

Candidate Marks Report

Series : M18 2018

This candidate's script has been assessed using On-Screen Marking. The marks are therefore not shown on the script itself, but are summarised in the table below.

Centre No :	Assessment Code :	PHYSICS EE EXTENDED ESSAY in SPANISH
Candidate No :	Component Code :	EE(SPA)TZ0
Candidate Name :		

In the table below 'Total Mark' records the mark scored by this candidate.
'Max Mark' records the Maximum Mark available for the question.

Examiner:		Examiner:	
Paper:	M18physiEEES0XXXX	Paper:	M18physiEEES0XXXX
Paper Total:	26 / 34	Paper Total:	26 / 34
Question	Total / Max Mark Mark	Question	Total / Max Mark Mark
Criterion A	6 / 6	Criterion A	6 / 6
Criterion B	4 / 6	Criterion B	4 / 6
Criterion C	8 / 12	Criterion C	8 / 12
Criterion D	2 / 4	Criterion D	2 / 4
Criterion E	6 / 6	Criterion E	6 / 6

Coursework confirmation

Yes

Hours supervisor spent with candidate

4

Bachillerato Internacional

Estudio de la disposición óptima del dispositivo conocido como

Litro de luz



Pregunta de investigación:

¿Cuál es la altura óptima respecto del tejado de la vivienda a la que se debe colocar una botella de vidrio llena de agua para obtener la mayor iluminación posible en el interior?



Monografía de Física.

Palabras: 3999.



El proyecto *Litro de luz* es una iniciativa que pretende suministrar iluminación a todas aquellas viviendas que no dispongan de electricidad. Con este fin, se instala una botella transparente y llena de agua en el tejado de la vivienda para que transfiera luz del exterior al interior. En este estudio se pretende optimizar la altura respecto del tejado y el porcentaje de la botella introducido en la vivienda para conseguir la mayor iluminación posible. Por ello, la variable independiente es la altura de la botella y la dependiente la iluminancia que proporciona en el interior. Para relacionar ambas variables se ha desarrollado la siguiente metodología: una caja en la que se introduce más o menos una botella variando así su altura y un sensor dentro de la caja que registra la iluminación que transmite la botella al interior. Concretamente se han realizado medidas de la iluminancia en 19 alturas diferentes de la botella. Las iluminancias registradas por el sensor se han convertido en intensidades luminosas y, finalmente, se ha determinado que la altura y el porcentaje óptimos son respectivamente $17,3 \pm 0,1$ (0,58%) cm y $57,6 \pm 0,5$ (0,91%) %. Este resultado es válido solo para el tipo de botella utilizado en el experimento. Posteriormente, analizando los diferentes ángulos de incidencia de un láser en la botella, se han explicado los principios físicos que permiten una mayor eficiencia luminosa del proyecto *Litro de luz*: refracción y reflexión de la luz. Se ha determinado también el periodo de iluminación máxima de la botella para la altura óptima hallada en un lugar y época del año concretos: 10 h – 14 h. Para ello, se ha analizado el comportamiento del láser al incidir en la botella y se ha relacionado con la trayectoria solar.

Índice

Resumen	3
1. Introducción.....	6
1.1. Pregunta de investigación.....	7
1.2. Antecedentes teóricos	7
1.3. Instrumental utilizado	9
1.4. Metodología.....	10
1.5. Variable independiente.....	15
1.6. Variable dependiente.....	16
1.7. Variables controladas	17
1.8. Seguridad, ética y conciencia ambiental	18
2. Análisis.....	18
2.1. Datos brutos	18
2.2. Datos procesados	22
2.3. Física involucrada	26
2.4. Cálculo de errores.....	31
2.4.1. Error de la iluminancia E_v	31
2.4.2. Error de las alturas H	32
2.4.3. Error del cuadrado de las distancias D	33
2.4.4. Error de la intensidad luminosa F	34
2.4.5. Error de la altura óptima H	36
3. Conclusión.....	37
3.1. Respuesta a la pregunta de investigación	37

3.2. Evaluación de resultados..... 38

3.3. Propuestas de mejora..... 40

SEEN

4. Bibliografía..... 42



1. -Introducción.

Las energías renovables son un elemento indispensable en el futuro de la humanidad. El ser humano necesita fuentes de energía limpias que eviten agravar los problemas medioambientales existentes para promover un desarrollo sostenible⁴.

Por ello, me he propuesto investigar el uso de energías renovables que sean asequibles para todo el mundo. Más concretamente he decidido estudiar la iniciativa *Litro de luz*⁹ con el fin de poder optimizar alguna variable. Este proyecto consiste en instalar una botella transparente y llena de agua en el techo de la vivienda para así garantizar luz natural durante el día sin prácticamente ningún coste. De esta forma pongo mi granito de arena en la investigación y desarrollo de energías sostenibles tan necesarias hoy en día.



Imagen nº1. -Proyecto *Litro de luz* desde el exterior.¹⁵



Imagen nº2. -Proyecto *Litro de luz* desde el interior.¹¹

1.1. Pregunta de investigación.

¿Cuál es la altura óptima respecto del tejado de la vivienda a la que se debe colocar una botella de vidrio llena de agua para obtener la mayor iluminación posible en el interior?

CiA

1.2. Antecedentes teóricos.

El *Litro de luz*⁹ fue inventado en el año 2002 por el brasileño Alfredo Moses¹⁶. La organización sin ánimo de lucro *My Shelter Foundation*¹³ empezó a fomentar el uso de esta idea en junio de 2011. Desde entonces esta iniciativa se ha extendido a muchos países. Hoy en día el *Litro de luz*⁹ ilumina muchas viviendas de gente que no puede disponer de electricidad¹⁶.

CTX

Uno de los estudios sobre este tema ha sido: *A Study on the Solar Illumination Provided by a Water Bottle*¹⁴. En este trabajo se muestran evidencias de cómo el *Litro de luz*⁹ provee a la vivienda de más luminosidad a lo largo del día que un simple cristal del mismo diámetro colocado en el techo. Se intentará en el presente estudio replicar algunas de las medidas y realizar otras que nos permitan conocer mejor la física involucrada en este dispositivo y optimizar la colocación del mismo.

En el proyecto *Litro de luz* se usan botellas de vidrio y plástico de diferentes tamaños y formas⁹, sin embargo para la realización de esta investigación se ha utilizado utilizar una botella de vidrio transparente, totalmente lisa y sin estrías de $30,0 \pm 0,1$ cm de altura total. Ver imagen 3.



Imagen nº3. -Botella utilizada (Producto Del Autor, PDA).

El sensor utilizado (*Physics Toolbox Suite*¹²) detecta iluminancia E_v (lx). Es necesario relacionar esta magnitud con la intensidad luminosa F (lm). Según los estudios de fotometría⁵:

$$\text{Iluminancia (lx)} = \frac{\text{Intensidad luminosa (lm)}}{\text{Distancia } D \text{ (m)}^2}$$

A continuación se muestra gráficamente la relación entre ambas magnitudes:

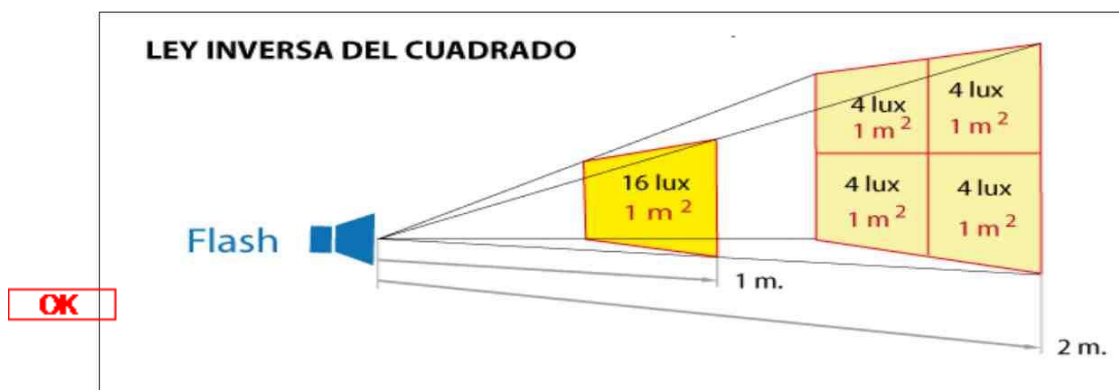




Imagen nº4. -Ley inversa del cuadrado².



