Ley inversa del cuadrado de la distancia a revisión

Rodríguez Martín, JM

Fisioterapeuta

Publicado en Julio de 2019
Revisado en Noviembre del 2022

Sumario

Ley inversa al cuadrado de la distancia

La muy extendida y comentada Ley que influye en la pérdida de potencia de las radiaciones electromagnéticas ambientales, como referencia fundamental se toma la luz ambiente, según la cual: la potencia lumínica emitida en un punto, disminuye en proporción inversa al cuadrado de la distancia del punto de emisión (y a la que yo he contribuido a extender) bien merece una revisión. Ver también en http://www.electroterapia.com/ley-inversa-del-cuadrado-luz.php

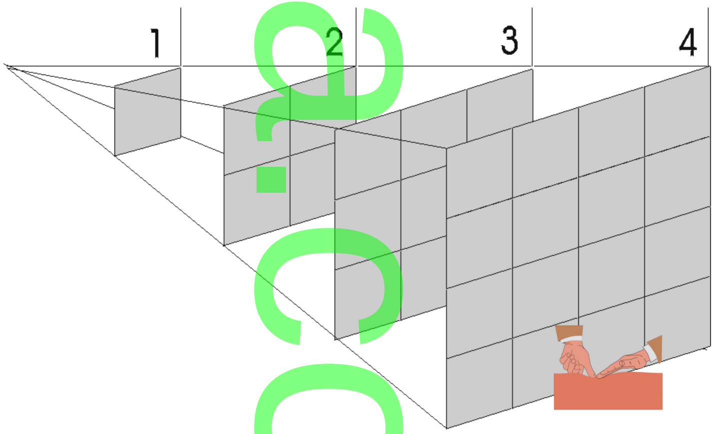


Figura.- . Ley inversa del cuadrado de la distancia

La fórmula muy genérica y sin matices es:

Potencia recibida = Potencia emitida ÷ distancia al cuadrado

$$Wr = \frac{We}{d^2}$$

De esta manera gráfica (figura 1) se representa que: a partir del punto de emisión divergente, a una unidad de distancia (por ejemplo a 1 m) se cubre una unidad de superficie (digamos 1 m²); a 2 m >>> 4 m², a 3 m >>> 9 m² , a 4 m >>> 16 m².

Esa unidad de distancia también puede ser 1 cm, 1 dm, 1 km, etc.

Así pues, si la superficie crece en forma directa al cuadrado de la distancia y la potencia lumínica se reduce en proporción inversa es porque se divide la potencia original de emisión entre las superficies sucesivas a las diferentes distancias, como lo demuestra el siguiente cuadro de cálculos en las primeras seis unidades de distancia aplicados a la progresión del área de la esfera.

Progresión área de la esfera

Unidades en distancia [D]	Área de la esfera 4 * π * r²	Distancia al cuadrado	Progresión al cuadrado S1 * D²
1	12,57	1*1=1	12,57
2	50,27	2*2=4	50,27
3	113,10	3*3=9	113,10
4	201,06	4*4=16	201,06
5	314,16	5*5=25	314,16
6	452,39	6*6=36	452,39

Supóngase un punto luminoso que emite 100 W ¿Cuál es la potencia recibida en los sucesivos primeros cuatro metros?

Calculando se obtiene:

- 100 W ÷ 1² = 100 W porque (1 × 1 = 1)
- 100 W ÷ 2² = 25 W porque (2 × 2 = 4)
- 100 W ÷ 3² = 11,11 W porque (3 × 3 = 9)
- 100 W ÷ 4² = 6,25 W porque (4 × 4 = 16)

Es decir, realmente se divide la potencia de emisión entre la superficie cubierta por el haz según avanza la divergencia del haz. Situación lógica porque, *por principio,* la energía no se crea ni se destruye, pero sí se puede utilizar, concentrar, repartir o transformar.

Las primeras preguntas son:

¿A cuántos grados de divergencia se expande (o tiene que avanzar) el haz?

Normalmente esa circunstancia no se refiere, lo que indica que le faltan datos a la fórmula. Se supone que de media avanzará cubriendo los 360º en todas las direcciones dentro de una esfera con luz ambiental no focalizada.

¿Deben considerarse los grados de divergencia?

Sí tienen que considerarse, porque el comportamiento de un foco no es el mismo que el de una bombilla que emite luz en todas las direcciones.

No se deben comparar el foco de un proyector de cine, con los diferentes focos de un fotógrafo, o con el foco de un teatro, ni con la luz indirecta, etc.

La divergencia es fundamental porque si un haz de rayos no presenta divergencia, **no sufre pérdidas de potencia aunque aumente la distancia**

Según esta Ley ¿A 1 m recibe la misma potencia que la emitida? ¿. . . ?

¿Qué ocurre si la distancia es menor que 1 m?

Se procede al cálculo según el ejemplo anterior:

- 100 W ÷ 0,5 m = 400 W porque (0,5 × 0,5 = 0,25)

¿Pueden ser 400 W a 0,5 m con el haz divergiendo (no convergiendo) y alejándose del punto de misión?

Algo no cuadra.

¿Es igual considerar el punto de emisión como un punto tendente a cero o como un emisor de luz de 50 cm de diámetro?

En fisioterapia es sabido que no es lo mismo emitir con un láser de 1 cm^2 que con otro de 5 cm^2.

Tal vez si el foco emisor se considera a 1 metro del punto de origen de la divergencia (donde 1 × 1 = 1) puede haber lógica y coherencia, pero entonces la fuente de emisión ya posee una superficie de 1 m^2 y los cálculos pueden considerarse buenos si la iluminación se produce en el doble sentido: desde el metro hacia el origen el haz converge y hacia mayores distancias es divergente. **Lo que implica cambiar la definición**.

Luminotecnia en fisioterapia

En fisioterapia se emplean las radiaciones de infrarrojos, diversos láseres, ultravioletas tipo A, y otras luces polarizadas, focalizadas y potenciadas.

La medida de potencia de los haces luminosos, habitualmente es en vatios [W] y no se usan otras expresiones como el *lumen, candela, Lux*.

En el complejo mundo de la fotometría se diferencian entre unidades de medida, la apreciación subjetiva del ojo humano, las intensidades luminosas emitidas y las intensidades recibidas. Así por ejemplo, existen conceptos como Energía luminosa en *lumen por segundo*; Flujo luminoso en *lumen o candelas* *por estereorradián*; Intensidad luminosa en *lumen o candela entre estereorradián*; Luminancia en *candelas por metro cuadrado*; Iluminancia en *lux o lumen por metro cuadrado*; Emitancia luminosa en *lux o lumen partido metro cuadrado*; Exposición luminosa en *lux por segundo*; Eficiencia luminosa en *lumen por vatios*; etc.

Sin afán de complicar el tema, y dado que algunos de los referidos parámetros pueden convertirse en vatios [W], en este trabajo se hablará de vatios porque en la práctica así es y así se aplica en fisioterapia.

No confundir los vatios [W] en energía eléctrica consumida por las lámparas con la energía lumínica generada en vatios [W].

Interior de una esfera iluminada

El origen de este tema se basa en plantear la hipótesis de un punto de luz que emite en todas las direcciones dentro de una esfera y localizado en el centro de la misma. Por ejemplo el caso de ***las estrellas en el universo***.

