

Radiometría y Fotometría 1

La Radiometría es un sistema de lenguaje, matemática e instrumentación usada para describir la propagación de la radiación electromagnética, incluyendo los efectos sobre la radiación por reflexión, refracción, absorción, transmisión y esparcimiento por sustancias materiales en fase sólida, líquida y gaseosa. La Fotometría es el sistema usado para el mismo propósito cuando la radiación es detectada por el ojo humano.

Muchos textos introductorios al tema tienden a causar confusión más que entendimiento. La naturaleza fundamental de la base de las cantidades fotométricas fácilmente puede ser oscurecida por un grupo de definiciones y unidades inconsistentes o mal aplicadas.

Mucha confusión para un lector novato en el tema se presenta por conceptos nuevos definidos en términos de cantidades que no son familiares. El fin de este documento es superar estos problemas al definir primero las cantidades básicas de la radiometría y luego mostrar una simple ecuación que representa la conversión de todas las cantidades radiométricas relevantes a sus correspondientes fotométricas.

Los estudiantes de ingeniería analizando estos temas pueden estar confrontados con multitud de terminología radiométrica y fotométrica que aparecen en la literatura, incluyendo nombres de las cantidades y el uso de sistemas de unidades que no son familiares.

Estos nombres, algunos no usados más, incluyen: lumen, luminancia, iluminancia, lux, pie-candela. Candela, nit, pie-Lambert, stilb, apostilb y muchos más. Afortunadamente se ha dado una tendencia de uniformizar la nomenclatura y las unidades aunque se debe contar siempre con referencias de anteriores denominaciones y unidades para efectos de obtener factores de conversión con unidades de uso corriente. Se debe tener presente el Sistema Internacional actual (SI) usado consistentemente hoy día.

Se ha dado una normalización de terminología, símbolos y nomenclatura radiométrica y fotométrica. La norma primaria en Estados Unidos es "USA Standard Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering ANSI/IES RP-16-1986" publicado por ANSI (American National Standards Institute) y IES (Illuminating Engineering Society of North America).

Esta publicación está en acuerdo general con la norma internacional primaria para terminología en este campo, el Vocabulario Internacional de Iluminación publicado por CIE (Comisión Internacional de Iluminación) que se refiere constantemente.

La tendencia hacia uniformizar la normalización fue promovida desde 1976 hasta 1984 por F. Nicodemus para aumentar la comprensión de conceptos radiométricos y normalización de términos y unidades sensibles.

Esto culminó con una serie de reportes en NBS (National Bureau of Standards) ahora NIST (National Institute of Standards and Technology).

Muchas publicaciones y libros de texto sobre óptica física tratan con radiación electromagnética y su propagación en el espacio mencionan solo una cantidad radiométrica (probablemente Irradiancia) llamándola intensidad y relacionándola al cuadrado de la amplitud del campo oscilante (eléctrico o magnético). Estos textos raramente explican en detalle como se relaciona esta cantidad con conceptos normalizados internacionalmente en radiometría y fotometría. Esto se discute más adelante.

Se espera que este documento ayude a superar problemas al presentar en forma concisa los conceptos fundamentales de radiometría y fotometría, el concepto básico de propiedades ópticas de los materiales y alguna información de los usos de las cantidades radiométricas y fotométricas en diversas áreas de aplicación como:

- Estudio de transferencia radiativa en el espacio libre así como en medios de esparcimiento y absorción incluyendo cuerpos naturales de agua y atmósferas planetarias.
- Estudio de radiación electromagnética producida en una variedad de reacciones nucleares y otros procesos subatómicos como aceleradores de partículas.
- Estudio de iluminación tanto eléctrica como desde el cielo y el sol. Esto incluye bioluminiscencia y luz producida por reacciones químicas.
- Diseño de fuentes de radiación y equipo de medición o instrumentos. La radiación de microondas o RF no se incluye aquí pero la radiometría se usa en estos campos.
- Diseño de equipo de despliegue, fotografía, vídeo o captura de imágenes.

Unas pocas aplicaciones más específicas se pueden mencionar para mostrar la variedad de campos donde los conceptos de radiometría y fotometría se usan:

- Diseño y uso de instrumentación para medición de turbidez de líquidos.
- Mediciones de radiación solar para estudio de cultivos y para el diseño de sistemas de recolección y conversión de energía solar.
- Mediciones astronómicas de radiación electromagnética general desde estrellas, planetas y otros cuerpos celestes.

