentalmente que nuestras experiencias se encuentran dentro de ese rango.

Expresada de esta forma, obtenemos el valor del contraste del material en función de un parámetro del material que podemos controlar. La única variable en esta función es la q pues μ es constante. Para hallar el máximo contraste que podemos conseguir de un determinado material, derivaremos esta función respecto a q e igualaremos a cero, obteniendo estos resultados:

$$d\Delta T/dq = 100[-\mu_c \exp(-\mu_c q) + \mu_d \exp(-\mu_d q)] = 0$$

$$q_{max} = \ln(\mu_c/\mu_d) / (\mu_c - \mu_d) \quad (7)$$

$$\Delta T_{max} = 100(\exp(-\mu_c q_{max}) - \exp(-\mu_d q_{max})) \quad (8)$$

Con lo que conocemos cuál es la película que mejor contraste nos va a dar y el valor de este contraste.

En teoría nuestro problema de maximización estaría resuelto pues hemos optimizado nuestro material. Sin embargo en la práctica, la propia naturaleza de los dispositivos electrocrómicos hace necesaria la utilización de un segundo material (retomando las analogías con una pila, si un material es nuestro polo positivo, necesitamos un polo negativo, si no, no se cerrará el circuito y no habrá corriente). Esta situación se conoce desde el origen del desarrollo de estos dispositivos, y se la han dado diferentes soluciones. Una de ellas, probablemente la más extendida, convierte esa “necesidad” en una ventaja: puesto que necesitamos un segundo material para completar el dispositivo, si este es también electrocrómico, tendremos dos materiales cambiando simultáneamente de color y nuestro dispositivo tendrá mayor contraste. Esta configuración se denomina habitualmente configuración dual o de materiales complementarios.

En este caso la búsqueda del máximo contraste posible adquiere mayor dificultad, pues debemos encontrar una combinación entre los dos materiales, dos películas, cada una con una q y una μ diferente, de tal manera que la respuesta conjunta se traduzca en el máximo contraste.

En esta situación, sin embargo, si asumimos que se sigue cumpliendo la ley de Beer-Lambert aún sumando las dos películas, podemos llegar a una expresión parecida para el contraste [5]:

$$\Delta T = 100[\exp(-(\mu_{c1}q_1 + \mu_{c2}q_2)) - \exp(-(\mu_{d1}q_1 + \mu_{d2}q_2))] \quad (9)$$

Los significados de los diferentes símbolos son los mismos que en anteriores ecuaciones, y los subíndices 1 y 2 corresponden a la primera y segunda películas (cada una de un material diferente). En este caso la función depende de dos variables, q_1 y q_2 , y respecto a éstas deberemos maximizar su valor.

3.1 Descripción de la función considerada: cálculo de máximos

La función contraste a la que hemos llegado puede expresarse genéricamente de esta manera:

$$f(x, y) = 100[\exp-(ax + by) - \exp-(cx + dy)] \quad (10)$$

La función está definida en \mathbf{R}^2 para $x, y > 0$, con $a, b, c, d > 0$, $a < c$ y $b < d$.

En estas condiciones, podemos encontrar el máximo de esta función utilizando el teorema de Weierstrass. El desarrollo de este cálculo se realizó, y los detalles pueden encontrarse en las referencias adjuntadas [6].

Se demostró que el máximo de esta función aparece cuando x o y son cero. Que x o y sean cero significa que la carga de una de los materiales es cero, es decir, que no hay película. En la práctica esto significa que el máximo contraste se consigue cuando sólo tenemos un material. Este resultado es muy significativo, pues cuestiona la validez de la configuración dual que se comentó anteriormente, cuya utilidad no se ha puesto en duda durante dos décadas por la comunidad científica internacional, y abre la puerta hacia nuevas configuraciones de estos dispositivos. Todo ello utilizando conceptos que se explican en los primeros cursos de las titulaciones universitarias de ciencias.

Es importante asimismo destacar que el problema de maximización de una propiedad puede encontrarse en otras aplicaciones, por lo que esta experiencia podría ser extrapolable a otras situaciones, y por tanto a otros contenidos docentes.

4. DESARROLLO EN EL AULA: VIDEO EXPLICATIVO

Para el desarrollo de esta experiencia en el aula, se realiza un video en el que se explican los conceptos científicos de una manera divulgativa y atractiva para los alumnos, para posteriormente introducir los conceptos propios de la asignatura.

Este video se desarrolla con POLIMEDIA, un sistema diseñado en la Universidad Politécnica de Valencia, para la creación de contenidos multimedia y disponible para la comunidad docente en la Universidad Politécnica de Cartagena [8].

El sistema consiste en la superposición de un entorno virtual (presentación power point o cualquier otro formato multimedia) junto a la grabación en imagen y sonido del profesor. El formato resultante puede ser editado de acuerdo a las necesidades específicas de cada profesor (con subtítulos, por ejemplo).