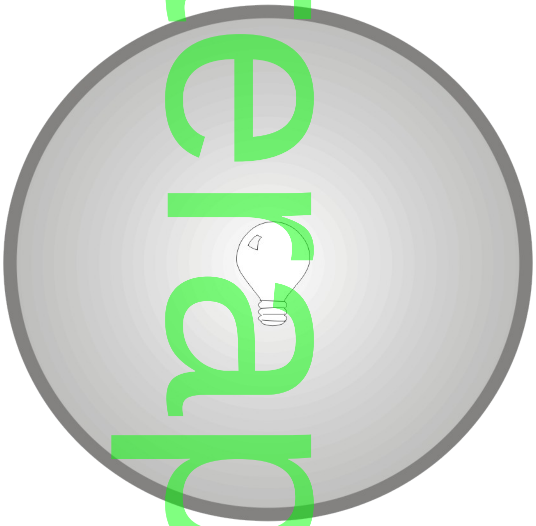


Figura.- . Esfera iluminada por luz dispersa en todas las direcciones

Su fórmula reza:

La potencia recibida es igual a la potencia emitida entre $4\pi r^2$ (donde "r" de la esfera será la distancia "d", entre el punto emisor y la zona iluminada).

$$Wr = \frac{We}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

El divisor de esta ecuación es la fórmula para calcular el área de la esfera, corroborando que realmente se divide la potencia emitida entre la superficie iluminada, sin entrar en detalles de posibles constantes por pérdidas debidas a imperfecciones del sistema o influencias atmosféricas; otra cosa sería trabajando con grandes números, grandes masas de aire o distancias de kilómetros.

Se traslada aquí el ejemplo anterior con sus 100 W de emisión y los cuatro primeros metros de alejamiento, incluyendo 0,5 m.

- 100W ÷ 4 × π x $0,5^2$ = 31,83 W que recibe la cara interna de la esfera
- 100W ÷ 4 × π x 1^2 = 7,95 W que recibe la cara interna de la esfera
- 100W ÷ 4 ××π x 2^2 = 1,98 W que recibe la cara interna de la esfera
- 100W ÷ 4 × π x 3^2 = 0,88 W que recibe la cara interna de la esfera
- 100W ÷ 4 × π x 4^2 = 0,49 W que recibe la cara interna de la esfera

¿Son comparables estos resultados con los cálculos anteriores?

Nada que ver con los anteriores, y estos tienen más lógica, sobre todo porque se refieren a toda la superficie de la esfera.

¿Qué se ilumina realmente, una superficie plana o un casquete esférico?

En la teoría y según la fórmula, se ilumina un casquete esférico por su interior, pero en la realidad cotidiana se iluminan todo tipo de superficies tanto cóncavas, como planas, convexas e irregulares.

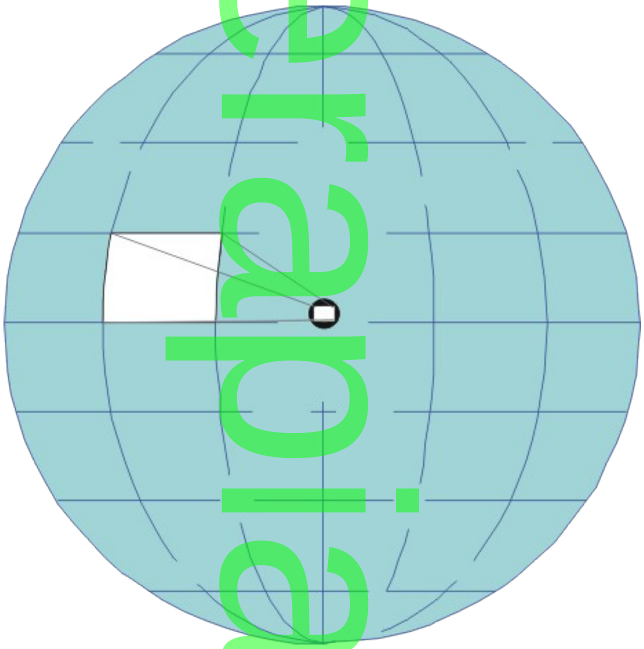


Figura.- . Esfera iluminada desde su interior, en el centro, por un foco rectangular.

La fórmula de aplicación práctica en fisioterapia tiene que considerar:

- ***Tamaño de la superficie del foco,***
- ***Tamaño de la superficie receptora,***
- ***La forma de la superficie receptora,***
- ***La distancia que separa ambos puntos y***

- ***La divergencia del haz***

El haz también puede converger y concentrar más energía en la zona receptora que la emitida (figura 4).

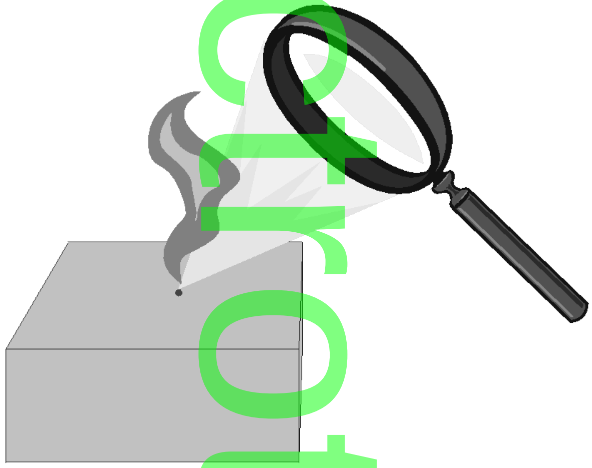


Figura.- . Lupa convergente que concentra toda su potencia en un pequeño punto.

Una lupa con lente convergente ofrece una superficie de 45 cm^2, la cara en la que recibe luz solar, alcanza una potencia de 35 W (0,77 W/cm^2) que emite por la cara opuesta. Buscando el enfoque de máxima convergencia, se consigue en 0,5 cm^2 ¿Cuánta potencia recibe ese punto?

Se han concentrado en un pequeño punto los 35 W (70 W/cm^2). Esa gran densidad de energía puede generar un cúmulo energético tal, que en dicho punto puede iniciarse la combustión.

Pero esa acumulación de energía según transcurre el tiempo implica hablar de trabajo y entrar en la Ley de Joule. En este escrito, la medida de energía se limitará a potencia en [W] que es la unidad de trabajo en 1 segundo. Si aquí se planteara la dosificación, sí sería obligatorio detenerse en la ley de Joule.

Si en lugar de iluminar toda la esfera con luz que se dispersa en todas las direcciones, se repliega el haz hasta una divergencia próxima a 0º se ilumina únicamente una superficie semejante a la del foco. **Como en este caso no aparece pérdida de potencia con la distancia**, la zona receptora recibirá, en teoría, la misma potencia que la superficie emisora (eludiendo ciertas imperfecciones dependientes de la precisión del sistema y de otras pequeñas pérdidas energéticas propias de toda máquina).

Precisamente en esto consiste el LÁSER, en dominar con precisión la divergencia y convergencia del haz para utilizar la energía luminosa, por ejemplo, como herramienta de corte de diferentes materiales.

Para próximos cálculos, la convergencia del haz, será considerada como divergencia con un valor de signo negativo.

Figura.- . Haz focalizado concentrando toda su potencia en un punto porque se controla la divergencia.

Iluminación de un plano o de un casquete esférico

Todo foco o punto luminoso que emita luz, ilumina de forma homogénea una superficie cóncava del casquete esférico, porque la distancia es siempre la misma en todos los puntos de dicha superficie y porque los rayos siempre llegan con total perpendicularidad al plano iluminado. Pero la práctica cotidiana en general, y particularmente en fisioterapia, el objeto a iluminar será plano, irregular o convexo.