1.3. Instrumental utilizado.

Se ha utilizado el siguiente instrumental:

- Caja de cartón de un 1 metro de altura.
- Cartón (1 m^2 aprox).
- Pegamento.
- Cúter.
- Botella  de vidrio transparente
($30,0 \pm 0,1 \text{ cm}$ altura y $7,0 \pm 0,1 \text{ cm}$ diámetro) con corcho para cerrarla.
- Cinta aislante.
- 2 sillas de soporte.
- Placas de contrachapado y poliestireno expandido.
- Cilindro de madera (2 cm diámetro aprox). 
- Dos tablas de madera ($25,0 \times 5,0 \times 1,0 \pm 0,1 \text{ cm}$)
- Escalera de tijera (como soporte).
- 2 m de cuerda aprox.
- Regla de $30,0 \pm 0,1 \text{ cm}$ de longitud (sensibilidad $\pm 0,1 \text{ cm}$).
- Rotulador permanente.
- Dispositivo móvil con sensor de luz (sensibilidad $\pm 1 \text{ lux}$ y frecuencia de muestreo 10 Hz).
- Cámara de 13 MP.
- Programa gratuito *Physics Toolbox Suite*¹² en su versión 1.7.8.
- Cronómetro digital (sensibilidad $\pm 0,01 \text{ s}$).
- Agua del grifo.

- Puntero láser 5 mW 650 nm.
- Unas gotas de leche.

1.4. Metodología.

- Llenar la botella de agua hasta arriba y taponarla. Se recomienda añadir algún tipo de antiséptico como alcohol etílico para evitar que se reproduzca la materia orgánica que haría que el agua se enturbie pasados meses tras su instalación. Sin embargo, en mi caso, como las medidas se han realizado en un corto periodo de tiempo esto no ha sido necesario.

- Trazar 19 marcas con el rotulador permanente a la botella (imagen 3).



La distancia vertical entre marcas es de $1,0 \pm 0,1$ cm. La primera marca empieza a 1,0 cm de la base de la botella y la última en la parte más alta donde el diámetro de la botella es constante (no se han realizado medidas en el cuello de la botella), a los 19,0 cm de altura.

- Poner las dos sillas enfrentadas con medio metro de separación aproximadamente. Colocar sobre cada una de las sillas las tablas de contrachapado y poliestireno expandido de forma que queden ambas plataformas a la misma altura. Colocar la escalera de tijera sobre las dos plataformas. Cada una de las dos "patas" de la escalera debe estar apoyada en cada uno de los soportes.

- Realizar las medidas del ancho del escalón de la escalera. Cortar los dos paneles de madera según las medidas del escalón para que queden bien ajustados en la escalera. Ver imagen 5.
- Realizar dos orificios del diámetro del cilindro a la misma altura en los paneles de madera. Introducir el cilindro por dichos agujeros de manera que quede estable y pueda girar sobre las placas de madera. Ver imagen 5.



Imagen nº5. -Paneles de madera con el cilindro colocados en la escalera (PDA).

- Realizar un orificio del diámetro de la botella en la parte superior de la caja y otro del tamaño del sensor de luz en la parte inferior (imagen 6).



Imagen nº6. -Soporte para el móvil (PDA).

- Construir un pequeño soporte con cartón en el que se introducirá el móvil y pegarlo en la parte inferior de la caja. El sensor de luz debe coincidir justo con el agujero para que registre las variaciones de luminosidad dentro del recipiente (imagen 6).
- Sellar todas las pequeñas fisuras de la caja con cinta aislante para que el sensor solo detecte los rayos solares que pasen por la botella.
- Atar una cuerda con un nudo de corredera al cilindro de madera por un extremo y por el otro a la botella.
- Colocar la caja debajo de la escalera e introducir la botella dentro por el orificio realizado. Ver imágenes 7 y 8. La botella debe quedar colgando de la cuerda totalmente en vertical. Ningún objeto puede interferir entre el sol y la botella.
- Poner un trozo de poliestireno expandido entre la caja y el suelo para fijar la estructura.



Imágenes nº 7 y 8. -Práctica montada (PDA).

- Al realizar cada experimento hay que medir la iluminancia para cada altura lo más rápido posible para que la posición del sol apenas varíe entre las distintas posiciones de la botella.
- Se ha elegido un día totalmente despejado para realizar las medidas.
- Para realizar las medidas se coloca el dispositivo móvil en el soporte de la parte inferior (ver imagen 6) con el programa iniciado *Physics Toolbox Suite*¹² para registrar las variaciones de luminosidad dentro de la caja. En este punto se inicia la cuenta con el cronómetro. Posteriormente se gira el cilindro para hacer ascender o descender la botella. Debe coincidir una marca de la botella con la superficie de la caja (mirar de frente para evitar error de paralaje). Una vez que tenemos la botella en posición, se anota en qué periodo de tiempo la

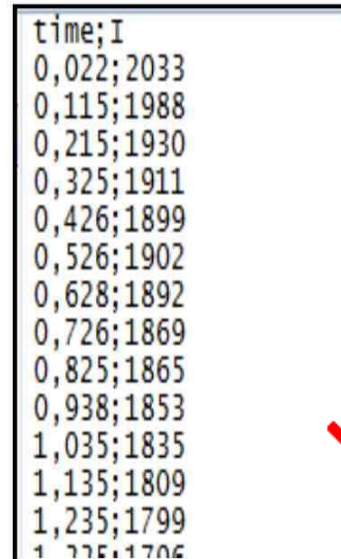
botella ha estado en qué marca (dejar la botella en una marca sobre 10 s aprox para tener suficientes valores). Así podremos saber a qué altura de la botella corresponden los valores que haya registrado el móvil cuando los analicemos, ya que el programa recoge todos los valores de iluminancia (luxes) en función del tiempo.

- Repetir la operación del punto anterior con las 19 marcas de la botella.

- Una vez finalizadas las medidas se accede al dispositivo móvil y se guarda el archivo para posteriormente poder estudiar los datos obtenidos.

Ver imagen 9.

Imagen nº9. -Pantallazo de los datos obtenidos (PDA).



```
time;I
0,022;2033
0,115;1988
0,215;1930
0,325;1911
0,426;1899
0,526;1902
0,628;1892
0,726;1869
0,825;1865
0,938;1853
1,035;1835
1,135;1809
1,235;1799
1,335;1706
```

- Para realizar las medidas con el láser: colocar la botella en un espacio oscuro y apuntar con un láser siempre a un mismo punto de la botella variando los ángulos de incidencia. Se le debe echar unas gotas de leche al agua para poder fotografiar el recorrido del láser. Registrar los

resultados con la cámara del dispositivo móvil. El rayo láser debe ser paralelo al plano de enfoque de la cámara. Ver imagen 10.

Imagen nº10. -Láser proyectado sobre la botella (PDA).



1.5. Variable independiente.

La variable independiente es la altura H a la que está la base de la botella respecto de la superficie de la caja (ver imagen 11). Se estudian 19 alturas diferentes, desde 1,0 cm, punto en el que sobresale casi toda la botella hasta 19,0 cm, donde la botella está en su mayor parte dentro de la caja. El rango de medidas de las alturas H es el tramo de la botella en el que el diámetro permanece constante.

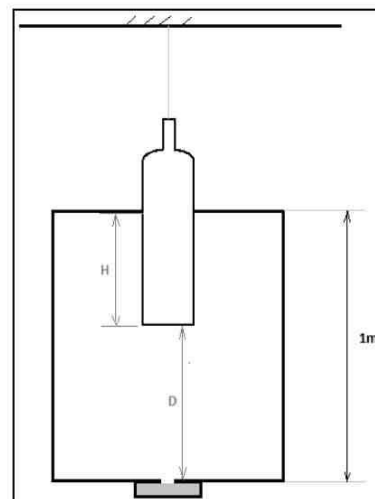


Imagen nº11. -Esquema del montaje (PDA).

