



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Juan Gabriel Cruz Briceño

**Factores de percepción visual,
concepto y cómo se relacionan**

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 27 de diciembre de 2017



Factores de Percepción Visual, Concepto y como se Relacionan

Juan Gabriel Cruz Briceño

Tesis para el grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica
aprobada por la comisión de la

Escuela de Ingeniería Eléctrica de la

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

conformada por

Sr. Enrique Piraino Davidson

Profesor Guía

Sr. Iván Kopaitic Otero

Segundo Revisor

Sr. Sebastian Fingerhuth Massmann

Secretario Académico

Valparaíso, 12 de enero de 2018

A mi hijo, por ser mi fuerza y templanza...

A mis padres, por su amor y apoyo...

Agradecimientos

El recorrido hasta esta instancia a durado largos 24 años, dentro de ese tiempo he aprendido de gran cantidad de gente y de gran cantidad de situaciones, principalmente agradecer a quienes participaron en mi formación educacional, en todo tipo de instancias, me siento muy agradecido por la labor realizada en mi persona por parte de profesores de educación básica de la Escuela Básica la Palma, que aún recuerdo con mucho afecto, profesores de educación media del colegio Diego Echeverría Castro que siempre depositaron confianza en sus alumnos, y también agradecer a la planta docente de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso quienes fueron parte de la finalización de este exitoso proceso.

Agradecer en gran parte a mis padres quienes con mucho esfuerzo y con un propósito claro, me brindaron la oportunidad de desarrollarme como persona.

Finalmente agradecer a cada una de las personas que se cruzaron en mi camino y que logré aprender de ellas tanto en lo académico, como en lo cotidiano de la vida.

Valparaíso, 12 de enero de 2018

J. C

Resumen

Se comienza explicando a grandes rasgos que es lo que se conoce como luz, que porción del espectro de ondas electromagnéticas es el que los seres humanos son capaces de percibir, ya que existe un espectro infinito y las ondas visibles se encuentran dentro de una banda definida.

Se exponen las propiedades principales de la luz como la reflexión y refracción, que son propiedades muy importantes, ya que la base de los sistemas ópticos se encuentra en el principio de la refracción, ya sea dentro del sistema visual o en los sistemas ópticos utilizados por algún tipo de luminaria. La reflexión es la otra propiedad importante y se encuentra relacionada directamente con el material donde incide la luz, afectando de manera directa a la luminancia percibida por el observador.

Se exponen las magnitudes fotométricas, estas unidades se despegan de la radiometría y son utilizadas especialmente para el estudio de la radiación visible. Es importante la fotometría, ya que permite cuantificar a través de sus unidades la radiación visible, lo que permite hacer relaciones entre la cantidad de iluminación y los demás factores de percepción visual.

Se presentan las componentes que contiene una tarea visual, y dentro de esto se encuentra una componente fisiológica, se realiza un análisis del sistema visual, su funcionamiento y sus principales características.

Los factores de percepción visual desarrollados son el tiempo, el tamaño visual, contraste y luminancia de fondo. Se muestran las relaciones de umbral obtenidas empíricamente, entre estos factores y su luminancia de fondo.

Principalmente se estudian 5 modelos de rendimiento visual, cada uno de ellos expuesto por distintos investigadores, todos estos modelos fueron construidos de manera empírica relacionando los factores de percepción visual.

La información que este contiene principalmente es obtenida de libros de ingeniería dedicados a la iluminación, centrándose en estudios realizados de forma empírica.

Abstract

It begins by explaining roughly what we know as light, which portion of the spectrum of electromagnetic waves is what we humans are able to perceive, since there is an infinite spectrum and the visible waves are within a defined band.

It exposes the main properties of light as reflection and refraction, which are very important properties, since the basis of optical systems lies at the beginning of refraction, whether within the visual system or in the optical systems used by some kind of luminaire. Reflection is the other important property since it is linked to the luminance, magnitude used to relate it to each of the factors of visual perception.

The photometric magnitudes are explained, these units are detached from the radiometry and are used especially for the study of visible radiation. It is important the photometry and that allows to quantify through its units the light, which allows to make relations between the amount of light and the other factors of visual perception.

The components contained in a task are presented, and within this is a physiological component, an analysis of the visual system, its operation and its main characteristics is performed.

The visual perception factors developed are time, visual size, contrast and background luminance. Empirically obtained threshold ratios between these factors and their background luminance are shown.

Mainly we studied 5 models of visual performance each of them studied by different researchers, all these models were constructed of empirical way relating the factors of visual perception.

The information it contains mainly is obtained from engineering books dedicated to lighting, focusing on empirically studies.

Índice general

Introducción.....	1
1 Conceptos básicos de la ingeniería en Iluminación	4
1.1 Conceptos básicos de luz y óptica	4
1.1.1 Luz	4
1.1.2 Luz visible.....	5
1.1.3 Velocidad de la luz.....	6
1.1.4 Reflexión y refracción.....	6
1.1.5 Métrica de la Luz	7
2 Sistema Visual y percepción del Color	11
2.1 Sistema visual.....	11
2.1.1 El Ojo Como una Cámara	11
2.1.2 El Ojo esquema reducido.....	12
2.1.3 Formación de una imagen sobre la retina.	13
2.1.4 Mecanismo de acomodación	14
2.1.5 La acomodación del cristalino es controlada	14
2.1.6 Diámetro de la pupila	14
2.1.7 Percepción de profundidad.....	14
2.1.8 Cono y bastones	15
2.2 Sensibilidad espectral.....	16
3 Factores de percepción visual	17
3.1 Introducción a los factores externos de la visión	17
3.1.1 Tamaño	18
3.1.2 Contraste.....	24
3.1.3 Luminosidad.....	27
3.1.4 Tiempo	28

4 Modelos de rendimiento visual.....	29
4.1 Introducción.....	29
4.2 Modelo COBB-MOSS.....	31
4.3 Modelo de WESTON	32
4.4 Modelo de BLACKWELL.....	35
4.5 Modelo de REA-OULLETTE	40
4.6 Modelo CLEAR-BERMAN.....	44
Discusión y conclusiones.....	46
Bibliografía	48

Introducción

Dentro de la energía radiante existe una parte que puede ser evaluada visualmente, es una porción de energía que interactúa con las superficies siendo transmitida al sistema visual, provocando una reacción en los fotorreceptores, y dota al ser humano del sentido de la visión.

Para adquirir un conocimiento integral de la luz, no solamente implica una visión desde la física, sino se debe considerar la respuesta del ser humano, tanto de la psicología como de la fisiología, ya que el objetivo de la iluminación no es solo lograr la visión de los objetos.

La relación entre las condiciones de iluminación y las características del objeto visual, a esto sumado los requerimientos que deben existir para optimizar la capacidad humana de realizar una tarea visual, son complejos y no existen “fórmulas mágicas”, para resolver situaciones dadas.

Lo mencionado anteriormente demuestra la complejidad y la cantidad de variables involucradas, siendo la mayoría de ellas no controlables. El análisis se hace más complejo si se tiene en cuenta las diferencias individuales, como por ejemplo la edad de las personas, las condiciones de visión, y la importancia que tiene la componente visual en la realización de una tarea.

En algunos modelos de rendimiento visual, la eficiencia visual se cuantifica a través de la velocidad y precisión con que se realiza una tarea, en cambio el confort visual es afectado por las condiciones de iluminación que se predisponen favorablemente a las personas que realizan la tarea. Entonces la eficiencia está relacionada con la tarea y su entorno inmediato, mientras que aquellos que influyen en el confort visual involucran aspectos más generales del ambiente. Un ejemplo de esta diferencia se puede dar en una oficina donde el nivel de iluminación corresponde al valor recomendado, pero la fuente luminosa presenta un parpadeo molesto, o la presencia de una ventana constituye una distracción debido al deslumbramiento, en esta situación no se encuentra presente el confort visual.

Para una buena propuesta de iluminación se debe asegurar eficiencia visual, confort visual y un medio ambiente apropiado, se debe tener consideraciones energéticas, condiciones térmicas, acústicas y visuales, ya que todo este conjunto conduce a una mayor productividad.

Para llegar o acercarse al menos a la eficiencia visual y a un rendimiento visual óptimo, investigadores han realizado diferentes experimentos, para llegar a modelos que permitan establecer niveles de iluminación adecuados para la realización de una tarea visual. Los

experimentos realizados hasta el momento se han basado en el estudio y comportamiento del ser humano, realizando pruebas empíricas utilizando como componente experimental los factores de percepción visual. Dichos factores se encuentran presentes en todo tipo de tareas que se realizan a diario.

Especificar condiciones de iluminación con pruebas empíricas conlleva una gran complejidad, ya que como se explicará dentro de este trabajo, el rendimiento de una tarea está compuesto de una componente motora, propia de la persona y de la edad de la persona, una componente cognitiva, y una componente visual.

Los objetivos principales del desarrollo del informe, es identificar los antecedentes existentes sobre los factores de percepción visual, buscar en los libros o documentos de investigadores que trabajan relacionados con la ciencia y principalmente con la luz, para guiar y fundamentar el trabajo realizado, utilizando bibliografía de las entidades internacionales dedicadas al estudio de la iluminación.

Identificar los principales autores de libros y documentos relacionados con los factores de percepción visual, describir de la mejor manera los postulados y conclusiones de cada investigador.