Sensado ambiental remoto incluyendo mediciones desde aviones y satélites de radiación que sube desde la superficie y atmósfera de la tierra, y mediciones en tierra de radiación que baja desde la atmósfera.

Conceptos fundamentales de Radiometría

Radiación electromagnética

Radiación es la propagación de energía en una variedad de formas a través del espacio.

Radiometría es un sistema, de conceptos, terminología, relaciones matemáticas, instrumentos de medición y unidades de medición pensadas para describir y medir radiación y su interacción con la materia.

Fotometría es un sistema similar para radiación intentada para la detección por el ojo humano.

Aunque los conceptos de la radiometría pueden usarse para describir radiación nuclear, incluyendo flujo de campos de partículas energéticas, generalmente se usan solo para radiación electromagnética. Esto último será de lo tratará este documento.

En radiometría y fotometría interesa saber como es la distribución de la radiación sobre el espectro electromagnético. Se inicia este estudio con el espectro electromagnético, **figura 1**, que establece las diferentes porciones de interés en diferentes campos de estudio.

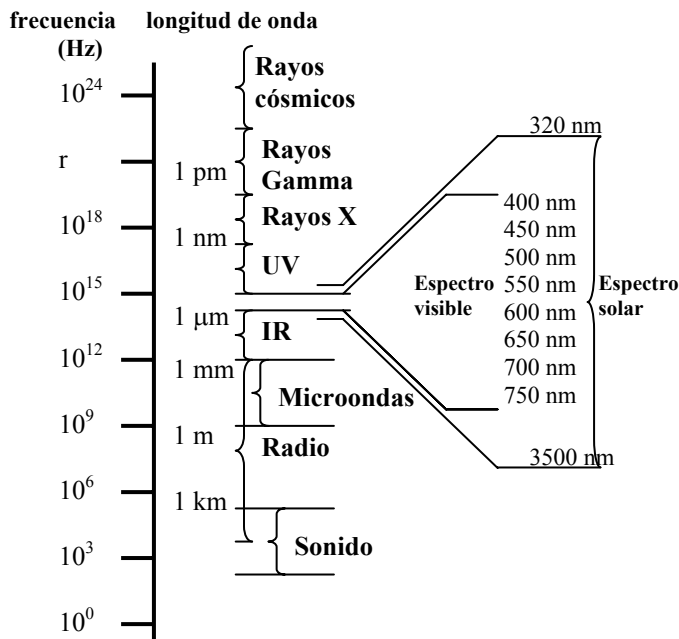


Figura 1. Espectro electromagnético y campos de estudio

La Comisión Internacional de la Iluminación (CIE – *Commission Internationale de l’Eclairage*) ha normalizado la terminología mostrada en la **tabla 1**. Para las porciones del espectro que contienen y rodean la porción visible que trata con la mayoría de los campos de la radiometría y fotometría. El ámbito espectral de la radiación visible no tiene límites precisos ya que estos límites varían de persona a persona.

Nombre	Ámbito de longitud de onda
UVC	100 a 280 nm
UVB	280 a 315 nm
UVA	315 a 400 nm
VIS	aprox. 360 - 400 a 760 - 800 nm
IRA (NIR)	780 a 1 400 nm
IRB	1,4 a 3 μm
IRC (FIR)	3 a 1 μm

Tabla 1. Vocabulario CIE para región espectral

La radiación monocromática de una sola frecuencia ν (en Hz) o longitud de onda λ (unidades de metros) se relacionan por la ecuación:

$$c = \nu \lambda$$

Donde c es la velocidad de la luz en el medio que se propaga la radiación.

En el vacío es $2,99792458 \times 10^8$ m/s, no muy diferente al valor al nivel del mar.

La conversión entre longitudes de onda y frecuencia se ilustra con el ejemplo del ojo humano que es más responsivo a 555 nm que corresponde a $5,4 \times 10^{14}$. El ojo no es del todo responsivo a radiación bajo 360 nm o sobre 830 nm.

El conocimiento de la distribución espectral de la radiación es crucial para muchas aplicaciones en radiometría y fotometría.