Las marcas de las alturas en la botella están medidas con una regla (sensibilidad 0,1 cm) y separadas entre sí 1,0 cm. Se modifica la variable independiente girando un cilindro en la parte superior de la escalera. Este cilindro enrolla y desenrolla una cuerda atada a la botella que modifica su altura.

1.6 Variable dependiente.

La variable dependiente es la iluminancia E_v (lx) dentro de la caja. La iluminancia E_v es una magnitud que mide la intensidad luminosa F (lm) emitida por una fuente partida por la distancia a esa fuente al cuadrado D^2 (m^2): $E_v = \frac{F}{D^2}$. La iluminancia se controla mediante el sensor de luz del dispositivo móvil, que utilizando el programa *Physics Toolbox Suite*¹² registra los valores de la iluminancia a lo largo del tiempo.

Para relacionar la variable dependiente con la independiente se utiliza un cronómetro, midiendo en qué periodo de tiempo la botella ha estado en cada marca.

1.7. Variables controladas.

La temperatura del agua varía al recibir radiación solar. Esto puede modificar la luminosidad que registra el sensor debido a la variación del índice refracción del agua, la cual puede modificar la trayectoria de los rayos¹⁰. Como se ve en la imagen nº12 tiene que haber cambios de temperatura muy grandes para que afecten significativamente al índice de refracción. Debido al elevado calor específico del agua y al poco tiempo de exposición, la temperatura apenas varía. Por lo tanto, la variación del índice de refracción no es relevante. La emisión de luz visible por el agua a tan bajas temperaturas también es despreciable (emisión de cuerpo negro⁴).

CiD

$$\frac{dn}{dT} = -0.0004 \frac{1}{^{\circ}C}$$

Imagen nº12. -Relación temperatura e índice de refracción para el agua.¹⁰

La posición del sol durante la práctica también es otra variable controlada. Al realizar las medidas en un corto periodo de tiempo (10 min), en un día despejado y sin que ningún objeto interfiera entre el sol y la botella, se considerará despreciable la variación de la intensidad luminosa sobre botella.

La presión y temperatura del ambiente se controlaron con medidas regulares en el barómetro y termómetro respectivamente y se comprobó que permanecían constantes a lo largo de la práctica.

1.8. Seguridad, ética y conciencia ambiental.

No se han requerido medidas de seguridad excepcionales, debido a que el estudio no conlleva ningún riesgo.

Todos los elementos utilizados respetan el medioambiente. Los elementos como las cajas de cartón han sido depositados en los recipientes adecuados para su reciclaje.


Durante todo el procedimiento experimental se ha seguido un protocolo de investigación adecuado respetando las cuestiones éticas. En ningún momento se han utilizado compuestos peligrosos ni se ha puesto en riesgo la salud de ningún ser vivo.

2. -Análisis.

2.1. Datos brutos.

En cada altura H de la botella se registran aproximadamente 100 valores (10 valores cada segundo por un periodo de 10s). Para manejar menos datos se selecciona un tramo de 50 valores en cada altura H . Posteriormente se calcula la media aritmética de los 50 valores de cada altura H :

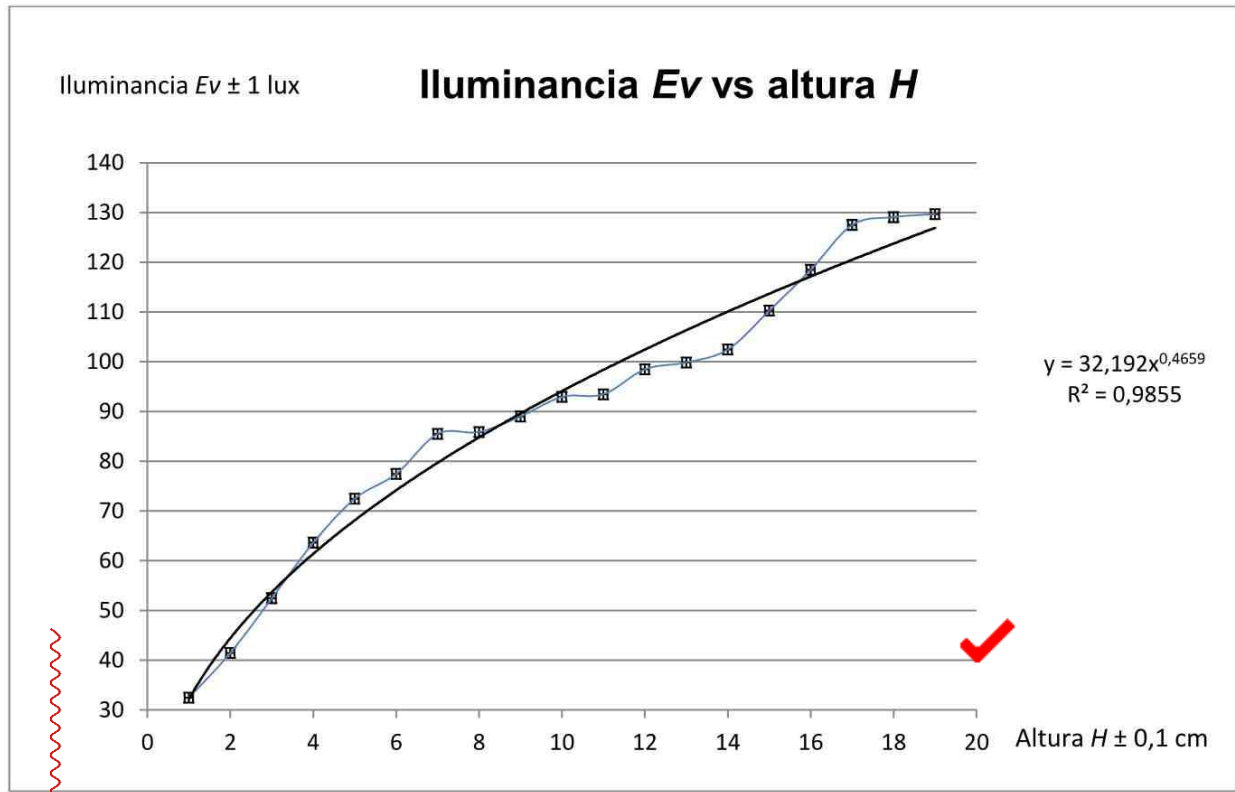
Tabla nº1. -Datos brutos.

Experiencia	Altura $H \pm 0,1 \text{ cm}^{1*}$	Iluminancia media E_v $\pm 1 \text{ lux}^{1*}$
1	1,0	33
2	2,0	42
3	3,0	53
4	4,0	64
5	5,0	73
6	6,0	77
7	7,0	86
8	8,0	86
9	9,0	89
10	10,0	93
11	11,0	93
12	12,0	99 
13	13,0	100
14	14,0	102
15	15,0	110
16	16,0	119
17	17,0	128
18	18,0	129
19	19,0	130

1* Los errores se calculan posteriormente en el apartado: 2.4. Cálculo de errores. Pág. 31.

Si se representan los datos se obtiene la siguiente gráfica:

Gráfico nº1. - Datos brutos representados.