Relacionar los factores de percepción visual entre ellos y reconocer los modelos que los relacionan, ya identificados los factores que influyen en la percepción visual, el siguiente paso es relacionarlos entre ellos y comprender los principales modelos que relacionan los factores de percepción visual. Conocer cuáles fueron los experimentos realizados para llegar a los modelos de rendimiento visual.

Estudiar los conceptos en que se basan los factores de percepción visual. Conocer el comportamiento de la luz y la manera como es cuantificada. Estudiar el comportamiento del ojo humano y su funcionamiento basado en la óptica.

Analizar las relaciones entre contraste y luminancia de fondo, la relación entre tamaño y luminancia de fondo, tomando esto como base para el estudio de los modelos de rendimiento visual.

El percibir las cosas es un acto que lo hacemos de forma continua y a veces sin darnos ni cuenta ya que es propio del ser humano, percibir las cosas a través de los sentidos (visión, audición, gusto, tacto, olfato).

La percepción visual es el complejo proceso de recepción e interpretación significativa de cualquier información recibida. Ojo y cerebro tienden a comprender y organizar lo que vemos imponiéndole un sentido racional aunque particularizado por la experiencia de cada individuo. Se debe reconocer la importancia de los factores de percepción visual y su nivel de implicancia en la vida cotidiana de las personas.

Cuando se habla de factores que afectan la visión pueden tener varias raíces, como puede ser la propia persona o el exterior. Como por ejemplo, los factores que influyen en la visión y pertenecen

propiamente tal al individuo puede ser una enfermedad visual, miopía, astigmatismo, daltonismo, etc., inclusive estas enfermedades son de carácter físico, pueden existir otros factores psicológicos. También están los factores externos que son propios de la calidad de iluminación y características del entorno.

1 Conceptos básicos de la ingeniería en Iluminación

1.1 Conceptos básicos de luz y óptica

1.1.1 Luz

¿Qué es la luz?, la luz en su naturaleza fundamental es como cualquier otra onda electromagnética. Las características que tiene una onda electromagnética aplican de igual manera a las ondas de luz. Lo que distingue a la luz de las demás ondas electromagnéticas es que el ser humano cuenta con receptores que son sensibles a la radiación electromagnética solo en una gamma estrecha de longitudes de ondas. Desde unos 400 [nm] (el violeta) hasta unos 700 [nm] (el rojo).

Se presentan algunas de las características de las ondas de luz, como la velocidad de propagación en el vacío y en la materia, la refracción y la reflexión.

“la luz se define como energía radiante evaluada visualmente” [5], esta definición nos indica que en primer lugar la luz es energía, en segundo lugar se transmite por radiación y por último es una forma radiante a la que el ojo es sensible.

Existe parte de energía que se define como luz pero no es visible al ojo humano, son el caso de la radiación ultravioleta y la radiación infrarroja, ondas electromagnéticas utilizadas para otros fines.

Las importante de las definiciones anteriores es rescatar que solo existe un rango visible para el ser humano y es dentro de este rango entre 400 y 700 [nm], esta banda es la más importante para temas de visión y de factores de percepción visual. Siempre cuando se hable de luz en los próximos capítulos se estará haciendo referencia a este rango. Lo que se encuentra fuera de este rango corresponde a ondas electromagnéticas que se utilizan con otros fines.

1.1.2 Luz visible

La luz visible se puede definir como la radiación electromagnética a la cual el ojo es sensible. La sensibilidad de los observadores puede variar, pero un humano típico puede observar entre 400 [nm] y 700 [nm]. Dentro de esa gama, la sensibilidad a las diferentes longitudes de onda no es de ninguna manera constante. La mayor sensibilidad ocurre cerca de los 555 [nm], correspondiente a la luz de un color verde amarillento. Los límites de la región visible no están bien definidos, porque la curva de la sensibilidad (curva que se estudiara más adelante) se aproxima asintóticamente a las longitudes de ondas tanto largas como cortas. En la figura 1-1 se muestra el espectro de ondas electromagnético, indicando cual es el rango visible .

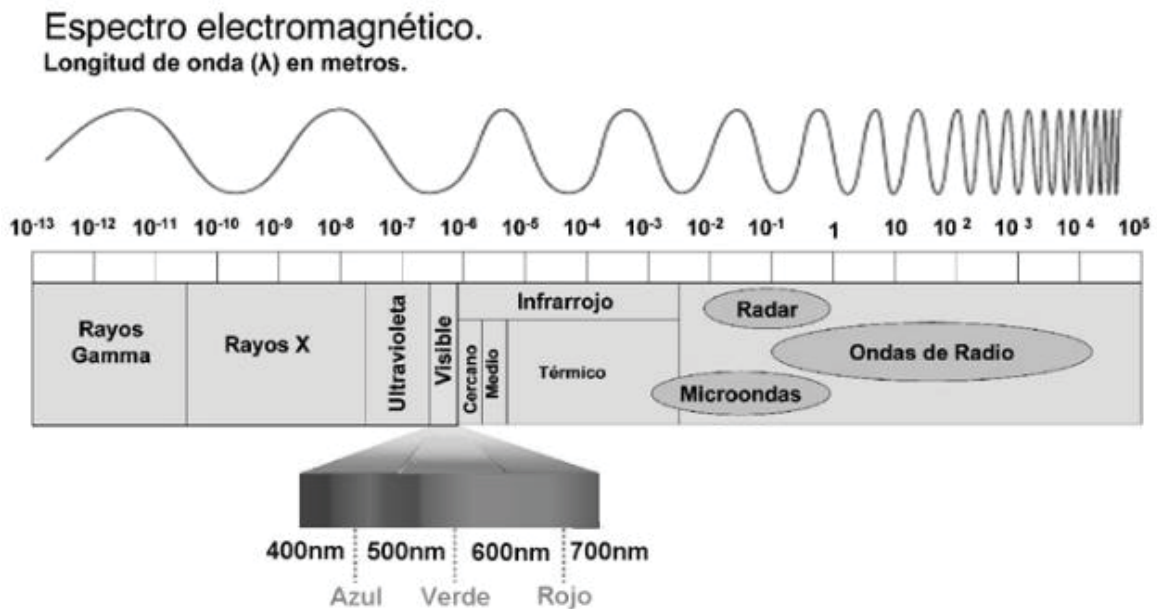


Figura 1-1 Espectro de ondas electromagnético. Fuente: Luz, color y visión de Elisa Colombo y Beatriz O'Donnell

Solo una pequeña fracción del espectro electromagnético es visible para el ser humano. En la figura 1-1 se visualiza la gran gama de ondas electromagnéticas que existen y se describe para que fines son utilizadas. Se muestra que las longitudes de onda pequeñas corresponden principalmente a rayos gammas que son utilizados para esterilizar equipos y para el tratamiento del cáncer, rayos x utilizados comúnmente para la toma de radiografías y los rayos ultravioleta también utilizados para eliminar bacterias. En cambio las longitudes de onda de mayor magnitud están compuestas principalmente por ondas infrarrojas.

En la figura 1-1 se describe a que color corresponde cierta longitud de onda en el espectro visible, aproximadamente las ondas de color azul se encuentran en la vecindad de los 400 [nm], entre 500 y 600 [nm] se encuentran las longitudes de ondas que corresponden al color verde, y por último el color rojo que corresponde a longitudes de onda alrededor de los 700 [nm]. [6]

1.1.3 Velocidad de la luz

Todas las ondas electromagnéticas viajan en el vacío a la misma velocidad, llamando a esta velocidad “velocidad de la luz”, en la ecuación (1-1) se indica la relación entre velocidad de la luz su frecuencia y longitud de onda,

$$v = \lambda * f \quad (1-1)$$

La velocidad de la luz en el vacío se aproxima a 300.000 km/s, y la velocidad en un material depende de las características del medio en que se propague. Estas diferencias de velocidad son base para entender el funcionamiento de la óptica.

1.1.4 Reflexión y refracción

Al mirar una ventana se advierte que la luz llega desde el otro lado del vidrio, si desde el otro lado se estaciona un auto este puede ser visto, sin embargo si se observa con cuidado es posible que se vea un reflejo en el vidrio. Si se quisiera dirigir la luz de una linterna hacia el vidrio, de la otra parte del vidrio se vería el haz de luz, pero la persona que apunta el haz de luz también vería que parte de la luz se refleja. Estos dos efectos se pueden observar siempre que un haz de luz viaja de un medio a otro (del aire al vidrio). Parte del haz se refleja y otra parte es transmitida al segundo medio.

La óptica geométrica estudia la reflexión y la refracción, en la figura 1-2 y en la figura 1-3 se muestran ejemplos de refracción en una esfera y en un cilindro respectivamente, donde ocurren dos efectos distintos, para el caso de la esfera se produce algo llamado punto focal y en el caso del cilindro línea focal. Tanto el punto focal como la línea focal son efectos de la refracción. [2]

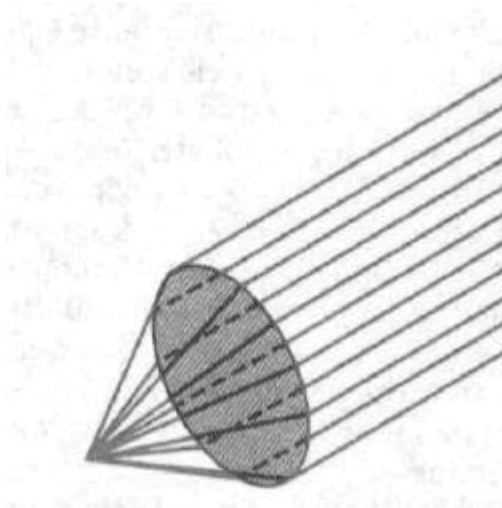


Figura 1-2 Refracción en esfera. Fuente: Guyton y Hall, sexta edición por Jhon Hall.