Las propiedades ópticas de los materiales, tal como transmitancia, reflectancia y absorbancia generalmente dependen de la longitud de onda de radiación incidente sobre ellos o atravesando por ellos.

Interesa conocer por ello las variaciones espectrales de transmisión, reflexión, refracción y absorción de las propiedades de los materiales.

Hay cuatro cantidades fundamentales en radiometría que son centrales tanto a radiometría como a fotometría. Se presentan junto con sus símbolos y unidades en (SI)

- Flujo radiante Φ en Watts,
- Irradiancia E , en watts/m²,
- Intensidad radiante I , en watts/sr,
- Radiancia L , in watts/(sr m²).

El flujo radiante frecuentemente se llama potencia radiante, ya que dimensionalmente esto es. Hay otra cantidad adicional, la energía radiante, que se requiere para definir las anteriores. Se usa sola en pocas aplicaciones, pero es un concepto importante que no se puede dejar pasar. Sin embargo, para mantener pocas definiciones importantes usadas en este campo se concentra este estudio en solo las cuatro anteriores.

Las cuatro cantidades fotométricas que corresponden a las cantidades radiométricas anteriores son:

- Flujo luminoso,
- Iluminancia,
- Intensidad luminosa
- Luminancia

Convenciones de terminología

Antes de empezar con definiciones de cantidades radiométricas básicas, alguna información preliminar en notaciones y el concepto de ángulo sólido son necesarios y hace las definiciones más entendibles.

Símbolos, unidades y otra nomenclatura conforma con (USA Standard Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering) reporte RP-16 de 1986, como norma paralela de ANSI e IESNA.

La terminología usada en esta norma considera prácticas comunes en un gran número de campos que tratan con radiación óptica y está en acuerdo general con la terminología normalizada por CIE. CIE fue fundada en 1913 siguiendo las funciones de CIP (Commission Internationale de Photometrie) establecida en 1903 y a crecido como cuerpo internacional de consenso de todos los países para desarrollar normas y procedimientos de mediciones en todos los campos de ingeniería de iluminación.

Es la autoridad primaria de términos y conceptos de radiometría y fotometría y sus reportes y normas se citan en documentos.

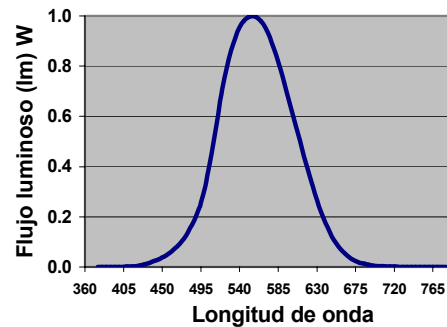


Figura A.1 Relación normalizada entre flujo luminoso y flujo radiante en el espectro visible definido por CIE - sensibilidad pico del ojo a 555 nm donde 1 W equivale a 685 lm.

Radiometría y Fotometría 2

La ciencia de la medición de energía en ondas electromagnéticas es la *radiometría* y su aplicación a la luz es la *fotometría*. El sistema de unidades en radiometría se basa en el sistema internacional (SI). Por ejemplo, la densidad de energía se mide en julios por metro cúbico.

En fotometría, sin embargo, se ha dado una plétora de unidades, surgiendo de la necesidad de definir la iluminación o visibilidad de una superficie en términos que dependen de las características espectrales del ojo humano.

Se inicia a continuación con los conceptos básicos de radiometría.

El *flujo radiante* Φ de una fuente es la razón de emisión de energía, medida en watts. Este se relaciona a la energía total y hay una dependencia en la dirección, que conduce a la definición importante de *intensidad radiante* I , la cual es el flujo radiante por unidad de ángulo sólido (esteradián) medido en watts por esteradián:

$$\text{Intensidad radiante} = I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Para un radiador isotrópico $\Phi = 4\pi I$.

La *irradiancia* S es el flujo radiante a través de una superficie por unidad de área perpendicular a una dirección especificada, medida en watts por metro cuadrado.

Radiancia es la irradiancia por esteradián. El término *exitancia radiante* puede ser usado para radiación dejando una superficie.

La energía recibida desde o cayendo sobre una superficie iluminada depende del ángulo θ a la dirección de la radiación. Una superficie perfectamente difusa emite igualmente bien en todas las direcciones, pero el área proyectada reduce la radiancia por el factor $\cos \theta$, esta es la Ley de coseno de Lambert.