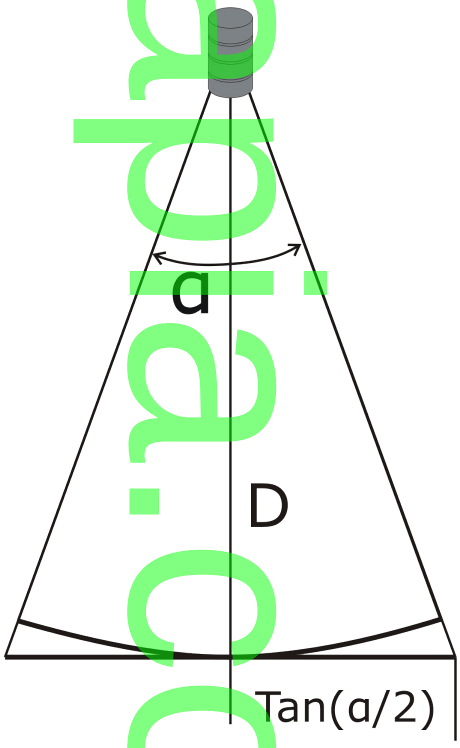


Figura.- . Haz divergente sobre plano cóncavo y sobre plano recto.

Así pues, este trabajo se centrará en superficies planas circulares y cuadradas, sin olvidar la concavidad del casquete esférico, sobre todo para entender los cambios que se producen en la iluminación del plano. Más adelante se entrará en detalles sobre cálculos con el casquete esférico.

En la (figura 6) un foco con cierta divergencia (ángulo α) ilumina una superficie cóncava, pero si esa curvatura no existiera, se iluminaría una zona plana de mayor radio y con menor recepción energética en los bordes que en el centro.

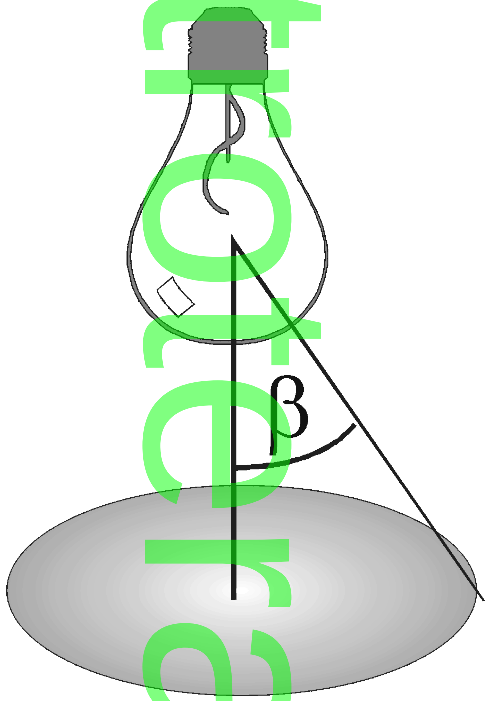


Figura.- . Superficie plana iluminada afectada por la Ley del coseno

Ello es debido a la oblicuidad de los rayos en el borde y a mayor lejanía en el borde. La distancia es la misma en el centro para ambos planos, pero la superficie plana sufre el efecto de la **Ley del coseno**.

En la práctica cotidiana de fisioterapia se observa el hecho de que ante una lámpara de infrarrojos es perfectamente apreciable la diferencia de energía recibida entre el centro del foco y el borde (figura 7); circunstancia inevitable y debe tenerse en cuenta a la hora de compensar posibles pérdidas energéticas. Pero si la lámpara de IR fuera del modelo focalizado por lente de Fresnel, el comportamiento es diferente y el efecto de la ley del coseno se reduce mucho porque la divergencia es muy poca.

No se profundizará en este efecto en cuanto a cálculos porque no es el objeto de este trabajo. No obstante y partiendo de la figura 7, su fórmula es:

$$Wr = \frac{We}{Sr \ldots en \ldots cm^2} \times \cos(\beta)$$

Siendo [Sr] en cm^2 la superficie iluminada o receptora, cm^2 en este caso, pero pueden ser metros u otra unidad de superficie.

También procede recordar en este punto, que el efecto de menor energía en los bordes puede evitarse mediante lentes. Por ejemplo las ampliadoras de revelado en fotografía tienen (o deben tener) un filtro de dispersión homogénea de la luz antes de superar el negativo, formado por dos lentes plano-convexas opuestas entre ellas; así como los objetivos de cámaras, proyectores, etc.

Energía recibida en un círculo plano

La situación más habitual en la práctica es considerar el campo iluminado como círculo plano. Para ello se propone (figura 8) la siguiente metodología de uso y cálculos:

- Considerar la superficie de emisión y de recepción como iguales, cuando la divergencia es 0º.
- Con divergencia a 0º no hay pérdida de potencia aunque se alejen las superficies.
- Los grados de divergencia se consideran a partir de la superficie cubierta en 0º (analizar figura 8)
- El radio total del círculo [r_t] está formado por la suma de dos vectores: uno [r_1] o radio del círculo, equivalente al círculo de emisión, y el resto formado con el valor obtenido mediante la distancia y la tan(α÷2).

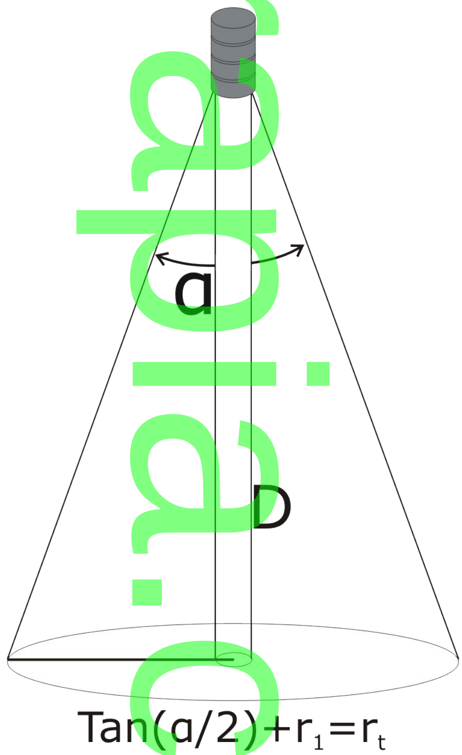


Figura.- . Iluminación de superficie plana circular

- Si la distancia es cero, la energía recibida será coincidente al 100% con la emitida aunque hubiera divergencia, pues no da lugar a que tenga efecto dicha divergencia.
- Si la distancia es “X” pero la divergencia es 0º, la energía recibida será al 100% coincidente con la emitida.
- Si la divergencia fuese negativa (convergencia) la densidad de energía será superior al 100%

La superficie de emisión es un parámetro que se consigue en las características técnicas del cabezal de emisión, porque en ellas se incluye (o debe incluirse).

Suponiendo que el foco emisor tuviera una superficie tendente a cero, la fórmula general sería:

$$Wr=\frac{We}{S_1+S_{divergente}}$$

Pero atención al siguiente detalle:

Si el foco posee su propia superficie de emisión y coincide con la receptora (porque la divergencia sea de 0º); por simple división, la energía recibida sería 1; cuando tiene que ser la misma. Es decir, hay que dividir entre 1 para obtener el mismo resultado en el dividendo que en el cociente.

¿Cómo se consigue esto? Hallando la razón aritmética entre ambas superficies y usar como divisor esta razón o ratio:

$$Ratio=\frac{S_{receptora}}{S_{emisora}}$$

Si se utiliza como ejemplo el punto de emisión del proyector en una sala de cine comparado con la superficie de proyección, tal vez no merezca la pena considerar la superficie de emisión comparándola con la superficie de la pantalla; pero si se toma como ejemplo una aplicación de láser, con un cabezal de 8 cm^2, una divergencia de 15º y a 15 cm, y la superficie receptora es de unos 50 cm^2 (razón de 1:5 entre emisora y receptora). Es muy importante tener en cuenta la superficie de emisión [Se], fundamentalmente porque puede darse el caso de aplicar directamente el cabezal a distancia de 0 cm.

Formulación definitiva

La potencia recibida es igual a la potencia emitida dividida entre la razón aritmética (Ratio) que se obtuvo previamente entre la superficie receptora total y la superficie emisora.

$$W_{recibida}=\frac{W_{emitida}}{\left(\frac{S_{receptora}+S_{emisora}}{S_{emisora}}\right)}$$

Para hallar dichas superficies se requiere saber el radio total del círculo.