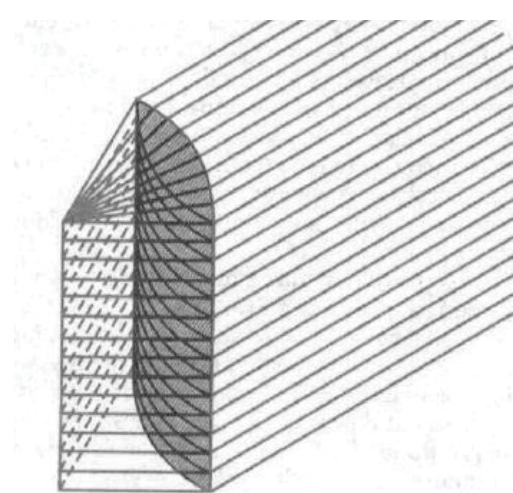


Figura 1-3 Refracción en cilindro. Fuente: Guyton y Hall, sexta edición por Jhon Hall.

Es importante en la refracción, saber que cada material cuenta con un factor llamado índice de refracción, que es el cociente entre la velocidad de propagación de la luz al vacío y la velocidad

de la luz en el material que se propaga. Este fenómeno es la base de la óptica. Actualmente es utilizada para corregir aberraciones visuales propias de los componentes del ojo, siendo uno de sus principales usos, pero actualmente con la llegada de la tecnología led se presentó la necesidad de que la luz debía tener una distribución acorde a las necesidades del ambiente que se desea iluminar. Por ejemplo en la actualidad existe una misma luminaria pero con distintas ópticas dependiendo del uso que se le dará.

En las figuras 1-4,1-5,1-6,1-7, se muestra el efecto de la reflexión de manera simplificada en 4 situaciones que se pueden dar comúnmente, este será un efecto importante que se encuentra relacionado con la luminancia, dando lugar al factor de reflexión de los materiales. La reflexión ocurre cuando un haz de luz incide sobre un material y este es reflejado, esto implica cambio de dirección de dicho haz.

Es en este fenómeno donde el factor de reflexión toma gran importancia, se revisará que para realizar experimentos donde una variable primordial será la luminancia estará afectada directamente por el factor de reflexión. Hay que saber que no existe un factor de reflexión unitario, esto quiere decir que no existe un material que logre reflejar la misma cantidad de luz que recibe.

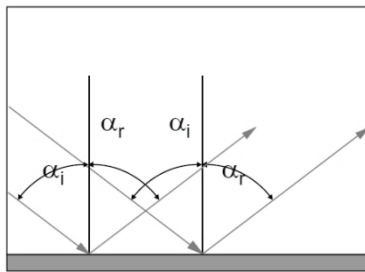


Figura 1-4 Reflexión especular

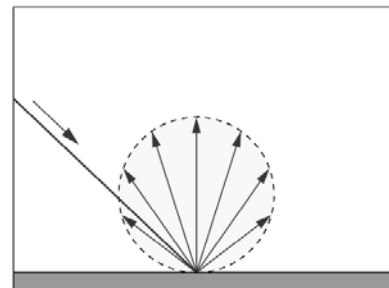


Figura 1-5 Reflexión difusa

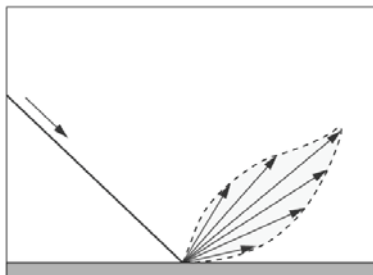


Figura 1-6 Reflexión dispersa

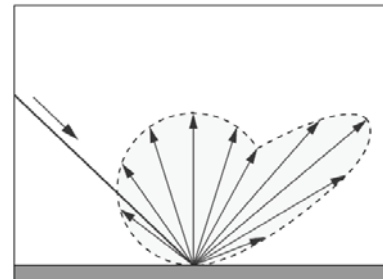


Figura 1-7 Reflexión compuesta

En las figuras 1-4, 1-5, 1-6,1-7, se muestran distintos fenómenos de reflexión de la luz que se dan dependiendo del material por el cual está siendo reflejada la luz.

1.1.5 Métrica de la Luz

Las fuentes de luz emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. Esta radiación se cuantifica con la ayuda de las magnitudes radiométricas. Si interesa cuantificar solamente la

radiación a la que es sensible el ojo humano, estas magnitudes radiométricas se transforman en **magnitudes fotométricas**.

En resumen la fotometría es el área dedicada a la medición de la luz, es similar a la radiometría excepto que todo se encuentra ponderado por la respuesta espectral del ojo. A modo universal la curva utilizada para ponderar, es la curva de sensibilidad espectral fotópica, por lo que prácticamente todos los aparatos utilizados en la fotometría se encuentran ponderados de acuerdo a dicha curva. Se presentan las magnitudes con sus respectivas unidades que tienen mayor influencia en los factores de percepción visual, además de ser las más utilizadas por las normativas nacionales e internacionales.

Las fuentes de luz para conocer sus características fotométricas son expuestas a ensayos de este tipo. Un ensayo fotométrico realizado a una luminaria nos puede entregar por ejemplo el flujo que la luminaria emite, la distribución de la luz de dicha luminaria, su temperatura de color y también su índice de reproducción cromática (IRC). Hay que tener en cuenta que un ensayo fotométrico no solo incluye una fotometría por sí sola, sino la medición del espectro y del IRC.

La ventaja en la actualidad de contar con un ensayo fotométrico es la realización de cálculos digitales para escenas de iluminación, calculando los niveles deseados para las tareas que se realizarán en dicho lugar. Obteniendo niveles que aseguran las condiciones adecuadas para trabajar, logrando el potencial visual que si bien no asegura el rendimiento visual pero si contribuye en gran parte.

Estos niveles alcanzados en las simulaciones generalmente se encuentran establecidos en normas nacionales, ya sea de alumbrado público o seguridad industrial. Estos niveles son establecidos en base a situaciones estándares donde los factores, contraste, tiempo, tamaño visual, son establecidos de acuerdo a una situación en específico.

Continuando, las magnitudes fotométricas toman gran importancia en las relaciones que se presentarán, entre contraste, tiempo, tamaño visual, versus la luminancia de fondo de los experimentos. De igual manera para los modelos de rendimiento visual, donde en muchos casos se expone el rendimiento visual o comportamiento visual versus la luminancia de fondo. Dentro del informe una de las magnitudes más utilizadas será la luminancia de fondo, ya que es un concepto que viene inserto en los modelos de rendimiento visual, y junto con la luminancia el factor de reflexión ya que tienen una relación directa.

Flujo luminoso

La medida fundamental de la radiación electromagnética emitida por una fuente es el flujo radiante, es decir, la cantidad de energía emitida por unidad de tiempo, y se mide en watt. La magnitud fotométrica derivada, usada para medir el efecto de la luz, es el Flujo Luminoso, es decir la cantidad de energía radiante por unidad de tiempo multiplicada por la sensibilidad espectral relativa del sistema visual humano integrada sobre un rango de longitudes de onda visible, y se mide en lúmenes.

Es decir que es una medida de la potencia total de la luz visible emitida por fuentes de radiación. Esta unidad nos proporciona una medida cuantitativa de la cantidad de luz que la fuente luminosa emite en todo el espacio que le rodea. Su unidad es el Lumen.

Es muy importante mencionar que una fuente luminosa contará con una relación directa entre cantidad de flujo luminoso emitido versus la potencia eléctrica consumida, esta será la relación de eficacia de la fuente luminosa lm/w.

Hoy en la actualidad con los avances tecnológicos se han logrado grandes niveles de eficacia en las luminarias, lo que permite reducir el consumo, logrando una iluminación adecuada con menor cantidad de equipos o menor potencia eléctrica de los equipos.

Esto quiere decir que para una situación donde antiguamente se necesitaba un consumo del 100%, para lograr una iluminación adecuada, hoy en día eso se ha logrado disminuir en alrededor de un 30% o 40% logrando la misma calidad de iluminación.

El flujo luminoso tiene relación directa con la magnitud luminancia, a mayor flujo manteniendo un factor de reflexión constante en el material se lograrán mejores niveles de luminancia.

Resumiendo lo expuesto anteriormente para lograr niveles adecuados para cada situación de iluminación, con menor potencia eléctrica de consumo se pueden lograr los niveles de luminancia necesarios para cada situación.

Intensidad luminosa

Está definida como parte o cantidad del flujo luminoso emitido por una fuente luminosa en una dirección dada, por el ángulo sólido que lo contiene su unidad de medida es la candela.