Una regresión a una función potencial resulta:

$$E_v = 32,192 H^{0,4647}$$

E_v : iluminancia (lux)

H : altura (cm)

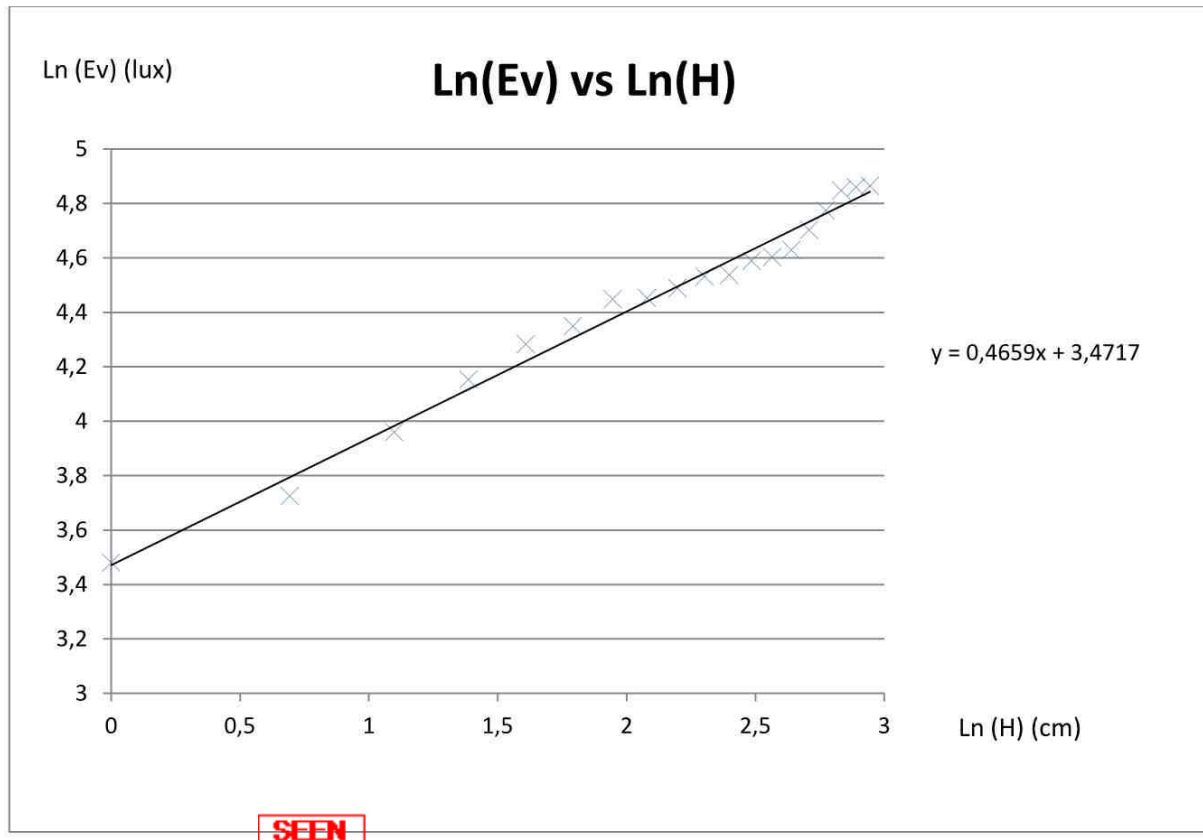
Podemos realizar una regresión a una línea recta si se toman logaritmos:

$$\ln(E_v) = \ln(32,354 H^{0,4647}) \Rightarrow \ln(E_v) = \ln(32,19) + 0,4647 \ln(H) \Rightarrow$$

$$\ln(E_v) = 3,472 + 0,4647 \ln(H)$$

Representando la linealización gráficamente se obtiene:

Gráfico nº2. - Linealización de los datos brutos.



El error de la pendiente es $\pm 0,01 \text{ cm}^{-1} \text{ lux}$ y el de la ordenada del origen $\pm 0,03 \text{ lux}$. Por lo tanto la pendiente es $0,47 \pm 0,01 \text{ cm}^{-1} \text{ lux}$ y la ordenada en el origen $3,47 \pm 0,03 \text{ lux}$.

2.2. Datos procesados.

Al variar la altura H de la botella se modifica la distancia D entre el sensor y la botella (imagen 11). Es importante resaltar que el punto de la botella que se toma como referencia respecto al sensor es su base, ya que esta es la parte la botella que entra en el campo de visión del sensor. Como la caja tiene una altura de $100,0 \pm 0,1$ cm, medida con la regla, las distancias D entre la botella y el sensor vienen dadas por:

$$D \text{ (cm)} = 100,0 \text{ cm} - H(\text{cm})$$

Para la altura H de 1,0 cm la distancia D es: $D \text{ (cm)} = 100,0 - 1,0 = 99,0 \text{ cm} = 0,990 \text{ m}$.

Al variar la distancia D esto afecta a la iluminancia E_v detectada por el sensor. Si se aplica la *Ley inversa del cuadrado*² para la primera distancia D :

$$\begin{aligned} \text{Intensidad luminosa } F \text{ (lm)} &= \text{Distancia } D \text{ (m)}^2 \times \text{Iluminancia } E_v \text{ (lx)} \\ &= 0,990 \times 32,67 = 32,34 \text{ lm} = 32 \pm 1 \text{ lm} \end{aligned}$$

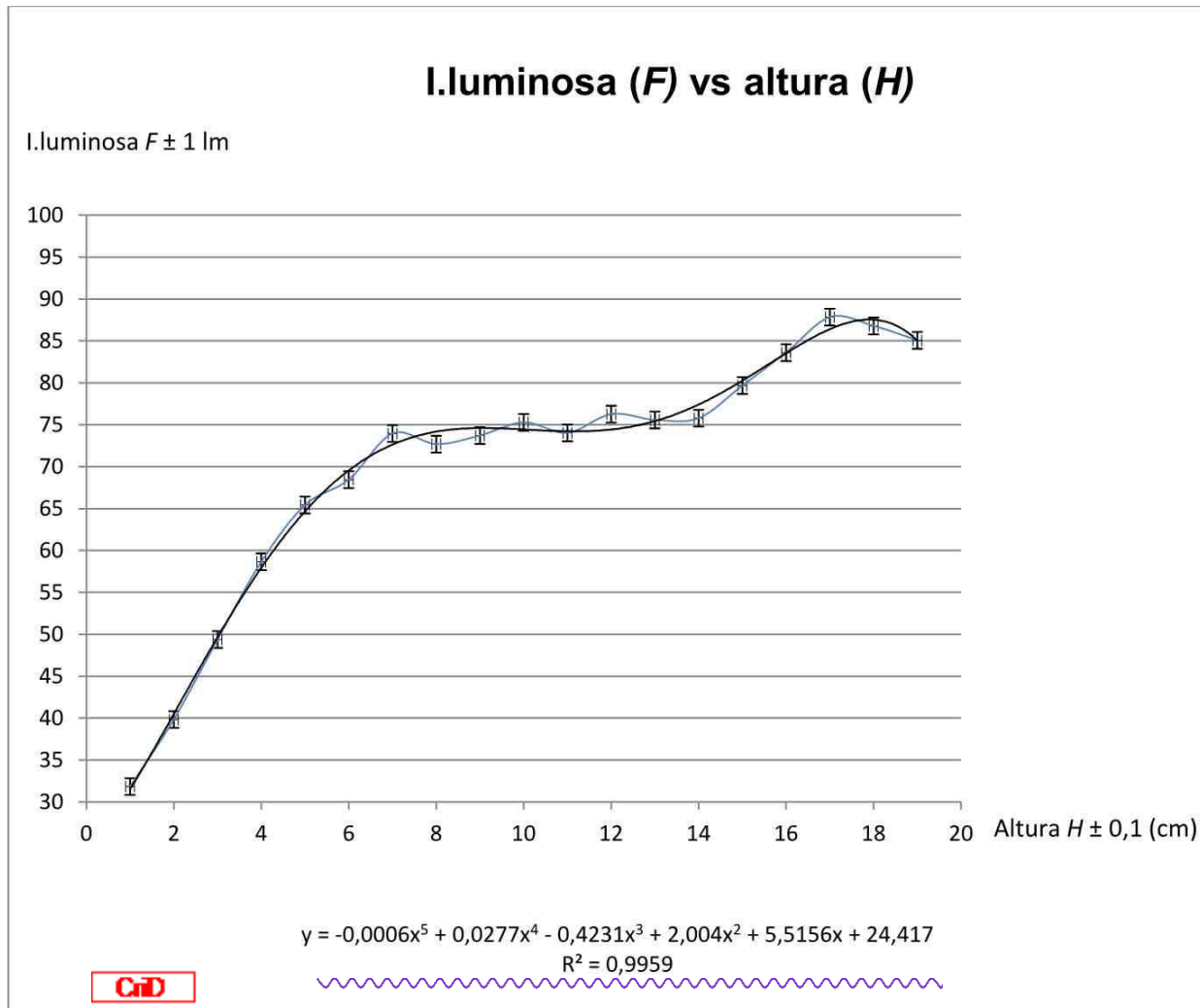
Realizando los mismos cálculos para el resto de alturas H :

Tabla n°2. -Datos procesados.