El coincidente con el emisor, se sabe o puede calcularse previamente, si se conoce la superficie del emisor. Así pues, el radio de la superficie de emisión es:

$$r_1 = \sqrt{\frac{S_1}{\pi}}$$

La parte agregada por la divergencia se halla mediante la fórmula:

$$r_{divergente} = d \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Siendo ɑ el ángulo de divergencia en grados sexagesimales, y el uso de ɑ÷2, porque hay que hallar el radio considerando la bisectriz de ɑ, tomando la altura o bisectriz cono el cateto adyacente del triángulo rectángulo. **La distancia en un haz de luz focalizada debe tomarse de la referida bisectriz del ángulo**.

El área del círculo de recepción será:

$$S_{total} = \pi \cdot (r_{divergente} + r_1)^2$$

En la muestra de la siguiente hoja de cálculo se aplican estas fórmulas para diferentes valores, diferentes distancias y un barrido en sucesivos ángulos de divergencia.

Para acceder a esta hoja de cálculo y trabajar con ella, ver el enlace en http://www.electroterapia.com/ley-inversa-del-cuadrado-luz.php

Está basada en casos aplicables a equipos de láser terapéuticos de diodo o de gas con los que pueden modificarse datos para los tratamientos; pero es extensible a otras doctrinas.

Las columnas A, B y C son para introducir los datos de potencia de emisión [We] en vatios, Superficie de emisión [Se] o [S_1] en cm^2 y distancia [d] en cm lineales respectivamente. Entrando el valor en las primeras celdas, el resto de las columnas toman el mismo valor que el introducido.

En este ejemplo se han introducido 5 W de potencia, cabezal de 5 cm^2 y distancia de 20 cm.

La columna D tiene una gama de ángulos para obtener los resultados correspondientes. Los valores negativos se refieren a haces convergentes. Estos valores también pueden modificarse.

Es importante prestar atención a la fila resaltada en negrita correspondiente al ángulo 0º de divergencia.

La columna E hace la conversión de los grados sexagesimales de la anterior en radianes, paso necesario, porque las hojas de cálculo trabajan con radianes, con el fin de aplicar las operaciones con grados a esta columna en lugar de a la anterior.

La columna F halla el radio de la superficie de emisión, que será utilizado como una parte de la superficie receptora como [r_1].

La columna G calcula el radio a sumar a r_1 y que depende de la divergencia correspondiente en cada valor de grados.

La columna H suma ambas porciones de radio para obtener el radio total [r_t].

La columna I calcula la superficie total del círculo receptor.

La columna J halla la razón entre la superficie receptora y la emisora.

La columna K calcula la potencia recibida en toda la superficie. Es importante poner atención a los resultados en 0º y a los valores correspondientes a -7º. Así mismo, deben analizarse las tendencias de resultados en esta columna.

Si se prueba a modificar valores en las entradas, se observará cómo ese aumento en máximas potencias, cambia de unos grados a otros, indicando el punto de mayor convergencia del haz. Obsérvese también los valores en la columna de superficie receptora.

La columna L calcula la potencia por cada cm^2 de la superficie receptora, parámetro muy útil en fisioterapia.

Analizando con detalle este ejemplo se aprecia la coherencia de resultados y la lógica matemática.

Es recomendable dedicarse a introducir parámetros nuevos y analizar resultados.

Esta metodología hace que no de por suficientemente precisos los resultados y sugerencia que aporto en mi libro de *Electroterapia en fisioterapia*, por falta de variables a considerar. Con este trabajo se aportan las correcciones correspondientes y no basar únicamente en la tan manida (y simple) Ley del inverso al cuadrado de la distancia.

Basándose en estos resultados, se proponen algunas calculadoras que permiten introducir valores y ver resultados de forma inmediata.

POTENCIA RECIBIDA SEGÚN DIVERGENCIA DEL HAZ PARA CÍRCULO PLANO

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
We	Se EN cm²	D EN cm	Gº	CONVERSION	RADIO (1) CIRCULO DE INICIO	VALOR DE RADIO A SUMAR	RADIO (t) CIRCULO RECEPCIÓN	SUPERFICIE RECEPCIÓN EN cm²	RAZON Sr / Se	POTENCIA RECIBIDA	w/cm²
INPUT	INPUT	INPUT	INPUT	RADIANES(D9)	RAIZ(B9/PI)	C9*TAN(E9/2)	F9 + G9	PI * H9²	I9 / B9	A9 / J9	K9 /
5	5	20	-10	-0,174533	1,261565	-1,749773	-0,488208	**0,748793**	0,149759	**33,387**	**44,5**
5	5	20	-9	-0,157080	1,261565	-1,574034	-0,312469	**0,306737**	0,061347	**81,503**	**265,**
5	5	20	-8	-0,139626	1,261565	-1,398536	-0,136971	**0,058940**	0,011788	**424,159**	**7.196**
5	5	20	-7	-0,122173	1,261565	-1,223252	0,038312	**0,004611**	0,000922	**5.421,392**	**1.175.6**
5	5	20	-6	-0,104720	1,261565	-1,048156	0,213409	**0,143079**	0,028616	**174,728**	**1.221**
5	5	20	-5	-0,087266	1,261565	-0,873219	0,388346	**0,473793**	0,094759	**52,766**	**111,**
5	5	20	-4	-0,069813	1,261565	-0,698415	0,563149	**0,996318**	0,199264	**25,092**	**25,1**
5	5	20	-3	-0,052360	1,261565	-0,523718	0,737846	**1,710341**	0,342068	**14,617**	**8,5**
5	5	20	-2	-0,034907	1,261565	-0,349101	0,912463	**2,615664**	0,523133	**9,558**	**3,6**
5	5	20	-1	-0,017453	1,261565	-0,174537	1,087027	**3,712205**	0,742441	**6,735**	**1,8**
5	**5**	**20**	**0**	**0,000000**	**1,261565**	**0,000000**	**1,261565**	**5,000000**	**1,000000**	**5,000**	**1,0**
5	5	20	1	0,017453	1,261565	0,174537	1,436102	**6,479202**	1,295840	**3,858**	**0,5**
5	5	20	2	0,034907	1,261565	0,349101	1,610666	**8,150081**	1,630016	**3,067**	**0,3**
5	5	20	3	0,052360	1,261565	0,523718	1,785283	**10,013021**	2,002604	**2,497**	**0,2**
5	5	20	4	0,069813	1,261565	0,698415	1,959980	**12,068526**	2,413705	**2,072**	**0,1**
5	5	20	5	0,087266	1,261565	0,873219	2,134784	**14,317217**	2,863443	**1,746**	**0,1**
5	5	20	6	0,104720	1,261565	1,048156	2,309720	**16,759833**	3,351967	**1,492**	**0,0**
5	5	20	7	0,122173	1,261565	1,223252	2,484817	**19,397233**	3,879447	**1,289**	**0,0**
5	5	20	8	0,139626	1,261565	1,398536	2,660101	**22,230393**	4,446079	**1,125**	**0,0**
5	5	20	9	0,157080	1,261565	1,574034	2,835599	**25,260416**	5,052083	**0,990**	**0,0**
5	5	20	10	0,174533	1,261565	1,749773	3,011338	**28,488522**	5,697704	**0,878**	**0,0**
5	5	20	11	0,191986	1,261565	1,925781	3,187346	**31,916058**	6,383212	**0,783**	**0,0**
5	5	20	12	0,209440	1,261565	2,102085	3,363649	**35,544496**	7,108899	**0,703**	**0,0**
5	5	20	13	0,226893	1,261565	2,278712	3,540277	**39,375435**	7,875087	**0,635**	**0,0**
5	5	20	14	0,244346	1,261565	2,455691	3,717256	**43,410604**	8,682121	**0,576**	**0,0**
5	5	20	15	0,261799	1,261565	2,633050	3,894615	**47,651864**	9,530373	**0,525**	**0,0**
5	5	20	16	0,279253	1,261565	2,810817	4,072381	**52,101208**	10,420242	**0,480**	**0,0**
5	5	20	17	0,296706	1,261565	2,989020	4,250585	**56,760768**	11,352154	**0,440**	**0,0**
5	5	20	18	0,314159	1,261565	3,167689	4,429254	**61,632812**	12,326562	**0,406**	**0,0**
5	5	20	19	0,331613	1,261565	3,346852	4,608417	**66,719752**	13,343950	**0,375**	**0,0**
5	5	20	20	0,349066	1,261565	3,526540	4,788104	**72,024145**	14,404829	**0,347**	**0,0**