Iluminancia

Se define como la cantidad de flujo luminoso incidente en una superficie, su unidad de medida es el lux. En la ecuación (1-2), se muestra el cálculo de la iluminancia. Actualmente es una magnitud muy utilizada por la normativa nacional, tanto en alumbrado público como en seguridad industrial.

$$E = \frac{\Phi}{A} \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right] \quad (1-2)$$

Luminancia

La luminancia se define como cantidad de intensidad luminosa emitida por una fuente primaria o secundaria en una dirección dada por una superficie luminosa o iluminada. En la ecuación (1-3), se muestra el cálculo de la luminancia.

$$L = \frac{I}{A} \left[\frac{\text{Cd}}{\text{m}^2} \right] \quad (1-3)$$

En las relaciones entre los factores de percepción visual es la magnitud más utilizada, ya que se utiliza para demostrar el comportamiento de las personas al exponer a mayores niveles de luminancia. La mayor cantidad de bibliografía utilizada fue norteamericana y la luminancia es expresada por esta bibliografía en footlamberts. Este nombre lo lleva en honor de Johann Heinrich Lambert, matemático, físico y astrónomo suizo. En las ecuaciones 1-4 y 1-5, la relación entre foot-lamberts y candelas por metro cuadrado.

$$1 \text{ Lambert} = \frac{10000 \text{ Cd}}{\pi \text{ m}^2} \quad (1-4)$$

$$1 \text{ foot-Lambert} = 3.43 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2} \quad (1-5)$$

Índice de reproducción cromática (IRC)

El índice de reproducción cromática es un factor que nos entrega la capacidad de una fuente de luz para reproducir de manera fiel los colores. Un IRC 100 es el valor más elevado que puede llegar una fuente de luz y esto quiere decir que todos los colores se reproducen tal cual como son.

De manera simplificada, tomando en cuenta un día soleado sin ninguna nube y se observa un objeto, ese será su color verdadero, corresponde al color del objeto en sí, por lo que en ese momento tendrá un 100 de IRC, la reproducción de sus colores no se encontrará distorsionada. Entonces cuanto mayor sea el índice de reproducción cromática más real será el color del objeto iluminado.

Temperatura de color

Es la referencia para indicar el color de las fuentes luminosas y se mide en Kelvin (K). Actualmente la forma de referirse a esta cualidad es a través indicando de manera verbal el color de las fuentes luminosas, como por ejemplo blanco cálido (3000 Kelvin), blanco neutro (4000 kelvin), blanco frío (5000 kelvin).

Las medidas, e índices nombradas anteriormente afectan directamente a como se percibe la luz, y son tomadas en cuenta en la normativa vigente o en los procesos de licitación de iluminación pública.

En los modelos de rendimiento visual no se especifica si en los experimentos realizados fueron utilizadas fuentes de luz con determinada temperatura de color o índice de reproducción cromática. Además no se encontró hallazgo de alguna prueba empírica o modelo que utilice ya sea el IRC o temperatura de color para establecer niveles de umbral o comportamiento de las personas respecto a la variación de estas magnitudes.

Para futuros modelos o estudios, debe ser importante considerar estos factores ya que influyen directamente en la percepción de los objetos y del ambiente.

2 Sistema Visual y percepción del Color

2.1 Sistema visual

Para entender el sistema óptico del ojo, se debe entender los principios básicos de la óptica, entre los que se incluye la física de la refracción, el enfoque, la profundidad de foco. Por lo tanto primero se debe presentar una breve revisión de estos principios físicos.

“Refracción de la Luz

Índice de refracción de una sustancia transparente.

Los rayos de luz se propagan por el aire con una velocidad cercana a 300.000 Km/s, pero viajan con mayor lentitud a través de sólidos y líquidos transparentes. El índice de refracción de una sustancia transparente corresponde a la relación entre la velocidad de la luz por el aire y por dicha sustancia.

Refracción de los rayos de luz en la superficie de contacto entre dos medios con índices de refracción distintos.

Cuando las ondas de luz que se propagan formando un haz inciden sobre una superficie de contacto perpendicular a dicho haz, las ondas penetran en el segundo medio de refracción sin desviarse de su curso. El único efecto que se produce es una disminución de su velocidad de propagación y un acortamiento de su longitud de onda. En cambio, si las ondas de luz atraviesan una superficie de contacto inclinada, estas se desvían si los índices de refracción de los dos medios difieren.” [2]

La explicación de estos conceptos es principalmente para entender que algunas de las partes de nuestro órgano visual: el ojo, tiene esta característica.

2.1.1 El Ojo Como una Cámara

Desde el punto de vista óptico el ojo se asemeja a una cámara fotográfica normal. Posee un sistema de lentes, un sistema de apertura variable (la pupila) y una retina que equivale a la película.

El sistema de lentes del ojo se compone de cuatro interfaces (superficies de contacto) de refracción:

- 1.- Entre el aire y la superficie anterior a la córnea
- 2.- Entre la superficie posterior a la córnea y el humor acuoso
- 3.- Entre el humor acuoso y la superficie posterior al cristalino
- 4.- Entre la superficie posterior al cristalino y el humor vítreo.

Cada una de estas superficies de contacto involucra un índice de refracción presentado en la tabla 2-1.

Tabla 2-1 Índices de Refracción

Superficie	Índice de refracción
Aire	1.00
Córnea	1.38
Humor Acuoso	1.33
Cristalino	1.40
Humor Vítreo	1.34

Si bien estos datos no son estrictamente utilizados en el objetivo final de relacionar los factores de percepción visual, son factores fisiológicos que afectan directamente el rendimiento de una tarea. [2]

2.1.2 El Ojo esquema reducido

Si se suma algebraicamente todas las superficies de refracción del ojo y luego se consideran como una única lente, se simplifica la óptica del ojo normal. A este esquema se le llama ojo reducido, y se considera que el ojo tiene una única superficie de refracción con un punto central situado a 17 mm, delante de la retina y con un poder de refracción total de 59 dioptrías.

Las dioptrías es el poder de refracción con que cuentan los lentes, cuanto más capacidad de desviar la luz tienen los lentes mayor es su dioptría, que para un lente convexa se define como el cociente entre 1 m dividido por la distancia focal del lente.

La importancia del cristalino consiste en que su curvatura puede incrementarse notablemente para proporcionar acomodación.

En la figura 2-1 se muestra el esquema reducido del ojo indicando para cada etapa el índice de refracción y la cantidad total de dioptrías. [2]

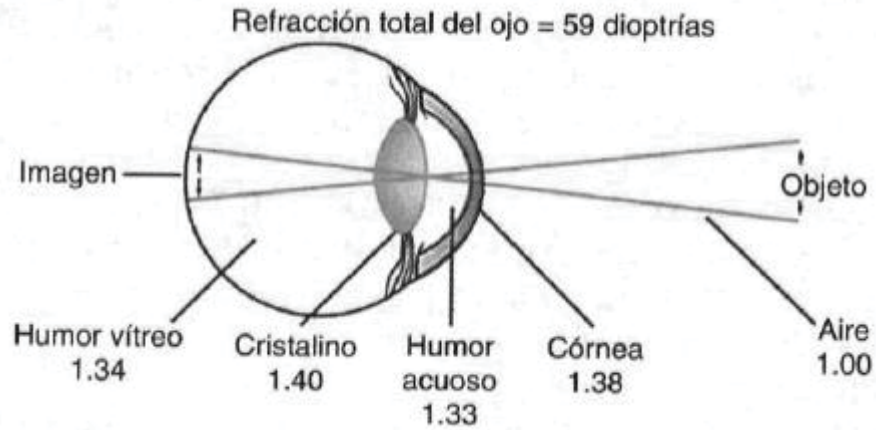


Figura 2-1 Esquema reducido del ojo. Fuente: Guyton y Hall, sexta edición por Jhon Hall.

Para este caso el poder de refracción es de 59 dioptrías

2.1.3 Formación de una imagen sobre la retina.

De la misma forma que una lente de cristal enfoca una imagen sobre una hoja de papel, el sistema de lentes del ojo puede enfocar una imagen en la retina. La imagen del objeto aparece totalmente invertida. Sin embargo, la mente percibe objetos en posición normal a pesar de su inversión en la retina. Debido a que el cerebro está capacitado para considerar normal una imagen invertida. En la figura 2-2 se muestra la imagen de una flecha plasmada de manera invertida al interior del ojo.

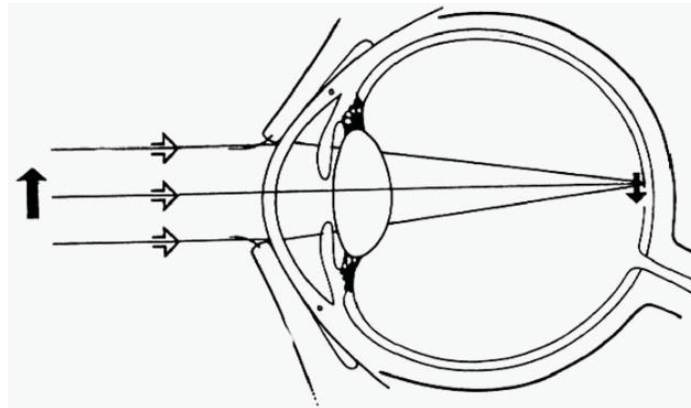


Figura 2-2 Ejemplo de formación de imagen sobre la retina. Fuente: Guyton y Hall, sexta edición por Jhon Hall.