Experiencias	Altura $H \pm 0,1$ cm	Distancia $D \pm$ 0,2 cm	I. luminosa $F \pm 1$ lm
1	1,0	99,0	32
2	2,0	98,0	40
3	3,0	97,0	49
4	4,0	96,0	59
5	5,0	95,0	65
6	6,0	94,0	68
7	7,0	93,0	74
8	8,0	92,0	73
9	9,0	91,0	74
10	10,0	90,0	75
11	11,0	89,0	74
12	12,0	88,0	76
13	13,0	87,0	76
14	14,0	86,0	76
15	15,0	85,0	80
16	16,0	84,0	84
17	17,0	83,0	88
18	18,0	82,0	87
19	19,0	81,0	85

Representando las intensidades luminosas F obtenidas para cada altura H se obtiene el siguiente gráfico:

Gráfico nº3. -Datos procesados representados.



Como la gráfica presenta dos máximos relativos, consideramos que una regresión aceptable sería a un polinomio de 5º grado: **?**

$$F = -0,0006H^5 + 0,0277H^4 - 0,4231H^3 + 2,004H^2 + 5,5156H + 24,417$$

SEEN $R^2 = 0,9959$

F: intensidad luminosa (lm)

H: altura de la botella (cm)

Esta función establece la relación entre la intensidad luminosa *F* (lm) y la altura *H* de la botella (cm). Observando la gráfica, la función tiene un máximo alrededor de los 17 cm de altura *H*. Para hallar este punto con mayor precisión se calcula el máximo absoluto de la función polinómica de mejor ajuste:

$$F(H) = \max \Leftrightarrow \frac{dF}{dH} = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{d - 0,0006 H^5 + 0,0277 H^4 - 0,4231 H^3 + 2,004 H^2 + 5,5156 H + 24,417}{dH} = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow -0,003 H^4 + 0,1108 H^3 - 1,2693 H^2 + 4,008 H + 5,5156 = 0 \Leftrightarrow H$$

$$= -1,0179 \text{ cm}; 8,8099 \text{ cm}; 11,8679 \text{ cm}; 17,2735 \text{ cm}$$

La altura óptima *H* es $17,3 \pm 0,1$ cm, ya que en este punto el valor de la intensidad luminosa *F* es máximo: 80 ± 1 lm.

La altura total de la botella es $30,0 \pm 0,1$ cm. El porcentaje de la botella óptimo introducido dentro de la vivienda %*H* es:

$$\% H = \frac{17,2735}{30} \times 100 = 57,6 \pm 0,5\%$$

2.3. Física involucrada.

Se toma la altura óptima ($17,3 \pm 0,1$ cm) como referencia. A partir de estos datos se va a utilizar un láser para mostrar cómo, mediante los fenómenos de reflexión y refracción en la botella, se consigue una mayor eficiencia que con un simple cristal como ya se demostró en el estudio: *A Study on the Solar Illumination Provided by a Water Bottle*¹⁴.

A continuación se muestran algunas fotos tomadas con el dispositivo móvil al proyectar el láser sobre un mismo punto de la botella (punto D) con diferentes ángulos:

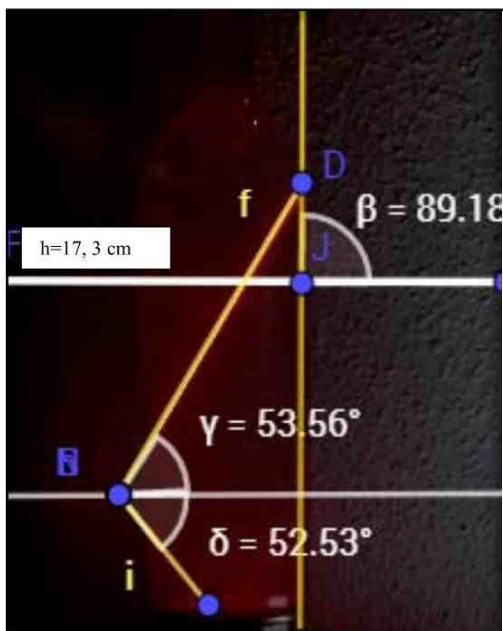


Imagen nº13. -Ángulo de reflexión para 89° . (PDA)

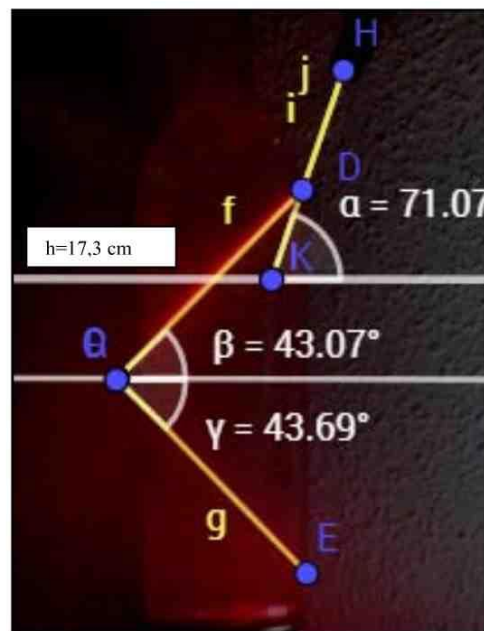


Imagen nº14. -Ángulo de reflexión para 71° . (PDA)

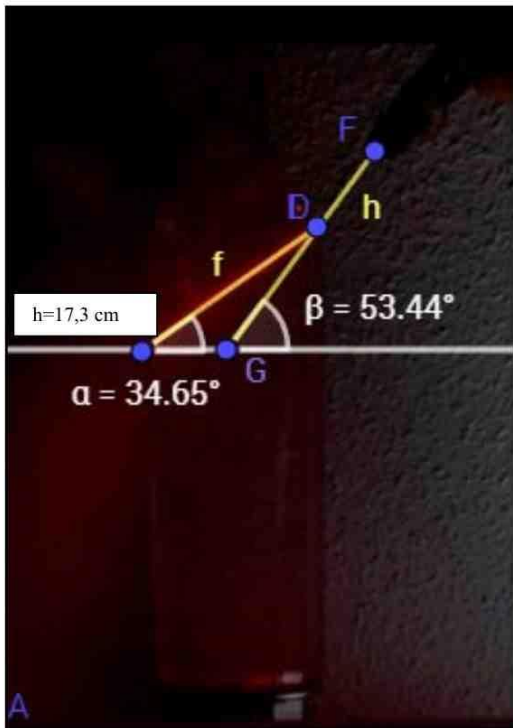


Imagen n°15. -Ángulo de refracción para 53°. (PDA)

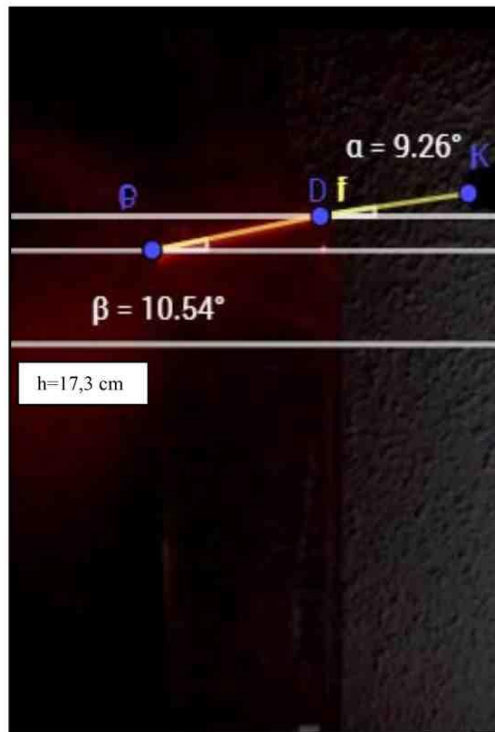


Imagen n°16. -Ángulo de refracción para 9,0°. (PDA)

SEEN

En las imágenes 13 y 14 los rayos penetran directamente en la vivienda. Sin embargo, en la n°15 se produce un punto de inflexión, ya que para ángulos menores a 53° respecto a la horizontal los rayos ya no pasan directamente al interior.