Calculadora para círculo plano

CALCULADORA PARA POTENCIA RECIBIDA EN UNA SUPERFICIE ILUMINADA

CÍRCULO PLANO

INTRO W EMITIDA EN W	INTRO SUPERFICIE emis. En cm²	INTRO DISTANCIA EN cm	INTRO GRADOS SEXAG.
0 a 100	0,1 a 10	0 a 1000	-50 a +50
5	5	0	0
	Radio SUP.emi	Aumento al radio	Conver. a radianes
	1,261565	0,000000	0,000000
W recibida	Superficie receptora	Radio + aumento	Razón Sre / Sem
5,000	5,000000	1,261565	1,000000
W/cm²			
1,000			

Entrando valores en las cuatro celdas superiores y recuadradas, automáticamente se presentan las respuestas en las celdas con negrita. El resto de celdas son para analizar el proceso y simplemente se aplican las fórmulas antes descritas.

La sugerencia es para trabajar con centímetros, pero perfectamente pueden introducirse en metros y sus correspondientes conversiones, es decir, los centímetros en decimales del metro.

Energía recibida en un cuadrado perfecto y plano

Cuando la superficie iluminada o irradiada es cuadrada perfecta, es porque la fuente de luz tiene la misma forma, y así la proyecta con la divergencia correspondiente. Igual que la superficie circular plana también se ve afectada por la pérdida de potencia en los bordes.

El método es el mismo que para el círculo plano, excepto que en lugar de hallar radios se hallarán diámetros (equivalente al lado del cuadrado) y no se aplicará π (Pi). Porque el área del cuadrado es igual a:

$$S_{cuadrado} = 2r \cdot 2r = 4 \cdot r^2$$

O la forma más habitual:

$$S_{cuadrado} = L^2$$

Para hallar L_t o el valor total del lado, se extrae de:

$$L_t = d \cdot \tan(\frac{\alpha}{2}) \cdot 2 + \sqrt{S_1}$$

De la raíz cuadrada de S_1 se obtiene directamente el lado de la superficie de emisión, que se suma a la resultante del producto de la distancia por la tangente de (α÷2) o radio, y esto multiplicado por 2 para saber el diámetro o parte del lado correspondiente a la divergencia.

En la hoja de cálculo se han modificado las fórmulas para obtener resultados del cuadrado perfecto y puede analizarse en la tabulación de resultados:

Las columnas A, B y C son para introducir los datos de potencia de emisión [We] en vatios, superficie de emisión [Se] o [S_1] en cm^2 y distancia [d] en cm lineales respectivamente. Entrando el valor en las primeras celdas, el resto de las columnas toman el mismo valor que el introducido.

En este ejemplo se han introducido 5 W de potencia, cabezal de 5 cm^2 y distancia de 20 cm. Se han mantenido parámetros semejantes a la superficie circular para poder comparar resultados entre ambas tabulaciones.

La columna D tiene una gama de ángulos para obtener los resultados correspondientes. Los valores negativos se refieren a haces convergentes. Estos valores también pueden modificarse.

Es importante prestar atención a la fila resaltada en negrita correspondiente a la divergencia de 0º.

La columna E hace la conversión de los grados sexagesimales de la anterior en radianes, paso necesario, porque las hojas de cálculo trabajan con radianes, con el fin de aplicar las operaciones con grados a esta columna en lugar de a la anterior.

La columna F halla el lado de la superficie de emisión cuadrada, que será utilizada como una parte de la superficie receptora como [L_1].

La columna G calcula el resto del lado a sumar a L_1 y que depende de la divergencia correspondiente en cada valor de grados.

La columna H suma ambas porciones de lado para obtener el lado total [L_t].

La columna I calcula la superficie total del cuadrado receptor.

La columna J halla la razón entre la superficie receptora y la emisora.

La columna K calcula la potencia recibida en toda la superficie. Es importante poner atención a los resultados en 0º y a los valores correspondientes a -6º (en el círculo era a -7º). Así mismo, deben analizarse las tendencias de resultados en esta columna.

La columna L calcula la potencia por cada cm^2 de la superficie receptora, parámetro muy útil en fisioterapia.

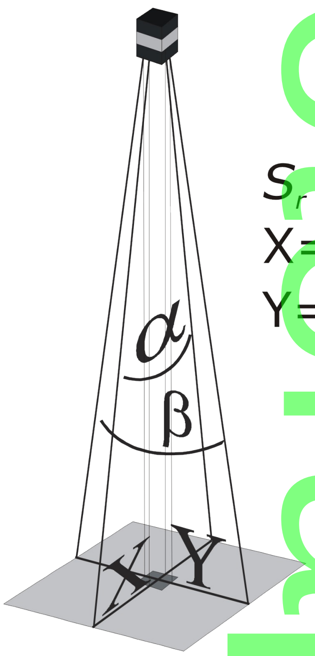
Otra formulación para calcular el área del **cuadrado perfecto y del rectángulo**, sería la expuesta en la figura 9.

En este caso se sustituye la expresión de lado por el de **X** e **Y** (largo y ancho). Se mantiene el concepto de considerar en la superficie receptora la superficie igual a la de emisión y la divergencia se agrega a partir del límite de la superficie de emisión.

L_X y **L_Y** son los lados, o el largo y ancho, de la superficie de emisión o su equivalente a la "pequeña" de recepción; las cuales se suman a los cálculos de las tangentes.

Si la superficie receptora [Sr] es rectangular, ello implica la existencia de dos ángulos con diferente divergencia, lo que obliga a operar de forma específica para cada ángulo [α y β], calcular el ancho y largo y averiguar la superficie.

Si el resultado se espera en cm^2, se da por supuesto que otros valores lineales, como la distancia, operarán en cm; pero perfectamente son aplicables a otras unidades de superficie o de longitud.



$$S_r \text{ en cm}^2 = X \cdot Y$$
$$X = 2 \cdot (d \cdot \tan(\alpha/2)) + L_X$$
$$Y = 2 \cdot (d \cdot \tan(\beta/2)) + L_Y$$

Figura.- . Fórmulas aplicables al cuadrado y al rectángulo.