2.1.4 Mecanismo de acomodación

El poder de refracción del cristalino infantil puede aumentarse voluntariamente desde 20 dioptrías hasta unas 34 dioptrías; esto supone una acomodación total de 14 dioptrías. Para lograrlo la forma del cristalino cambia de una lente moderadamente convexa hacia otra muy convexa. El mecanismo es el siguiente. En una persona joven, el cristalino se compone de una capsula elástica resistente llena de un líquido proteínico y viscoso aunque transparente. Cuando el cristalino esta relajado sin ninguna tensión sobre la capsula, adopta una forma casi esférica, que se debe principalmente a la retracción elástica de la capsula. Sin embargo existen unos 70 ligamentos suspensorios anclados radialmente alrededor del cristalino que tiran de sus bordes hacia el perímetro externo del globo ocular.

2.1.5 La acomodación del cristalino es controlada

Al relajarse los ligamentos del cristalino, le confieren un mayor grosor y aumenta su poder de refracción. Al aumentar el poder de refracción, el ojo es capaz de enfocar objetos mucho más próximos que cuando tiene menos poder de refracción. Una enfermedad común de problemas de acomodación es la **Presbicia** que con la edad el cristalino crece en longitud y en grosor, perdiendo elasticidad, por lo tanto la capacidad para modificar su forma disminuye progresivamente con la edad. El poder de acomodación disminuye desde unas 14 dioptrías, en el niño, hasta menos de 2 dioptrías a los 45-50 años y se aproxima a 0 a los 70 años. A partir de entonces, el cristalino es prácticamente incapaz de acomodar, enfermedad que se conoce como presbicia.

2.1.6 Diámetro de la pupila

La principal función del iris es incrementar la cantidad de luz que penetra en el ojo en la oscuridad y disminuirla cuando hay mucha luminosidad. La cantidad de luz que penetra en el ojo a través de la pupila es proporcional al área de la pupila o al cuadrado del diámetro pupilar. La pupila del ojo humano puede disminuir su diámetro hasta aproximadamente 1.5 milímetros y aumentarlo hasta 8 milímetros. Por lo tanto, la cantidad de luz que penetra en el ojo varía unas 30 veces como resultado de los cambios de la apertura pupilar.

2.1.7 Percepción de profundidad

El sistema visual normalmente percibe la distancia, fenómeno denominado percepción de profundidad a través de 3 medios:

- 1) Tamaño de la imagen retiniana de objetos conocidos, si el objeto que se está observando es conocido, se puede determinar lo lejos que se está simplemente por el tamaño de su imagen sobre la retina. No se piensa conscientemente en el tamaño, pero el cerebro ha aprendido a calcular automáticamente la distancia de los objetos a partir del tamaño de su imagen cuando se conocen sus dimensiones. [3]
- 2) Determinación de la distancia según el paralelaje en movimiento, cuando se observa a lo lejos un objeto sin mover los ojos, y luego se mira a otro lado, las imágenes de los objetos

cercanos se mueven rápidamente por la retina, mientras las imágenes distantes quedan inmóviles.[3]

- 3) Determinación de la distancia mediante la estereopsia (visión binocular), debido a que cada ojo obtiene una vista distinta de una misma escena, con un ángulo ligeramente distinto. Ambas vistas tendrán muchas cosas en común, pero cada una contendrá cierta información visual que la otra no. Esta diferencia entre ambas imágenes se denomina disparidad.

Las vistas de cada ojo se envían por separado al cerebro, el cual se encarga de combinarlas emparejando las similitudes y añadiendo las diferencias, para producir finalmente una imagen en 3 dimensiones, de forma que se percibe la sensación de profundidad, lejanía o cercanía de los objetos que nos rodean.[3]

2.1.8 Cono y bastones

Son células fotosensibles (células sensibles a la luz), que se encuentran situadas en la retina. Los conos son los que permiten la visión cromática (visión de los colores) a diferencia de los bastones muy sensibles a la luz y el movimiento, solo producen una sensación monocromática en escala de grises.

Las personas que sufren ceguera para los colores rojos y verde, carecen de un grupo de conos receptores de color y son incapaces de distinguir unos colores de otros. Por ejemplo los colores verde, amarillo, naranja y rojo, que se encuentran entre las longitudes de 525 y 675 nm, se diferencian normalmente por medio de los conos rojos y verdes. Si cualquiera de estos conos desaparece, ya no se puede emplear este mecanismo para distinguir estos cuatro colores y la persona es incapaz de distinguir, en concreto el rojo del verde por lo que se dice que esa persona parece daltonismo.

Lo revisado en el capítulo 2, corresponde principalmente a la componente fisiológica que contiene la realización de una tarea visual. Y se puede apreciar que entre individuos pueden existir infinitas diferencias, provocadas por la edad, enfermedades oculares de distintos estilos.

Con el objetivo de realizar experimentos, es necesario acotar las posibilidades y establecer un estándar de individuo, en general en todos los experimentos se logra limitar, estableciendo ciertas condiciones a los participantes de los experimentos.

2.2 Sensibilidad espectral

El efecto visual de la radiación, en el rango visible, depende fuertemente de la longitud de onda. Las magnitudes fotométricas se obtienen mediante factores de peso que corresponden a la sensibilidad espectral relativa del sistema visual humano, basada en la diferente percepción de claridad para cada longitud de onda en la región visible. Debido a las diferencias individuales, y a la dependencia de esta curva de sensibilidad espectral de las condiciones experimentales, y en especial del nivel de iluminación, ha sido necesario lograr acuerdos internacionales entre representantes de los distintos países, los que han sido canalizados por la comisión internacional de la iluminación, (CIE: Comisión Internationale de l'Éclairage). La CIE (1970, 1978) adopta dos curvas de sensibilidad espectral relativa, $V(\lambda)$, para el observador CIE estándar, en condiciones fotópicas, es decir para niveles de iluminación altos, en el año 1924, y en condiciones escotópicas, es decir para niveles de iluminación bajos, en el año 1951. En la figura 2-3 se muestran estas dos curvas, que están relacionadas a los sistemas fotorreceptores que tiene el sistema visual humano, el de los conos que opera fundamentalmente en condiciones fotopicas, y el de los bastones, que opera en condiciones escotopicas. El ojo muestra su máxima sensibilidad para 555 nm en condiciones fotópicas, mientras que para condiciones escotópicas este máximo se desplaza hacia los 507 nm.

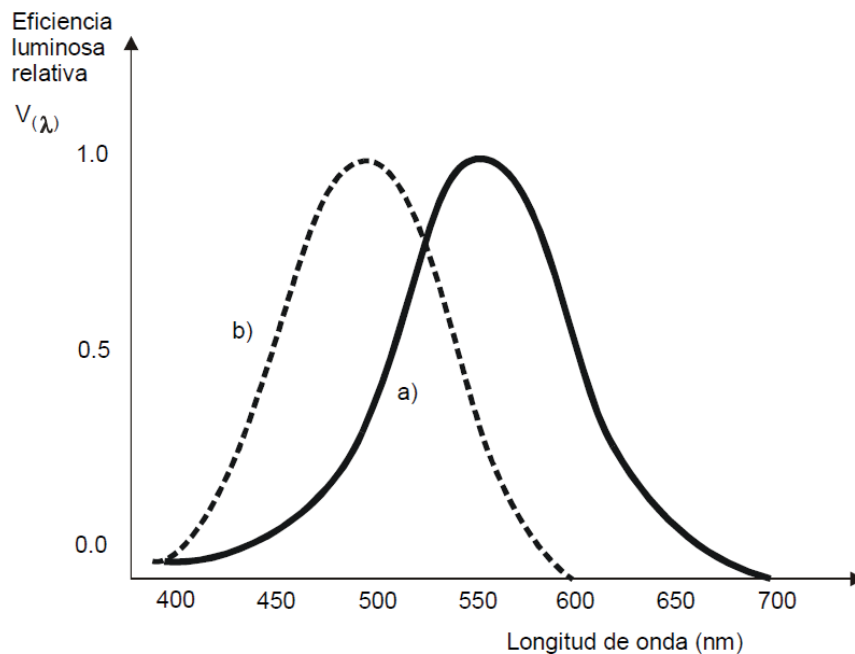


Figura 2-3 Curvas de sensibilidad espectral para (a) el observador CIE en condiciones fotópicas, (b) el observador CIE en condiciones escotópicas. Fuente: The Lighting Handbook, decima edición, IESNA.

3 Factores de percepción visual

3.1 Introducción a los factores externos de la visión

La visión contempla temas psicológicos, fisiológicos, niveles de iluminación entre otros. La fisiología es propia del sistema visual, que explica el funcionamiento del ojo, su óptica, los tipos de foto-receptores, acomodación, selectividad de longitud de onda, temas tratados en el capítulo 2.

Para este capítulo el tema a tratar serán los factores externos al ojo, algo que se encuentra bajo el control de las personas diseñadores de ambientes y proyectistas de iluminación, y de gran importancia para determinar la capacidad de ver una tarea y realizar un trabajo visual. Se plantean 5 factores principales: tamaño, el contraste, el tiempo, la luminancia y el color. Estos factores son utilizados para establecer criterios de iluminación, la cantidad y el tipo de iluminación necesaria para realizar una tarea visual. Los modelos estudiados no contemplan el color como factor, por lo que no será contemplado.