Los rayos de láser pueden reflejarse en la segunda pared de vidrio y luego volver al interior de la botella. Esto permite que la botella recoja una franja de rayos más amplia que un simple cristal, ya que sigue recibiendo luz con ángulos menores a 53°. Esta reflexión es menor a medida que se disminuyen los ángulos respecto al plano horizontal. En las imágenes 13 y 14 se observa perfectamente el recorrido del rayo reflejado; sin embargo, en las imágenes

15 y 16, apenas se aprecia el rayo reflejado debido a la mayor perpendicularidad de los rayos incidentes respecto al cristal.

Para ángulos de elevación solar⁷ entre 90° y 53°, la iluminación será prácticamente máxima, ya que los rayos penetran directamente en la botella. Sin embargo, para ángulos inferiores a los 53°, los rayos siguen penetrando en el interior de la botella mediante la reflexión, pero en menor medida. Cuanto menor sea el ángulo, más luz se disipa en las sucesivas reflexiones de la botella hasta pasar al interior de la vivienda.

Según lo observado anteriormente se puede deducir que lo ideal es tener una elevación solar entre 53° y 90°.

Está descrito⁷ que el ángulo de la elevación solar (α) se relaciona con la latitud (φ) y el ángulo de declinación (δ) de un momento y lugar mediante la siguiente fórmula:

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos(HRA)]$$

Imagen nº17. -Ángulo de elevación solar⁷.

φ : latitud del lugar del lugar donde se tomen las medidas. En concreto este dato es: 42,57° (León, España)¹.

δ : ángulo de declinación que se calcula mediante la fórmula:

$$\delta = -23.45^\circ \times \cos \left(\frac{360}{365} \times (d + 10) \right)$$

CrD

Imagen nº18. -Ángulo de declinación⁶.

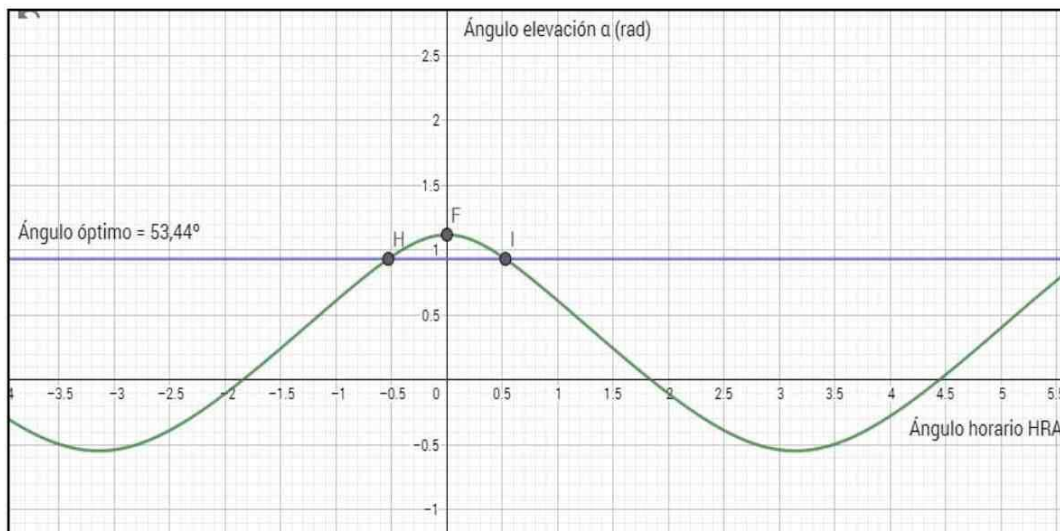
El ángulo de declinación el 7 de agosto (día de la medición) era:

$$\delta = -23,45^\circ \times \cos \left(\frac{360}{365} \times (219 + 10) \right) = 16,3^\circ$$

HRA: es el ángulo horario y varía en función de la hora a la que se realicen las medidas⁸.

A continuación se muestra una gráfica con la variación del ángulo α (rad) de elevación solar en León (España) el día que se realizaron las medidas en función del ángulo horario (rad):

Gráfico nº4. - Ángulo elevación (rad) en función del HRA (rad).



VG

Los puntos H (-0,53 , 0,93) e I (0,53 , 0,93) determinan los puntos del día en los que el ángulo de elevación alcanza el ángulo mínimo óptimo (53°). Por lo tanto, el intervalo de HRA entre -0,53 rad (-30°) y 0,53 rad (30°) se corresponde con el periodo del día en el que la botella proporciona la iluminación máxima.

$$HRA^{\circ} = 180^{\circ} - 15 HSL^{\circ}$$

Imagen nº19. -Ángulo horario⁸.

Utilizando la fórmula anterior (imagen 19) se puede calcular la hora local (HSL) a la que corresponden los ángulos horarios:

$$-30 = 180 - 15x \Rightarrow x = 14 h$$

$$30 = 180 - 15x \Rightarrow x = 10 h$$

Dentro del intervalo 10h - 14h la intensidad luminosa F que proporcionará la botella será máxima gracias a los fenómenos de reflexión y refracción. Si se sale de ese intervalo, la intensidad luminosa F emitida por la botella disminuirá progresivamente.

2.4. Cálculo de errores.

2.4.1. Error de la iluminancia E_v .

La sensibilidad del luxómetro del dispositivo móvil es de ± 1 lux.

A continuación se presentan las desviaciones típicas de los 50 valores de la iluminancia E_v tomados para cada altura H y sus errores relativos:

Tabla nº3. -Desviaciones típicas y errores relativos de la iluminancia E_v .

Experiencias	Altura $H \pm 0,1$ cm	Iluminancia media $E_v \pm 1$ lux	Desviación típica (lux)	$Er E_v \%$
1	1,0	33	0,6	1,8
2	2,0	42	0,5	1,3
3	3,0	53	0,5	1,0
4	4,0	64	0,6	0,9
5	5,0	73	0,7	1,0
6	6,0	77	0,5	0,7
7	7,0	86	0,5	0,6
8	8,0	86	0,9	1,0
9	9,0	89	0,9	1,1
10	10,0	93	0,9	1,0

11	11,0	93	1,0	0,5
12	12,0	99	0,6	0,6
13	13,0	100	0,9	0,9
14	14,0	102	0,9	0,5
15	15,0	110	0,9	0,6
16	16,0	119	0,9	0,4
17	17,0	128	0,5	0,4
18	18,0	129	0,9	0,7
19	19,0	130	1,0	0,8

SEEN

La mayor desviación típica en este caso es menor o igual a la sensibilidad del instrumento de medida, por lo que el error absoluto para la iluminancia E_v es ± 1 lux.

2.4.2. Error de las alturas H .

El error absoluto de las alturas H es la sensibilidad del instrumento de medida: $\pm 0,1$ cm.

2.4.3. Error del cuadrado de las distancias D .

El error de la altura total de la caja es la sensibilidad de la regla: $\pm 0,1 \text{ cm}$.

El error absoluto de la distancia D es:

$$\Delta D = \Delta H + \Delta H_{\text{TotalCaja}} = 0,1 \text{ cm} + 0,1 \text{ cm} = \pm 0,2 \text{ cm}$$

El error absoluto para el cuadrado de las distancias (ΔD^2) viene dado por la siguiente fórmula:

$$\Delta D^2 = 2D\Delta D$$

Se muestran los errores para cada distancia al cuadrado D^2 :

Tabla nº4. -Errores de las distancias al cuadrado D^2 .

Experiencias	Altura $H \pm 0,1$ cm	ΔD^2 (cm)	Er D^2 %
1	1,0	0,4	0,40
2	2,0	0,4	0,41
3	3,0	0,4	0,41
4	4,0	0,4	0,42
5	5,0	0,4	0,42
6	6,0	0,4	0,43
7	7,0	0,4	0,43

8	8,0	0,4	0,43
9	9,0	0,4	0,44
10	10,0	0,4	0,44
11	11,0	0,4	0,45
12	12,0	0,4	0,45
13	13,0	0,4	0,46
14	14,0	0,4	0,47
15	15,0	0,3	0,47
16	16,0	0,3	0,48
17	17,0	0,3	0,48
18	18,0	0,3	0,49
19	19,0	0,3	0,49

El error absoluto del cuadrado de la distancia ΔD^2 es la mayor desviación típica: $\pm 0,4 \text{ cm}^2$.