POTENCIA RECIBIDA SEGÚN DIVERGENCIA DEL HAZ PARA CUADRADO PLANO

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
We	Se EN cm²	D EN cm	Gº	CONVERSION	LADO (1) CUADRADO DE INICIO	VALOR DE LADO A SUMAR	LADO (t) CUADRADO RECEPCIÓN	SUPERFICIE RECEPCIÓN EN cm²	RAZON Sr / Se	POTENCIA RECIBIDA	w/cm²
INPUT	INPUT	INPUT	INPUT	RADIANES(D9)	RAIZ(B9)	C9*TAN(E9/2))*F9 + G9		H9²	I9 / B9	A9 / J9	K9 /
5	5	20	-10	-0,174533	2,236068	-3,499547	-1,263479	**1,596378**	0,319276	**15,660**	**9,8**
5	5	20	-9	-0,157080	2,236068	-3,148068	-0,912000	**0,831745**	0,166349	**30,057**	**36,1**
5	5	20	-8	-0,139626	2,236068	-2,797072	-0,561005	**0,314726**	0,062945	**79,434**	**252,**
5	5	20	-7	-0,122173	2,236068	-2,446505	-0,210437	**0,044284**	0,008857	**564,542**	**12.74**
5	5	20	-6	-0,104720	2,236068	-2,096311	0,139757	**0,019532**	0,003906	**1.279,953**	**65.53**
5	5	20	-5	-0,087266	2,236068	-1,746438	0,489630	**0,239738**	0,047948	**104,281**	**434,**
5	5	20	-4	-0,069813	2,236068	-1,396831	0,839237	**0,704319**	0,140864	**35,495**	**50,3**
5	5	20	-3	-0,052360	2,236068	-1,047437	1,188631	**1,412844**	0,282569	**17,695**	**12,5**
5	5	20	-2	-0,034907	2,236068	-0,698203	1,537865	**2,365030**	0,473006	**10,571**	**4,4**
5	5	20	-1	-0,017453	2,236068	-0,349075	1,886993	**3,560744**	0,712149	**7,021**	**1,9**
5	**5**	**20**	**0**	**0,000000**	**2,236068**	**0,000000**	**2,236068**	**5,000000**	**1,000000**	**5,000**	**1,0**
5	5	20	1	0,017453	2,236068	0,349075	2,585143	**6,682963**	1,336593	**3,741**	**0,5**
5	5	20	2	0,034907	2,236068	0,698203	2,934271	**8,609944**	1,721989	**2,904**	**0,3**
5	5	20	3	0,052360	2,236068	1,047437	3,283505	**10,781404**	2,156281	**2,319**	**0,2**
5	5	20	4	0,069813	2,236068	1,396831	3,632899	**13,197953**	2,639591	**1,894**	**0,1**
5	5	20	5	0,087266	2,236068	1,746438	3,982506	**15,860352**	3,172070	**1,576**	**0,0**
5	5	20	6	0,104720	2,236068	2,096311	4,332379	**18,769509**	3,753902	**1,332**	**0,0**
5	5	20	7	0,122173	2,236068	2,446505	4,682573	**21,926488**	4,385298	**1,140**	**0,0**
5	5	20	8	0,139626	2,236068	2,797072	5,033140	**25,332503**	5,066501	**0,987**	**0,0**
5	5	20	9	0,157080	2,236068	3,148068	5,384136	**28,988923**	5,797785	**0,862**	**0,0**
5	5	20	10	0,174533	2,236068	3,499547	5,735615	**32,897274**	6,579455	**0,760**	**0,0**
5	5	20	11	0,191986	2,236068	3,851562	6,087630	**37,059238**	7,411848	**0,675**	**0,0**
5	5	20	12	0,209440	2,236068	4,204169	6,440237	**41,476658**	8,295332	**0,603**	**0,0**
5	5	20	13	0,226893	2,236068	4,557424	6,793492	**46,151538**	9,230308	**0,542**	**0,0**
5	5	20	14	0,244346	2,236068	4,911382	7,147450	**51,086047**	10,217209	**0,489**	**0,0**
5	5	20	15	0,261799	2,236068	5,266100	7,502168	**56,282523**	11,256505	**0,444**	**0,0**
5	5	20	16	0,279253	2,236068	5,621633	7,857701	**61,743471**	12,348694	**0,405**	**0,0**
5	5	20	17	0,296706	2,236068	5,978040	8,214108	**67,471571**	13,494314	**0,371**	**0,0**
5	5	20	18	0,314159	2,236068	6,335378	8,571446	**73,469680**	14,693936	**0,340**	**0,0**
5	5	20	19	0,331613	2,236068	6,693704	8,929772	**79,740834**	15,948167	**0,314**	**0,0**
5	5	20	20	0,349066	2,236068	7,053079	9,289147	**86,288256**	17,257651	**0,290**	**0,0**

Calculadora para un cuadrado perfecto

CALCULADORA PARA POTENCIA RECIBIDA
EN UNA SUPERFICIE ILUMINADA
CUADRADO PLANO

INTRO W EMITIDA EN W	INTRO SUPERFICIE emis. En cm²	INTRO DISTANCIA EN cm	INTRO GRADOS SEXAG.
0 a 100	0,1 a 10	0 a 1000	-50 a +50
5	5	5	15
	Lado SUP.emi	Aumento al radio	Conver. a radianes
	2,236068	1,316525	0,261799
W recibida	Superficie receptora	Lado + aumento	Razón Sre / Sem
1,981	12,620917	3,552593	2,524183
W/cm²			
0,157			

Introduciendo los datos en las celdas remarcadas, en la esquina inferior derecha y en negrita, se presentan los datos de la potencia recibida y de la densidad de energía por cada cm^2.

Puede darse la circunstancia de encontrar superficies rectangulares y helicoidales; pero es fácil de resolver aplicando la fórmula reglada para hallar la superficie que corresponda.

Energía recibida en un casquete esférico

La irradiación de luz con divergencia realmente ilumina el casquete de una esfera por su cara interna, formando un cono desde el origen del haz hasta la superficie receptora. Si la superficie iluminada en la cara interna de la esfera fuera igual a una superficie equivalente al cuadrado del radio de la esfera, se **estaría iluminando un estereorradián**. Pero en este trabajo no tiene más trascendencia que citarlo por curiosidad.

Como en lo expuesto anteriormente se parte de un foco, con cierto grado de divergencia y una distancia hasta la zona iluminada, que en este caso será un casquete esférico.

Se dice más arriba que considerar las zonas iluminadas como casquetes esféricos no es práctico, ya que en la realidad cotidiana sirve para poco, salvo en grandes pantallas. Pero por completar el trabajo, y dado que los cálculos ya se hicieron, procede explicar el método seguido.

Lo primero es averiguar la superficie de un casquete esférico partiendo de la distancia y del ángulo de divergencia. La fórmula para calcular el área del casquete esférico es:

$$S_{casquete} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h$$

Siendo [R] el radio de la esfera, para diferenciarlo de [r] como radio de la base del casquete esférico; y [h] es la altura entre la base del casquete y su cúpula.

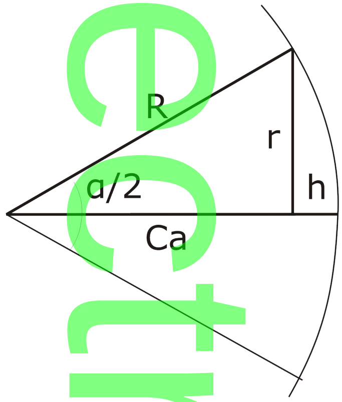


Figura.- . Proceso para hallar la altura [h]

El radio [R] se obtiene de la distancia y [h] se obtiene por vía de trigonometría restando a la longitud del radio el cateto adyacente [Ca]. A÷2 se toma del ángulo de divergencia.

Supóngase una aplicación láser de 10 W, 8 cm² de superficie emisora, con 20º de divergencia y a una distancia de 25 cm ¿Cuál será la superficie del casquete esférico? ¿Cuánta energía recibirá la superficie?