Antes de explicar en detalle los factores, se debe definir lo que se entiende por tarea visual. El potencial visual y el rendimiento visual deben ser distinguidos, conducir un coche, enhebrar una aguja, y lavar un perro son ejemplos de tareas humanas, cada una de estas contiene una componente visual, denominada tarea visual. El éxito en la realización de una tarea depende, en parte, de la capacidad de realizar una parte visual de la tarea, y esto a su vez depende de características visuales de dicha tarea, también como de las características físicas del observador, particularmente de su sistema visual. La idea es hacer la diferencia cuando para realizar una tarea se puede contar con una excelente visibilidad, pero puede no ser bien realizada debido a un trabajador cansado, envejecido, distraído, etc. El potencial visual se encuentra presente, pero el rendimiento visual no. Optimizar los factores que afectan a la visión crea el potencial visual para la excelencia en el rendimiento visual, pero no lo garantiza.

En el libro de la IESNA se realiza una comparación con el campo de las comunicaciones. Para llevar a cabo una tarea visual, una persona debe ser capaz de recibir claramente la “señal” que se envía desde la tarea, en forma de lúmenes reflejados o transmitidos. La habilidad de detectar la señal está influenciada por el resto de radiación visible que está recibiendo de las áreas que rodean la tarea, esto se definirá como “ruido” y puede ser tan fuerte como la propia señal. La habilidad de detectar la señal también depende de la rapidez con la que cambia la señal, ya que

el receptor visual (como un receptor de radio o de televisión), tiene un límite superior en su capacidad para procesar señales que cambian rápidamente. La fuerza de la señal es ciertamente significativa y esto a su vez, es una función tanto de la densidad del flujo luminoso de la tarea como de la superficie de la tarea. Por último, el ancho de banda del canal del sistema (que es de 5 [Khz] para el canal de radio, 6 [Mhz] para un canal de televisión), es de 320×10^6 [Mhz], se obtiene a través de la ecuación 3-1, donde V es la velocidad de propagación de la luz en el vacío.

$$\Delta f = V \times \left(\frac{1}{400} - \frac{1}{700} \right) \times 10^9 \quad (3-1)$$

La selectividad dentro de este canal determina la calidad (sonido, imagen o fidelidad del color), de la señal de salida. El ruido del sistema, las señales que cambian rápidamente, la intensidad de la señal, la superficie de la fuente, el ancho de banda del sistema y la selectividad no son más que otras formas de identificar el contraste, el tiempo, la luminancia, el tamaño y el color.

Al predecir el rendimiento visual, no solo se requiere evaluar las características de la tarea visual, sino que también se requiere describir el nivel de respuesta deseado desde el observador. Se definen distintos niveles, el nivel más simple es cuando se pide al observador que determine la presencia o ausencia de un objeto. Esto se denomina detección, puede ser un objeto en la carretera o una grieta en alguna parte. La preocupación es en gran medida si el objeto está presente o ausente, no lo que es ni su forma.

El siguiente nivel de respuesta es el reconocimiento, donde se puede describir el objeto como miembro de un grupo: un objeto geométrico, una letra, una persona. Este nivel requiere que el observador distinga la forma, pero todavía se clasifica como un objeto genéricamente.

El tercer nivel es la identificación, ahora se desea identificar más que una forma; el observador debe ser capaz de identificar los detalles de la superficie y características del contorno, sus bordes y límites. Este nivel permite ver objetos geométricos como una letra, permite ver y reconocer personas.

Los tres niveles suelen describirse en términos de requisitos mínimos, teniendo suficiente luz para cumplir con los requisitos visuales establecidos. El requisito mínimo de iluminación ayuda a mantener una probabilidad del 50% de buen rendimiento visual, es decir si una persona se acerca a un extraño en la calle, 5 veces de cada 10 personas podrán saber si el extraño es un amigo o un asaltante, lamentablemente esta no es una condición de iluminación satisfactoria y se denomina condición umbral. Generalmente no se elige realizar tareas visuales en el umbral, por el contrario se desean condiciones de iluminación sobre los niveles mínimos, que facilitan la asimilación de los detalles de las tareas visuales.

3.1.1 Tamaño

Si se considera la figura 3-1, donde se muestra una carretera que desaparece en la distancia con una fila de postes a su lado. Si bien todos los postes telefónicos tienen el mismo nivel, los que se encuentran en la distancia parecen mucho más pequeños que los que están cerca, y es más difícil

distinguir los detalles, evidentemente el tamaño físico de un objeto no es un buen criterio si el objeto puede ser visto o no.

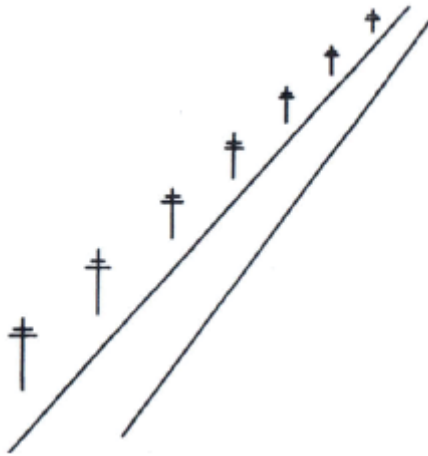


Figura 3-1 Fila de Postes. Fuente: IESNA, Lighting Handbook.

Si se considera la figura 3-2 donde un ojo observa dos postes telefónicos, cada uno del mismo tamaño. Los ángulos que se forman son denominados como los tamaños visuales de los objetos, la distancia del ojo a los postes se denomina d_1 y d_2 , y los ángulos que se forman se denotan θ_1 y θ_2 .

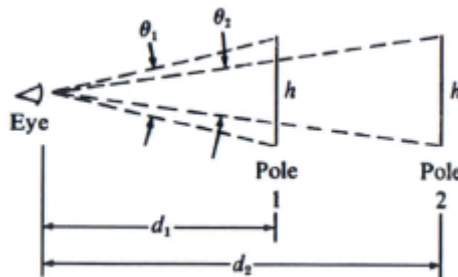


Figura 3-2 Ilustración del Ángulo Visual. Fuente: IESNA, Lighting Handbook.

La ecuación 3-2 define el cálculo de los ángulos que determinan el tamaño visual de los objetos

$$\tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) = \frac{h/2}{d_1} \tag{3-2}$$

$$\theta_1 = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{h}{2d_1} \right) \quad (3-3)$$

De esta forma el tamaño del poste a pesar de ser el mismo, sus tamaños visuales son diferentes. Esto es lo que ayuda a determinar lo bien que un observador puede ver un objeto.

Para el caso de un objeto bidimensional el tamaño visual se expresa en ángulo sólido, como se muestra en la figura.

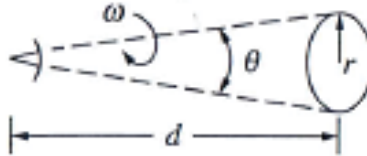


Figura 3-3 Angulo Sólido Ilustrativo. Fuente: IESNA, Lighting Handbook.

Y se calcula de la siguiente manera,

$$\omega = \frac{S}{R^2} \quad (3-4)$$

$$\omega = \frac{\pi \times r^2}{d^2} = \pi \times \tan^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (3-5)$$

Donde S es el área del objeto y R la distancia desde el ojo al objeto.

Para $r \ll d$, la ecuación se convierte en

$$\omega = \frac{\pi \times \theta^2}{4} \quad (3-6)$$

Depende del objeto si se usa ángulo visual o ángulo sólido, para objetos simétricos tales como discos o rectángulos se utiliza el ángulo visual, en cambio para el caso de objetos de asimetría, como letras se prefiere el ángulo sólido.

Un tema importante es decidir la dimensión de una tarea visual ya que así se determina el tamaño visual. Básicamente el tamaño visual será definido por el detalle más pequeño que necesita ser visto, para realizar la tarea visual con éxito.

Si se considera la figura 3-4 donde se muestran objetos de prueba visual, el primero es una barra paralela estándar: un cuadrado con el tercer centro retirado. Las barras son negras y el espacio en blanco. Si la tarea visual es simplemente determinar la presencia o ausencia del objeto en el campo de visión (esto se denomina como detección), la dimensión que se debe utilizar para determinar el ángulo visual es d . Si por otra parte se está interesado en la resolución en detalle para que el objeto de prueba pueda ser identificado como barras paralelas (a esta acción se denomina identificar), se debe tomar en cuenta la separación s para determinar el ángulo visual, generalmente se da la situación de identificar en lugar de solo detectar.



Figura 3-4 Objetos de prueba visual, utilizado para pruebas de agudeza visual. Fuente: IESNA, Lighting Handbook.

Considerando las otras figuras de la imagen si la intención es identificar los objetos con sus detalles en cada caso para determinar el ángulo visual se debe usar la dimensión s , por lo tanto las cuatro figuras tienen el mismo tamaño visual, desde el punto de vista de identificar el objeto, teniendo en cuenta que el ángulo visual es determinado por el detalle más pequeño que debe ser visto.

Otro tema sobre el factor tamaño, es el tamaño de umbral, que es el tamaño visual donde se puede ver un objeto el 50% del tiempo en una situación dada., y no existe certeza de ver o no ver. Un observador que identifique 5 veces de manera correcta un objeto de 10 intentos en una situación forzada, sí o no, pudo haber alcanzado fácilmente estos aciertos por casualidad, ya que el tamaño de umbral no es un parámetro fijo, varía con el contraste entre el objeto y su fondo, con el tiempo disponible para ver, y con la luminancia de fondo.