2.4.4. Error de la intensidad luminosa F .

Para calcular el error absoluto de la intensidad luminosa ΔF se aplica la fórmula:

$$\Delta F = F \left(\frac{\Delta E v}{E v} + \frac{\Delta D^2}{D^2} \right)$$

Se muestran los errores absolutos de la intensidad luminosa ΔF para cada altura H :

Tabla nº5. -Errores intensidad luminosa F .

Experiencias	Altura $H \pm 0,1$ cm	ΔF (lm)	Er F %
1	1,0	0,7	2,2
2	2,0	0,7	1,7
3	3,0	0,7	1,5
4	4,0	0,8	1,3
5	5,0	0,9	1,4
6	6,0	0,7	1,1
7	7,0	0,8	1,0
8	8,0	1,0	1,5
9	9,0	1,0	1,5
10	10,0	1,0	1,5
11	11,0	1,0	1,0
12	12,0	0,8	1,0
13	13,0	1,0	1,3
14	14,0	0,7	1,0
15	15,0	0,9	1,1
16	16,0	0,8	0,9
17	17,0	0,8	0,9
18	18,0	1,0	1,2
19	19,0	1,0	1,3

Se considera el mayor error absoluto, caso más desfavorable posible, como el error de todas las medidas: ± 1 lm.

2.4.5. Error de la altura óptima H .

Se considera la sensibilidad de la regla como el error de la medida en las alturas. Por lo tanto, el error absoluto de la altura H óptima es $\pm 0,1$ cm.

El error relativo de la altura óptima H es:

$$Er = \frac{\Delta H}{H} \times 100 = \frac{0,1}{17,2735} \times 100 = 0,58 \, \%.$$

El error absoluto del porcentaje óptimo de la botella introducida en la vivienda $\Delta \%H$ es:

$$\Delta \%H = \%H \left(\frac{\Delta H_{total \, caja}}{H_{total \, caja}} + \frac{\Delta H}{H} \right) = 57,58 \left(\frac{0,1}{30} + \frac{0,1}{17,2735} \right) = \pm 0,5 \, \%$$

El error relativo de $\%H$ es:

$$Er = \frac{\Delta \%H}{\%H} \times 100 = \frac{0,5}{57,58} \times 100 = 0,91 \, \%.$$

3. -Conclusión.

3.1. Respuesta a la pregunta de investigación.

El estudio concluye que los valores óptimos del proyecto *Litro de luz*⁹ para proporcionar la máxima intensidad luminosa F en el interior de la vivienda son:

1. Altura respecto del tejado (ver imagen 11) a la que se debe colocar la botella:

$17,3 \pm 0,1$ (0,58%) cm



2. Porcentaje de botella introducida en el interior de la vivienda:

$57,6 \pm 0,5$ (0,91%) %
--



Este resultado ha sido determinado con un modelo de botella concreto (ver imagen 3): de cristal lisa, sin estrías y de $30,0 \pm 0,1$ cm de altura. Además, el estudio se ha realizado con la botella rellena totalmente de agua del grifo y en un día totalmente despejado.

3.2. Evaluación de resultados.

Los errores de las alturas H y distancias D se deben a la limitada sensibilidad de la regla: $\pm 0,1$ cm. Si se dispusiera de un aparato de medidas más preciso se podría disminuir este error, aunque esto no se estima relevante para mejorar significativamente los resultados.

El error absoluto en la medición de la de la iluminancia E_v es la sensibilidad del sensor: ± 1 lux. La metodología utilizada presenta una desviación típica en los diferentes valores. Habría también que diseñar un método que provocara menores desviaciones típicas en la toma de valores.

El error de la iluminancia E_v , de las distancias D y de la altura H se arrastra posteriormente al realizar los cálculos para obtener las intensidades luminosas F . Hay que considerar que además de estos errores que tienen la intensidad luminosa F (± 1 lm), la correlación entre estos datos y la función de mejor ajuste no es perfecta ($r^2=0,9959$), aunque se adecua muy bien a la distribución de los mismos, ya que permite representar los cambios de pendiente más evidentes en la gráfica. No se ha tomado una función polinómica de mayor grado, porque a pesar de poder establecer una mejor correlación, la mayor complejidad de los cálculos se ha considerado como una desventaja de mayor peso.

Se ha supuesto que el error absoluto de la altura óptima es el de la regla con la que se mediría: $\pm 0,1$ cm. Con esta consideración el error relativo

experimental de la altura óptima H y del porcentaje de botella introducido $\%H$ es de un 0,58% y 0,91% respectivamente, lo cual es razonablemente bajo.

El tamaño de muestra empleado es bastante amplio, ya que se tomaron 50 valores para 19 alturas distintas. Esto permite que se compensen los errores aleatorios entre sí. Las desviaciones típicas demuestran que aun así los errores aleatorios son bastante bajos al ser siempre iguales o menores que la sensibilidad de los aparatos de medida. No se puede determinar si se han producido errores sistemáticos, ya que no se dispone de un valor bibliográfico real de la altura óptima de la botella. Por lo tanto, no se puede evaluar la exactitud del método ni calcular el error relativo respecto al valor de referencia.

Los análisis realizados con los ángulos de refracción del láser son solo aproximados, ya que la presencia de luz difusa por nubes puede modificar los rayos que incidan sobre la botella. Su fin era únicamente explicar cómo funcionan los fenómenos de refracción y reflexión en la botella. Utilizando programas de simulación como *SunEarthTools*³ se puede comprobar cómo el intervalo de máxima iluminación es verídico.



3.3. Propuestas de mejora.

Al variar la altura H de la botella se modificaba la distancia D entre el sensor y la botella. Se estima que esto podría haber afectado a los resultados y se propone realizar el estudio con una cámara oscura de mayores dimensiones para minimizar esta variación. Además, si se dispusiese de una gran cantidad de sensores se podrían repartir por toda la caja para representar cómo varía la iluminación en un modelo 3D.

Para el presente trabajo se ha elegido un día despejado con el fin de obtener rayos de luz directos del sol (más los dispersados por el cielo despejado). Sin embargo, habría que realizar otro estudio en un día con nubosidad densa, es decir, con luz difusa en todas direcciones para así poder contrastar la altura óptima en diferentes condiciones. También se podría extender el estudio para otros tipos de botella diferentes: de plástico, más grandes, con estrías... para así comprobar en otras condiciones cómo funciona la refracción y determinar la altura óptima para cada una de ellas.


Las medidas realizadas con el láser en un único punto se podrían contrastar con otras medidas en puntos diferentes de la botella. Se podrían incluso introducir los datos en una simulación que permitiese hacer incidir luz sobre la botella y comprobar cómo varía la iluminación en el conjunto de la botella y no solo en un punto aislado.

GEXP

Se ha estudiado mediante los ángulos de incidencia del láser el periodo de iluminación óptimo para una zona y época del año concretas. Sería de gran interés crear un programa en base a estos datos en los que se informara de los periodos del día en los que la botella va a proporcionar más luz en los diferentes lugares del planeta. Para verificar el periodo óptimo de iluminación de la botella se podrían realizar medidas de la luminosidad que proporciona la botella (a una misma altura) en los diferentes momentos del día. Sin embargo, aquí surgiría el inconveniente de la variación del tiempo atmosférico. Para evitar dicha variación, se podría tomar como foco de luz una bombilla situada a la suficiente distancia e ir variando los ángulos respecto a la botella.

4. -Bibliografía.