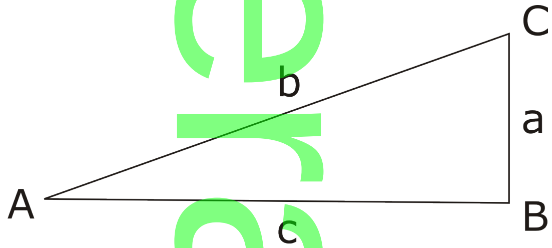


Figura.- . Trigonometría del triángulo rectángulo

Partiendo de la figura 11 (con sus ángulos y sus lados) las leyes de trigonometría utilizables en este caso son dos:

- Para hallar los ángulos: la suma de los ángulos del triángulo rectángulo es de 180º
- Para hallar los lados: $\frac{Lc}{seno(\hat{C})} = \frac{Lb}{seno(\hat{B})}$

Ángulo A = 10º (α÷2)

Ángulo B = 90º

Ángulo C = 80º

Lado b = radio = 25 cm

Seno(C) = 0,984807

Seno(B) = 1

Seno(A) = 0.173648

Lado c = INCÓGNITA

Resolviendo la incógnita del lado [c] se opera como sigue:

$$\left(\frac{c}{seno(C)}=\frac{b}{seno(B)}\right)=\left(\frac{c}{0,984807}=\frac{25}{1}\right)=(c=0,984807\cdot 25)=24,620\ \mathrm{cm}$$

Volviendo a la figura 10, el cateto adyacente [Ca] es igual a 24.62 cm

La altura [h] se halla:

$$h=R-Ca=25-24,620=0,38\,cm$$

Ya con todas las variables, el área de este casquete esférico será:

$$S_{casquete}=2\cdot\pi\cdot R\cdot h=2\cdot 3,1416\cdot 25\cdot 0,38=59,69\,cm^2$$

¿Cuánta energía recibirá la superficie?

La superficie de emisión es de 8 cm^2.

$$\frac{10}{\frac{59,69+8}{8}}=0,164\,W$$

Otra sugerencia de cálculo (encontrada en la programación de un láser) se basa en trabajar con radianes y considerar como radio del casquete esférico, la línea curva que va desde el centro de la cara curva hasta el borde. Se calcula el área y da un valor muy próximo al sistema que se acaba de explicar.

Este sistema de trabajar con radianes puede ser útil cuando la divergencia es poca, pero en ángulos muy amplios las diferencias son importantes.

En una hoja de cálculo se han aplicado fórmulas y datos para hallar las superficies en los primeros 45º (del 1 al 45) del círculo plano y del casquete esférico con el sistema establecido y con la ocurrencia del "radio curvado", con el fin de comparar las superficies obtenidas con cada formulación.

Las tres columnas resaltadas en negrita, de izquierda a derecha son: las superficies del círculo plano, del casquete esférico por la fórmula adecuada y del casquete por el método de considerar el radio curvo del casquete y tomarlo como la proyección del mismo a círculo plano.

En los ángulos de divergencia bajos, las diferencias son mínimas, pero observando los valores altos en grados (cercanas a los 45º) las diferencias se ponen de manifiesto de forma clara.

SUPERFICIES DE CÍRCULO PLANO Y DE CASQUETE CON DOS MÉTODOS DIFERENTES

núm. `Pi	Distancia INTRO	α en º en radia	A o α en grados	RADIO TAN(α/2) radianes	SUPERFICI CÍRCULO PLANO	LONGITU DEL ARCO / 2	SUPERFICIE CASQUETE ESFERICO	ALTURA I CASQUE ESFÉRIC	SUPERFICIE CASQUETE ESFÉRICO
3,141593	25,00	0,017453	1	0,218172	0,149536	0,218166	0,149529	0,000952	0,149528
3,141593	25,00	0,034907	2	0,436377	0,598236	0,436332	0,598115	0,003808	0,598100
3,141593	25,00	0,052360	3	0,654648	1,346374	0,654498	1,345759	0,008567	1,345682
3,141593	25,00	0,069813	4	0,873019	2,394404	0,872665	2,392460	0,015229	2,392217
3,141593	25,00	0,087266	5	1,091524	3,742968	1,090831	3,738218	0,023794	3,737625
3,141593	25,00	0,104720	6	1,310194	5,392888	1,308997	5,383034	0,034262	5,381804
3,141593	25,00	0,122173	7	1,529066	7,345173	1,527163	7,326908	0,046630	7,324629
3,141593	25,00	0,139626	8	1,748170	9,601019	1,745329	9,569838	0,060899	9,565952
3,141593	25,00	0,157080	9	1,967543	12,161809	1,963495	12,111827	0,077067	12,105602
3,141593	25,00	0,174533	10	2,187217	15,029117	2,181662	14,952873	0,095133	14,943386
3,141593	25,00	0,191986	11	2,407226	18,204706	2,399828	18,092976	0,115095	18,079087
3,141593	25,00	0,209440	12	2,627606	21,690538	2,617994	21,532137	0,136953	21,512467
3,141593	25,00	0,226893	13	2,848390	25,488768	2,836160	25,270355	0,160704	25,243264
3,141593	25,00	0,244346	14	3,069614	29,601752	3,054326	29,307630	0,186346	29,271194
3,141593	25,00	0,261799	15	3,291312	34,032049	3,272492	33,643963	0,213878	33,595951
3,141593	25,00	0,279253	16	3,513521	38,782424	3,490659	38,279354	0,243298	38,217205
3,141593	25,00	0,296706	17	3,736275	43,855852	3,708825	43,213802	0,274603	43,134604
3,141593	25,00	0,314159	18	3,959611	49,255521	3,926991	48,447307	0,307791	48,347773
3,141593	25,00	0,331613	19	4,183565	54,984840	4,145157	53,979870	0,342860	53,856317
3,141593	25,00	0,349066	20	4,408175	61,047437	4,363323	59,811491	0,379806	59,659814
3,141593	25,00	0,366519	21	4,633476	67,447170	4,581489	65,942168	0,418627	65,757824
3,141593	25,00	0,383972	22	4,859508	74,188130	4,799655	72,371904	0,459320	72,149882
3,141593	25,00	0,401426	23	5,086307	81,274648	5,017822	79,100696	0,501882	78,835501
3,141593	25,00	0,418879	24	5,313914	88,711296	5,235988	86,128546	0,546310	85,814171
3,141593	25,00	0,436332	25	5,542367	96,502900	5,454154	93,455454	0,592600	93,085362
3,141593	25,00	0,453786	26	5,771705	104,654544	5,672320	101,081419	0,640748	100,648520
3,141593	25,00	0,471239	27	6,001969	113,171576	5,890486	109,006441	0,690752	108,503069
3,141593	25,00	0,488692	28	6,233200	122,059618	6,108652	117,230521	0,742607	116,648410
3,141593	25,00	0,506145	29	6,465440	131,324571	6,326819	125,753659	0,796309	125,083924
3,141593	25,00	0,523599	30	6,698730	140,972628	6,544985	134,575854	0,851854	133,808967
3,141593	25,00	0,541052	31	6,933114	151,010277	6,763151	143,697106	0,909239	142,822876
3,141593	25,00	0,558505	32	7,168635	161,444319	6,981317	153,117416	0,968458	152,124964
3,141593	25,00	0,575959	33	7,405337	172,281867	7,199483	162,836783	1,029507	161,714523
3,141593	25,00	0,593412	34	7,643267	183,530369	7,417649	172,855208	1,092381	171,590822
3,141593	25,00	0,610865	35	7,882470	195,197610	7,635815	183,172690	1,157076	181,753109
3,141593	25,00	0,628319	36	8,122992	207,291726	7,853982	193,789229	1,223587	192,200611
3,141593	25,00	0,645772	37	8,364883	219,821220	8,072148	204,704826	1,291909	202,932531
3,141593	25,00	0,663225	38	8,608190	232,794971	8,290314	215,919481	1,362036	213,948053
3,141593	25,00	0,680678	39	8,852964	246,222252	8,508480	227,433193	1,433963	225,246338
3,141593	25,00	0,698132	40	9,099256	260,112742	8,726646	239,245962	1,507684	236,826524
3,141593	25,00	0,715585	41	9,347117	274,476539	8,944812	251,357789	1,583195	248,687731
3,141593	25,00	0,733038	42	9,596601	289,324185	9,162979	263,768673	1,660489	260,829055
3,141593	25,00	0,750492	43	9,847762	304,666674	9,381145	276,478615	1,739561	273,249572
3,141593	25,00	0,767945	44	10,100656	320,515475	9,599311	289,487614	1,820404	285,948334
3,141593	25,00	0,785398	45	10,355339	336,882553	9,817477	302,795671	1,903012	298,924377

Un ejemplo en fotografía

Para insistir en la demostración de que la divergencia tiene mucho que ver en la pérdida o ganancia de energía, se plantea el siguiente ejemplo:

Los aficionados a fotografía saben que al tomar fotos con objetivos gran angular (unos 18 mm) la cámara pide menos apertura que con objetivos de menor angular o menor divergencia (unos 55 mm) ¿por qué?