El otro término que requiere definición es la agudeza visual, que es simplemente el recíproco del tamaño del umbral. Así, un ángulo de umbral visual de 0,4 minutos de arco da una agudeza visual de 2,5. Debe entenderse que el tamaño visual es una cantidad física independiente del ambiente de iluminación, mientras que el tamaño de umbral y la calidad visual son muy dependientes de los otros factores de la visión.

Un gráfico de la agudeza visual frente a la luminancia de fondo, para un objeto negro circular sobre un fondo blanco se muestra en la figura 3-5.

Se observa que a medida que disminuye la luminancia de fondo, el tamaño del objeto debe aumentar para poder seguir viendo el objeto. Además, la máxima agudeza visual posible para este objeto es 2,46, correspondiente al tamaño umbral de 0,41 minutos de arco y una luminancia de fondo de 100,000 fL.

Aclarar que la luminancia esta expresada en footlambert. La equivalencia es; $1 \frac{cd}{\pi ft^2}$ (Footlambert) equivale a $3.4262591 \frac{cd}{m^2}$ (candelas por metros cuadrado).

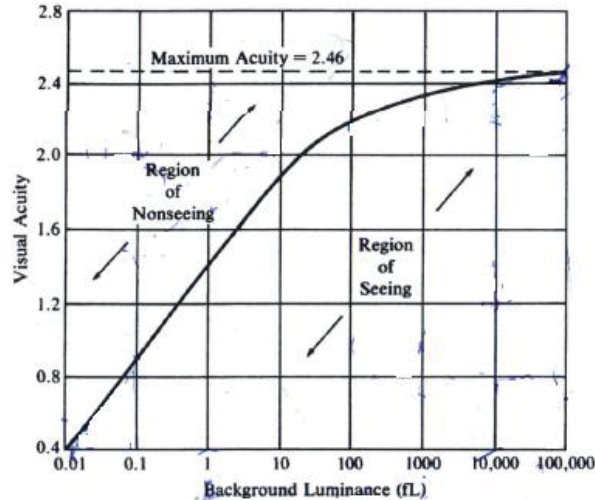


Figura 3-5 Agudeza visual. Objeto Negro Sobre Fondo Blanco. Fuente: IESNA, Lighting Handbook.

En la figura 3-5 se observan en primera instancia una curva que corresponde a la curva de umbral, donde no existe certeza de ver un objeto. La curva de umbral divide el plano en dos regiones, la parte superior una región donde no es posible observar el objeto y la región inferior que es la región de visión. A medida que se disminuye el tamaño visual la luminancia de fondo debe aumentar linealmente, hasta llegar a tamaños visuales pequeños donde a pesar de incrementar la luminancia la curva umbral comienza a tomar una forma curva al nivel de que en algún punto el objeto por su tamaño visual no podrá ser observado. [5]

Un estudio realizado en Argentina por Elisa Colombo y Beatriz O'Donell de la universidad de Tucumán, definen que la agudeza visual es la habilidad del sistema visual humano para resolver detalles. Y se define como el ángulo subtendido en el ojo por el tamaño del detalle que puede detectarse, discriminarse o reconocerse, de acuerdo a la exigencia de la tarea, en el 50% de las ocasiones en que es presentado. Se define como el recíproco del ángulo. Siendo esta la misma definición utilizada por la IESNA.

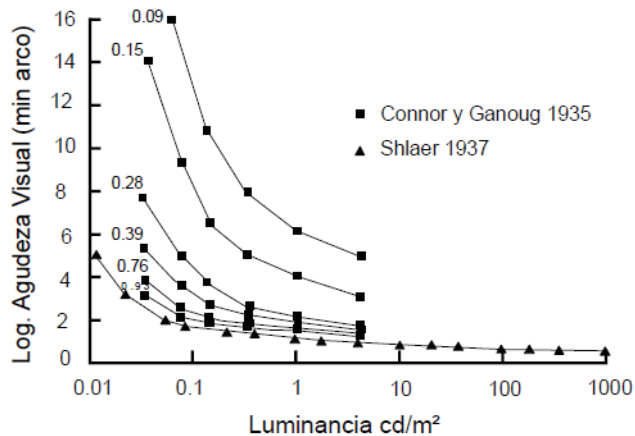


Figura 3-6 Curva de Agudeza visual expresada de manera logarítmica. Fuente: Iluminación Eficaz, Calidad y Factores Humanos de Elisa Colombo y Beatriz O'Donell

La figura 3-6 muestra el tamaño umbral en términos de luminancia de adaptación para diferentes contrastes. Se observa que a medida que la luminancia de adaptación aumenta, la agudeza visual mejora, es decir el sistema visual es capaz de detectar, discriminar o reconocer tamaños de detalles cada vez más pequeños. Asimismo se observa que la agudeza visual tiende a un valor asintótico para altas luminancias, y que el cambio de agudeza visual en el rango de luminancias considerado es menos marcado para contrastes altos.

Existe una regla práctica y útil para el diseño de iluminación es que los detalles necesitan ser cuatro veces más grandes que el límite de agudeza visual para ser resuelto en forma rápida sin afectar la respuesta visual (Bailey, Clear y Berman, 1993).

Las conclusiones que llegan estos dos estudios son en general las mismas, ya que a mayores niveles de luminancia se puede lograr una mayor agudeza visual, llegando un punto de saturación.

Es de utilidad desarrollar sensaciones para el tamaño visual de las tareas reales que se encuentran cada día. Una uña a la longitud de los brazos subtende un ángulo visual pequeño, al igual que la tarea de leer, donde habitualmente se sostiene un libro alrededor de 30 cm de distancia del ojo. La IESNA propone tablas que indican las características de la tarea visual, señalando el ángulo visual en minutos arco, una de estas tablas se muestra a continuación, Tabla 3-1, donde se muestran cables AWG, su diámetro en mm y el ángulo visual en minutos arco, observados a una distancia de 38.1 centímetros. [4]

Tabla 3-1 Tamaños visuales de cables a una distancia de 38.1 centímetros.

Calibre del Cable	Tamaño del Cable (diámetro en mm)	Tamaño Visual (minutos arco)
30	0.25	2.4
24	0.51	4.9
20	0.81	7.8
16	1.29	12.4
12	2.05	19.8
8	3.28	31.6

El tamaño visual es muy útil cuando se desea que un objeto sea visto a una determinada distancia, ya que utilizando un ángulo visual correcto y definiendo la distancia desde donde se desea que sea visto, con un cálculo se puede obtener el tamaño del objeto. Este principio puede ser utilizado como herramienta de publicidad o como una herramienta de tránsito.

3.1.2 Contraste

El contraste o contraste de luminancia más apropiado entre un objeto y su fondo adyacente se define mediante la siguiente ecuación 3-7:

$$C = \frac{|L_b - L_t|}{L_b} \quad (3-7)$$

Donde L_t es la iluminancia del objeto (tarea visual a realizar), y L_b es la luminancia del fondo (también denominada luminancia de adaptación del observador), se toma el valor absoluto por lo tanto el contraste toma un valor positivo siempre. Si la luminancia $L_t \leq L_b$ el contraste varía entre 0 a 1, si el caso fuese $L_t \geq L_b$ el valor del contraste se encuentra en el rango de 0 a ∞ .

Si la tarea visual y su fondo se encuentran en las mismas condiciones de iluminación (si ambos están recibiendo la misma intensidad de luz), el contraste se convierte en una función de solo sus reflectancias de las dos superficies entonces se puede reescribir la ec (3-7) de lo que resulta la ecuación 3-8:

$$C = \frac{|\rho_b - \rho_t|}{\rho_b} \quad (3-8)$$

En el caso que la tarea visual sea una impresión negra con el fondo blanco, el contraste puede aproximarse a 1,0 (100%), pero para la copia descolorida se considerara menor a 1.0. Las líneas negras contra el fondo blanco son relativamente fáciles de ver, este no siempre es el caso. Una tarea visual difícil de ver puede ser, coser un hilo negro sobre la tela negra, esto requiere un alto nivel de iluminación para proporcionar visibilidad suficiente para alcanzar un buen rendimiento visual. [5]

Al igual que con el tamaño existen dos términos adicionales, contraste de umbral, que básicamente es el menor contraste que una tarea visual puede tener y ser visto el 50% del tiempo en una situación de iluminación dada, con los demás factores establecidos. Y la sensibilidad al contraste que es el recíproco del contraste de umbral. Por lo tanto, un contraste mínimo perceptible de 0.1 produce una sensibilidad de contraste de 10. El contraste mínimo perceptible y la sensibilidad al contraste son muy dependientes de la luminancia de fondo, el tamaño visual del objeto y el tiempo disponible para ver, y, en ese sentido, se relacionan como el tamaño de umbral y la agudeza visual.

La sensibilidad al contraste se representa frente a la luminancia de fondo en la figura 3-7, para un objeto de prueba de 4 minutos arcos, con un tiempo para ver de 0.1 [s].