El video puede ser utilizado por los profesores de física, química y matemáticas para introducir los conceptos correspondientes a su asignatura, así como para proponer actividades conjuntas evaluables entre las distintas asignaturas.

5. CONCLUSIONES

Se ha propuesto una experiencia docente mediante la cuál se consiguen relacionar contenidos de diferentes asignaturas: física, matemáticas y química de primeros cursos de titulaciones universitarias de ciencias. Los objetivos son: fortalecer la sensación de coherencia del plan de estudios correspondiente, estimular a los alumnos con aplicaciones reales y actuales, divulgar las líneas de investigación desarrolladas en la universidad, promover el interés por la investigación en alumnos universitarios.

En esta experiencia se han utilizado los conceptos de cálculo de máximos y mínimos de una función de varias variables, desarrollada en la asignatura de matemáticas, ley de Beer-Lambert, presente habitualmente en el temario de química, así como la atenuación de una onda, presente en física. Se puede destacar que una explicación más en profundidad del electrocromismo incluiría conceptos de teoría de bandas, semiconductores, química-física e incluso mecánica cuántica, por lo que la experiencia propuesta puede ser adaptada a distintos niveles.

Asimismo, es destacable el hecho de que el problema planteado, el de maximización o minimización de una propiedad física se puede encontrar en multitud de aplicaciones. El método propuesto, consistente en describir la función matemática que describe el comportamiento físico, para después maximizar o minimizar en función de las variables que intervienen, puede ser extrapolable a otros problemas tecnológicos que puedan ser de interés en las aulas.

6. ANEXO: CONCEPTOS UTILIZADOS Y UBICACIÓN DENTRO DE LAS ASIGNATURAS

6.1 Ley de Beer-Lambert (Química)

Conceptos

La ley indica que hay una dependencia logarítmica entre la transmisión, de la luz a través de una sustancia y del producto del coeficiente de absorción de la sustancia, y la distancia que la luz viaja a través del material.

Esta ley une las leyes de Beer, por un lado, que dice que la cantidad de luz absorbida por una sustancia disuelta es proporcional a la concentración en la disolución, y la ley de Lambert, que afirma que la cantidad de luz absorbida por una sustancia es proporcional a la distancia recorrida por la luz. La proporcionalidad viene determinada por un coeficiente, propio de cada material que denominamos coeficiente de absorción molar. La expresión matemática de la ley se ubica en el texto como ec. 3.

Ubicación

Esta ley se suele utilizar en las prácticas de esta asignatura, para determinar concentraciones. También, si se incluye en el temario alguna introducción a técnicas experimentales e instrumentación, una experiencia sencilla para utilizar espectrofotómetros sería esta.

Dentro del temario teórico, se introducen conceptos de disoluciones, así como concentraciones. El empleo de esta ley puede ser la base para realizar ejercicios relativos a estos conceptos.

6.2 Atenuación de una onda (Física)

Conceptos

El concepto físico es el mismo comentado en el anterior apartado, la disminución exponencial de la intensidad de una onda con la longitud recorrida.

Ubicación

Dentro del temario de las asignaturas de física de primer año, es habitual incluir algunas secciones relativas al estudio del movimiento ondulatorio y su propagación en distintos medios. La atenuación en la intensidad de una onda a través de una material sigue la relación propuesta por Beer-Lambert.

6.3 Teorema de Weierstrass y resolución de problemas de máximos absolutos (matemáticas)

Conceptos

Teorema de Weierstrass: Una función continua en un intervalo cerrado, tiene máximo y mínimo absoluto en dicho intervalo.

Ubicación

Se ubica dentro de los problemas generales de cálculo de máximos y mínimos de funciones de varias variables y cálculo diferencial.

7. REFERENCIAS

- [1] PADILLA MARTÍNEZ, J.; GARCÍA VALVERDE, R.; FERNÁNDEZ ROMERO, A.J.; URBINA YEREGUI, A. *Polímeros conductores: su papel en un desarrollo energético sostenible* Reverté, Barcelona, 2010.
- [2] SKOOG, D.A., *Principios de análisis instrumental*, Mc-Graw-Hill, Nueva Cork, 2001.
- [3] MONK, P.M.S., MORTIMER, R.J. *Electrochromism: fundamentals and applications*, Weinheim-VCH, Berlin, 1995
- [4] PADILLA, J. ; SESHADRI, V., SOTZING, G.A., OTERO, T.F. “*Maximum contrast from an electrochromic material*” en *Electrochemistry Communications*, Elsevier, Laussane, 2007 (9) pp. 1931-1935
- [5] PADILLA, J., OTERO, T.F. “*Contrast limitations of dual electrochromic systems*” en *Electrochemistry Communications*, Elsevier, Laussane, 2008 (10) pp. 1-6
- [6] PADILLA, J., “*A theoretical investigation on the contrast limitations of dual electrochromic systems*” en *Thin Solid Films*, Elsevier, Laussane, 2009 (18) pp. 5580-5583
- [7] <http://www.upct.es/polimedia/> [Consulta: 14 Octubre 2010]