Supóngase que se hacen dos fotografías en iguales condiciones a un fondo blanco, bien iluminado, con una cámara a 3 m de distancia, pero cambiando de objetivo: una foto con el objetivo gran angular (18 mm) y la otra con el objetivo de 55 mm. ¿Cuánta luz recibe la "película" en cada caso?

La zona a fotografiar emite luz de forma homogénea con una potencia de 0.01 W/cm^2

La superficie receptora en la cámara (clásica de 35 mm) es de 24 por 36 mm, o 22.3 × 14.9 en sensores CMOS de las digitales.

Tomando la clásica de celuloide, 2,4 × 3,6 = ***8,64 cm²*** para operar en centímetros.

Las zonas a fotografiar son de:

250 cm x 150 cm con el objetivo de 18 mm:

$$250 \times 150 = 37.500\ cm^2$$

90 cm × 60 cm con el objetivo de 55 mm:

$$90 \times 60 = 5.400\ cm^2$$

Luz emitida por la superficie grande con 18 mm:

$$37.500 \times 0,01 = 375\ W$$

Luz emitida por la superficie pequeña con 55 mm:

$$5.400 \times 0,01 = 54\ W$$

Luz recibida con superficie grande:

$$\frac{375}{8,64} = 43,40\ W$$

Luz recibida con superficie pequeña:

$$\frac{54}{8,64} = 6,25\ W$$

Por concentrar mucha más energía de la superficie amplia, debido al gran angular de 18 mm, los ajustes de entrada de luz piden cerrar diafragma; mientras que con el de 55 mm, los ajustes piden apertura de diafragma.

¿Puede calcularse la divergencia de estos dos objetivos?

Perfectamente, partiendo de los datos antes manejados. Dado que es una superficie rectangular, requiere hallar el largo y alto en dos ángulos, pero como el objeto de esta propuesta es practicar, será suficiente con encontrar los parámetros de la divergencia vertical de la fotografía con el gran angular, y a voluntad del lector, practicar con los otros.

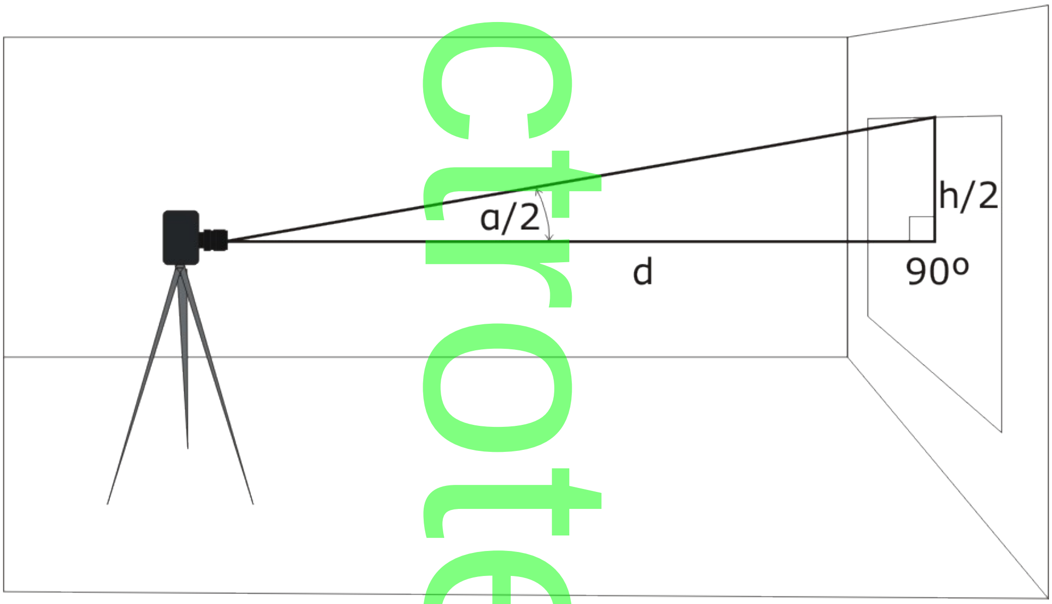


Figura.- . Como hallar la divergencia de un objetivo fotográfico

En la figura 12 se representa lo expuesto con un triángulo rectángulo que marca la mitad de la divergencia. De este triángulo ya se conoce el ángulo de ***90º***, el cateto opuesto a α÷2 ***[h÷2 = 150 ÷ 2 = 75 cm]*** y el cateto adyacente a α÷2 ***[d= 300 cm]***.

El objetivo del ejercicio es encontrar el valor del ángulo α ÷ 2, y con los tres valores del párrafo anterior ya se puede proceder según la trigonometría. Ver figura 11.

Sabiendo que [h] o cateto opuesto es igual a d x tan(α÷2) y se dispone de ambos catetos, es fácil obtener el valor de la tangente.

$$\tan(\alpha/2)=\frac{h}{d}=\frac{75}{300}=0,250000$$

Una vez conocido el valor de la tangente (de la mitad del ángulo), mediante la tangente inversa se obtiene el ángulo de α÷2.

$$\alpha/2=\tan^{-1}(0,250000)=14,03°$$

$$\alpha=14,03\cdot 2=28°$$

Lógicamente, el ángulo de divergencia es el doble de α÷2.

Si se desean averiguar los otros ángulos, se procede de igual manera pero con valores específicos.

Siguiendo en el mundo de la fotografía, nada tiene que ver el destello de un flash pequeño de sobre-cámara con superficie de emisión de unos 20 cm^2 direccional y divergente, con un foco difusor o “ventana” de 1 m^2, o incluso mayor, tratando de dispersar la luz y evitar las sombras que puede producir la luz muy direccional.

Conclusión

¿Es cierta la “tan extendida” ley del inverso del cuadrado para la luz?

En cuanto que la potencia emitida realmente se divide entre la superficie receptora, es útil, aunque no se exprese así en la definición.

En cuanto que no se considera el grado de divergencia, es errónea; pues no toda la iluminación es ambiental y sin focalizar.

En cuanto que no considera la superficie del foco emisor, puede ser útil a groso modo y con puntos de emisión muy pequeños comparados a la superficie receptora.

Teniendo en cuenta la superficie del emisor y aplicando las variantes aquí sugeridas, hacia los 53º de divergencia se cumple esta ley del inverso del cuadrado, en la forma cuadrada y plana.

Esta ley también se aplica para la gravitación universal, para los campos eléctricos, para el magnetismo, pero en condiciones naturales y ambientales.

Por ejemplo, en el magnetismo, cuando se redirigen las líneas de fuerza magnética, se eliminan o se concentran, esta ley ya no es aplicable.

El lector decidirá.

Bibliografía

Sería una pedantería incluir bibliografía por simplemente aplicar razonamientos y fórmulas propias de lo aprendido en bachillerato y refrescar conceptos básicos de la física.