El flujo radiante total desde una superficie plana, con área A y radiancia (exitancia) S , es la integral

$$2\pi A \int_0^{\pi/2} S \cos\theta \sin\theta d\theta$$

Para una superficie iluminada obedeciendo la Ley de Lambert, la integral es $\pi A S_0$.

La irradiancia de una superficie plana bajo una superficie hemisférica con radiancia L es πL . Es útil verificar que esta es la misma para una superficie plana bajo una placa paralela infinita.

En radiometría comúnmente interesa el espectro de la radiación y cada uno de los términos ya definidos pueden requerir la restricción “por unidad de banda de frecuencia” u ocasionalmente “por unidad de ámbito de longitud de onda”.

Por ejemplo, la intensidad radiante puede ser la integral de un espectro de radiación electromagnética con una intensidad radiante específica $X(\nu)$ o $Y(\lambda)$:

$$I = \int X(\nu) d\nu \quad \text{o} \quad I = \int Y(\lambda) d\lambda$$

Las unidades fotométricas involucran la respuesta del ojo humano usualmente expresadas en términos de longitud de onda.

La curva de respuesta normal ha sido definida por el CIE (Commission International de l'Éclairage); esta permite la relación entre flujo luminoso (incluyendo la respuesta del ojo) al flujo radiante graficado en la figura A.1.

La respuesta real de un ojo individual puede diferir de esta, especialmente a bajos niveles de iluminación donde el pico es normalmente a 510 nm en vez de 555 nm.

Los equivalentes fotométricos de las cantidades radiométricas ya definidas incluyen un factor $V(\lambda)$, la eficiencia luminosa; por ejemplo el flujo luminoso está relacionado al flujo radiante por:

$$\text{Flujo luminoso} = k \int P(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad \text{lm}$$

Las unidades fotométricas más útiles se muestran en la tabla A.1. La palabra candela recuerda que la luz originalmente se midió en términos de la potencia de candela, hoy se define como la intensidad luminosa de $1/60 \text{ cm}^{-2}$ de un radiador de cuerpo negro a la temperatura de congelación del platino. En este sistema la constante $k = 683 \text{ lm W}^{-1}$.

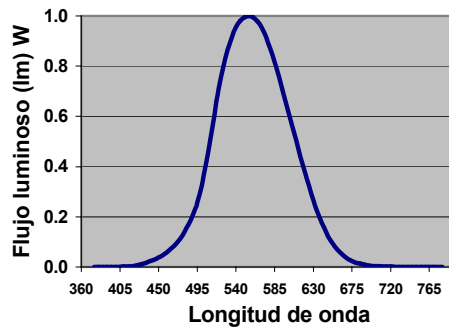


Figura A.1 Relación normalizada entre flujo luminoso y flujo radiante en el espectro visible definido por CIE - sensibilidad pico del ojo a 555 nm donde 1 W equivale a 685 lm.

Tabla A.1 (1) Cantidades y unidades radiométricas (Versión antigua)

Cantidad	Símbolo	Unidades	Abreviación
Energía radiante	Q	Joule \equiv watt \cdot seg	J \equiv W \cdot s
Densidad energía radiante	U	Joule/m ³	J/m ³
Flujo radiante	Φ	Watt \equiv Joule/seg	W \equiv J/s
Irradiancia	E	Watt/m ²	W/m ²
Exitancia radiante	M	Watt/m ²	W/m ²
Radiancia	L	Watt/m ² esteradián	W/sr x m ²
Intensidad radiante	I	Watt/esteradián	W/sr

Tabla A.1 (2) Cantidades y unidades fotométricas (Versión antigua)

Cantidad	Símbolo	Unidades	Abreviación
Energía luminosa	Q _v	Talbot \equiv lumen \cdot seg	Talbot \equiv lm \cdot s
Densidad luminosa	U _v	lumen \cdot seg /m ³	lm s/m ³
Flujo luminoso	F _v	lumen	lm
Iluminancia	E _v	lumen/m ² = lux	lm/m ² = lx
Exitancia luminosa	M _v	lumen/m ² = lux	lm/m ² = lx
Luminancia (brillantez)	L _v	nit = candela/ m ²	nt = cd/ m ²
Intensidad luminosa	I _v	candela = lumen/esteradián	cd = lm/sr