1. Anónimo. *Coordenadas Google Map de Leon*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en: <http://www.coordenadas.com.es/espana/leon-leon/3773>
2. Anónimo. *Ley de la inversa del cuadrado*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en: http://www.aulaclic.es/fotografia-photoshop/t_10_19.htm
3. Anónimo. *Posición del sol*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es
4. Allum, J. & Talbot, C. (2016). *Física*. España: Vicens Vives.
5. Boix, O. & García, J. *Magnitudes y unidades de medida*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en: <http://recursos.citcea.upc.edu/llum/fotometria/magnitud.html>
6. Bowden, S. & Honsberg, C. *El ángulo de declinación*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en: http://www.pveducation.org/es/node/805#footnote1_71bm5cg
7. Bowden, S. & Honsberg, C. *El ángulo de elevación*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en: <http://www.pveducation.org/es/node/806>

8. Bowden, S. & Honsberg, C. *Solar time*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/2-properties-sunlight/solar-time>
9. Diaz, I. *Journey of light*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en: <http://www.literoflightusa.org/>
10. Fernández, R. *Medida del índice de refracción de un líquido*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en: <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/giboucm/Download/INDREF.pdf>
11. Nicoigot, N. *Un Litro de Luz*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en: <https://www.mundoflaneur.com/wp-content/uploads/2011/12/litro-de-luz-5.png>
12. *Physics Toolbox Suite* (Versión 1.7.8.) [software]. 225 C St SE Apt B Washington D.C. 20003 USA: Vieyra Software. Obtenido de: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.chrystianvieyra.physicstoolboxsuite&hl=es_419 
13. Rothschild, D. *My shelter foundation – global lighting proyect*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en:

<http://sculptthefuturefoundation.org/portfolio/my-shelter-foundation-global-lighting-project/>

14. Tejit, V. (2016, junio). *A Study on the Solar Illumination Provided by a Water Bottle*. Journal of Basic and Applied Engineering Research, 3, 690-696. 2017, febrero 14, De <http://www.krishisanskriti.org/Publication.html> Base de datos.
15. Yávar, J. *'Un Litro de Luz': iluminación autosostenible con botellas recicladas*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en: https://images.adsttc.com/media/images/5441/5c24/c07a/8076/2d00/0439/large_jpg/Un-litro-de-luz-.jpg?1413569567
16. Zobel, G. *Alfredo Moser: Bottle light inventor proud to be poor*. Recuperado el 12 de septiembre de 2017 en: <http://www.bbc.com/news/magazine-23536914>





Para uso a partir de mayo o noviembre de 2018

Página 1/3

Código personal del alumno:

Monografía: formulario de reflexión sobre la planificación y el progreso

Alumno: Este formulario debe ser completado por el alumno durante el transcurso y la finalización de su monografía. Este documento deja constancia de la reflexión sobre su progreso y planificación, así como sobre la naturaleza de los debates con su supervisor. Debe llevar a cabo tres sesiones de reflexión formal con su supervisor: la primera sesión de reflexión formal deberá centrarse en las ideas iniciales y en su planificación del desarrollo de la investigación; la sesión de reflexión intermedia se llevará a cabo cuando haya completado una parte significativa de su investigación; y la última sesión consistirá en una entrevista final que tendrá lugar una vez haya completado y entregado su monografía. Este documento sirve de registro para respaldar la autoría original de su trabajo. La suma de las tres reflexiones no deberá superar las 500 palabras.

Completar este formulario será un requisito obligatorio de la Monografía a partir de la convocatoria de exámenes de mayo de 2018 y deberá enviarse junto con la monografía finalizada para su evaluación, según lo dispuesto en el criterio E.

Supervisor: Debe llevar a cabo tres sesiones de reflexión con cada alumno: una en la primera etapa del proceso, una durante la etapa intermedia y la entrevista final. Se permite celebrar otras sesiones de consulta, pero no es necesario registrarlas en esta hoja. Después de cada sesión de reflexión los alumnos deben dejar constancia de sus reflexiones, y el supervisor debe firmar y fechar este formulario.

Primera sesión de reflexión

Comentarios de los alumnos:

Hemos realizado una lluvia de ideas centrándonos en diversos temas de física que suscitan mi curiosidad, como por ejemplo, el porqué de la fuerza de sustentación en aviones, la termodinámica implicada en el funcionamiento de mi frigorífico y otros. Sin embargo, hemos valorado la limitación impuesta por la falta de disponibilidad de los materiales necesarios para investigar estos temas. Informé a mi supervisor de que he leído en las noticias sobre la existencia del proyecto Litro de luz. Desde el primer momento este asunto me interesó enormemente: ¿cómo una simple botella podía dar luz y ayudar a tanta gente?. Por ello, propuse a mi supervisor múltiples variables a estudiar en el Litro de luz cómo la altura óptima, el tipo de botella, el nivel al que llenar la botella, el líquido que se debe introducir etc. Inicialmente le he propuesto estudiar el tipo de botella idóneo en el proyecto Litro de luz, pero mi supervisor me recomienda estudiar variables de tipo cuantitativo, por lo que finalmente me decido a estudiar experimentalmente la altura óptima de la botella.

SEEN



Fecha: 20/06/2017

Iniciales del supervisor:

Reflexión intermedia

Comentarios de los alumnos:

Le he comentado a mi supervisor que he estado trabajando en la forma de introducir más o menos la botella en una caja variando así su altura. Estoy dudando también entre utilizar la luz solar o una bombilla como fuente luminosa. La bombilla tiene la ventaja de evitar variaciones en el tiempo atmosférico, pero también puede no proporcionarme datos objetivos al estar demasiado cerca de la caja. Se me ha ocurrido que si proyecto un láser sobre la botella podré estudiar más detalladamente la trayectoria de los rayos, ya que con la luz solar o de la bombilla esto me es imposible. De esta forma podré investigar el porqué de la mayor eficiencia de los resultados experimentales. Hemos discutido todos estos asuntos y creo tener las cosas más claras para afrontar la última parte de mi investigación.

SEEN



Fecha: 30/09/2017

Iniciales del supervisor:

Reflexión final (entrevista final)

Comentarios de los alumnos:

Considero que mis objetivos iniciales se han cumplido con bastante éxito, ya que he conseguido obtener un valor concreto de una altura y de un porcentaje de botella introducida óptimo que proporcione una mayor intensidad luminosa. Personalmente esto para mí es un gran logro, ya que a pesar de ser consciente de las limitaciones de mi proyecto, (tiempo, material...) me he dado cuenta que puedo conseguir aportar conocimiento nuevo realmente valioso, en este caso para la gente sin acceso a electricidad. Gracias a la gran cantidad de información disponible, he conseguido estudiar los conceptos físicos implicados y he podido afrontar problemas en la metodología o en las unidades de luminosidad idóneas con las que trabajar. Además, este trabajo me ha dado la oportunidad de aprender a organizarme mejor y de priorizar entre la gran cantidad de opciones bibliográficas existentes. Debido a los estudios de la trayectoria solar que he realizado al investigar el comportamiento del láser en la botella, me he introducido en nuevas áreas de conocimiento como el mundo de la astronomía, que hasta entonces desconocía y que se me presenta como apasionante.

SEEN



Fecha: 20/12/2017

Iniciales del supervisor:

Comentarios del supervisor:

Nota para el supervisor: Al enviar el trabajo de este alumno para que se evalúe, usted se hace responsable de su autoría original. Ningún trabajo de un alumno debe cargarse o enviarse al sistema de carga de trabajos en formato electrónico si su autoría original está en duda o si en este formulario aparecen comentarios contradictorios. Si surge alguna duda sobre la autoría original del trabajo a partir del texto que usted incluya en el espacio a continuación, este componente no se evaluará.

Este alumno tiene un clarísimo perfil de IB. Es curioso, indagador, reflexivo, sagaz y tenaz trabajador. Fue él quien propuso el tema y lo ha desarrollado de manera autónoma, resolviendo las dificultades con ingenio, gran dedicación y sin perder nunca el rigor científico. Es de destacar el entusiasmo que ha puesto en todas las fases del trabajo, su capacidad de organización para compatibilizarlo con el resto de obligaciones escolares sin problema alguno. Estoy convencida de que estamos ante una gran carrera científica e investigadora. En definitiva, acompañar al candidato en su proceso de investigación ha sido una de las experiencias más ricas que he tenido en mi larga carrera como profesor ya que me ha permitido disfrutar y crecer como persona.