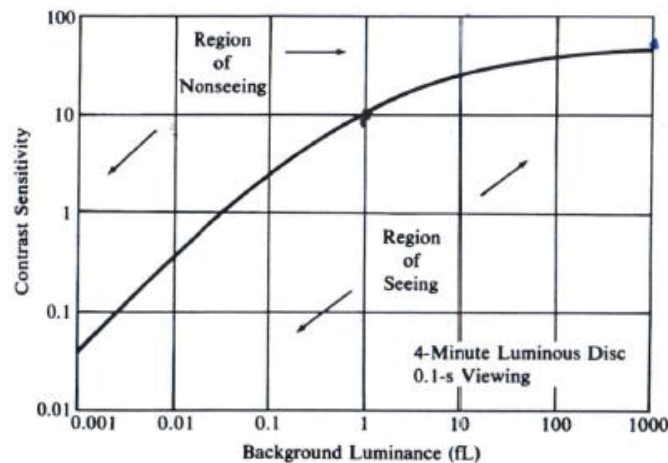


Figura 3-7. Curva de Sensibilidad de contraste. Fuente: IESNA Lighting Handbook.

La curva presentada en la imagen corresponde a una curva de umbral. En niveles altos de luminancia de fondo se presenta una mayor sensibilidad al contraste, pero alcanzando un punto de saturación donde a pesar que se incrementen los niveles de luminancia el objeto quedara en zona de no visión.

Frecuencia espacial

Una rejilla es un patrón de barras rectangulares claras y oscuras alternas. Una rejilla sinusoidal es aquella cuya intensidad de sus barras claras y oscuras cambia sinusoidalmente a medida que se atraviesa la rejilla. Una característica de una rejilla es su frecuencia espacial.

Frecuencia espacial es el número de ciclos (barra de luz a barra oscura a barra de luz) que se producen dentro de un ángulo visual de un grado. Una rejilla de barras estrechas tiene mayor frecuencia espacial que una con barras anchas. Tenga en cuenta que la frecuencia cambia con la distancia desde el ojo. A medida que aumenta esta distancia, aumenta la frecuencia espacial.

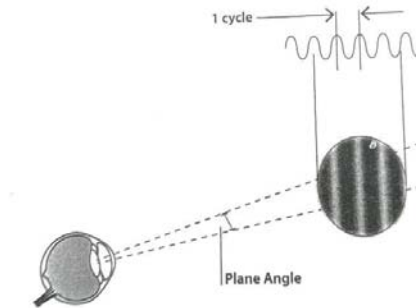


Figura 3-8 Frecuencia espacial. Fuente: IESNA Lighting Handbook

Una segunda característica de una rejilla es el contraste: la diferencia de luminancia entre las barras de luz y oscuridad, este valor puede variar entre 0 y 1.

Una escena al ser vista puede ser considerada como un ensamblaje de rejillas sinusoidales de diferentes frecuencias espaciales y contrastes. Éstos pueden ser analizados matemáticamente por una técnica conocida como análisis fourier, nombrada por Jean Baptiste Joseph Fourier (1786-1830), un matemático francés. Fourier demostró que cualquier forma de onda periódica en el tiempo puede ser representada por una serie de ondas sinusoidales, una con la misma frecuencia (la fundamental) que la de la forma de onda a ser sintetizada, más tantas armónicas (múltiplos enteros) de la fundamental como son necesarias para replicar la onda dada. Usando este mismo principio, se puede replicar y analizar una escena visual con una serie más grande de formas de onda de rejilla en el espacio, donde la frecuencia espacial en ciclos por grado reemplaza la frecuencia temporal en ciclos por segundo (hertz).[8]

La agudeza visual se ha presentado como el recíproco del umbral de tamaño y la sensibilidad al contraste como el recíproco de mínimo contraste perceptible. La función de sensibilidad de contraste combina estos dos conceptos. Es un gráfico del umbral de contraste en función de la frecuencia espacial y es efectivamente la función de transferencia del ojo, aplicada a todos los elementos de rejilla en una escena visual. Una curva típica de la función de sensibilidad al contraste (FSC) se muestra en la figura 3-9. [8]

La curva muestra un área de visibilidad (el área bajo la curva es de visibilidad), las frecuencias espaciales son tales que se puede ver el patrón. En las áreas circundantes (oscuras), los patrones no pueden ser vistos. Se debe tener en cuenta que el FSC tiene tanto un corte de baja y alta frecuencia, es decir, es sólo en el rango medio de las frecuencias espaciales donde los patrones son visibles.

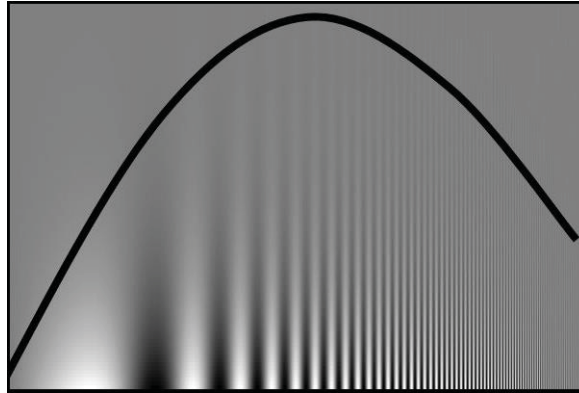


Figura 3-9 Frecuencia espacial. Fuente: IESNA Lighting Handbook

3.1.3 Luminosidad

La luminosidad es una evaluación subjetiva de la luz emitida desde una superficie en comparación con la emitida desde otra superficie. No es luminancia, pero tiene una directa relación con esta. La luminancia es una unidad de medida, en cambio la luminosidad es una respuesta percibida a la luminancia.

Un ejemplo es la nieve en un día soleado, señales de neón en la noche y pantallas de cine son ejemplos de objetos que generalmente se consideran luminosos; pero la luminosidad es una evaluación relativa. Una luna llena durante la noche puede parecer brillante a un observador, sin embargo el observador no consideraría la luna brillante en el cielo del día y para este caso la luminosidad de la luna es la misma en cada caso. Ocurre exactamente lo mismo con las lámparas de alumbrado público luminosas por la noche, pero de día no. Lo que cambia es la luminancia de fondo que envuelve al objeto, para el caso la luminancia es alta durante el día y baja por la noche, esto provoca importantes límites de contraste por la noche.

La luminosidad y la luminancia están relacionadas por una ley conocida como la ley de Steven, ecuación 3-9.

La ley de Stevens es una relación propuesta entre la magnitud de un estímulo físico y su intensidad o fuerza percibida.

$$B = K \times L^{0.3} \quad (3-9)$$

Tabla 3-2 Relación entre luminancia y luminosidad basado en ley de Steven

Luminancia L (cd/m ²)	1	2	3	5	7	10
Luminosidad B (cd/m ²)	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0

Donde L es la luminancia, k es una constante de proporcionalidad que depende del tipo de estímulo y de las unidades usadas, 0,3 es el valor de la exponente para este tipo de estímulo. Esta ley revela que los cambios en luminancia no producen cambios iguales en el brillo de la persona que percibe, la tabla 3-2 muestra resultados para un $K=1$. [5]

La luminosidad cuenta con dos atributos, el primero es la constancia de luminosidad, se explica cuando una persona percibe la misma luminosidad de un objeto cuando existen cambios de iluminancia en la superficie. La luminosidad de un objeto permanece constante aun cuando cambie la iluminación, la luz reflejada del objeto se percibe como constante.

El segundo atributo es el contraste de luminosidad, esta es la propiedad por la cual dos áreas adyacentes, que tienen la misma luminancia, tienen luminosidad diferente debido a sus diferentes fondos.

A modo de resumen en la constancia de luminosidad la percepción permanece constante sobre una amplia variación en el nivel de iluminación. Y el contraste de luminosidad, la percepción de luminosidad no permanece constante, aunque las luminancias del objeto sean iguales.

3.1.4 Tiempo

Siempre es necesario el tiempo para ver. Cuando se viaja en una carretera los conductores que viajan a una determinada velocidad necesitan tiempo para leer los mensajes o identificar las simbologías colocadas en las carreteras (a velocidades mayores, las señales deben encontrarse mucho más lejos). [5]

Otra ejemplo donde se necesita tiempo para ver, es cuando un globo se revienta, donde no se alcanza a ver el momento exacto donde es pinchado con un alfiler y justo comienza el proceso de desinflar, simplemente se ve completamente inflado y luego desinflado. Existe la fotografía de alta velocidad, que es capaz de atrapar un evento que dura solo una milésima de segundo o menos.

El tiempo es necesario para ver, se necesita menor tiempo en el caso que aumentara la luminancia de fondo, manteniendo el tamaño del objeto y su contraste.

Mientras más tiempo se da para ver el objeto, mejora la probabilidad de ver.

4 Modelos de rendimiento visual

4.1 Introducción

Se debe dejar en claro la diferencia entre potencial visual y el rendimiento visual, el potencial visual hace referencia al espacio y las condiciones físicas del ambiente, y el rendimiento visual es el resultado de realizar una tarea visual, se debe tener en cuenta que la creación del primero no garantiza la producción de este último.

Antes de examinar los modelos de rendimiento visual, debe hacerse distinción adicional entre el rendimiento visual y el rendimiento de la tarea. El rendimiento visual es uno de los 3 componentes del rendimiento de la tarea, las otras dos componentes son cognitivas y motoras.

En la figura 4-1 se presenta un esquema de las variables que afectan a una tarea, y principalmente que influyen en una tarea visual. En el esquema se visualiza que el rendimiento visual tiene una componente fisiológica, por lo que se dice que el potencial visual puede estar presente pero no se asegura el rendimiento de la tarea visual.

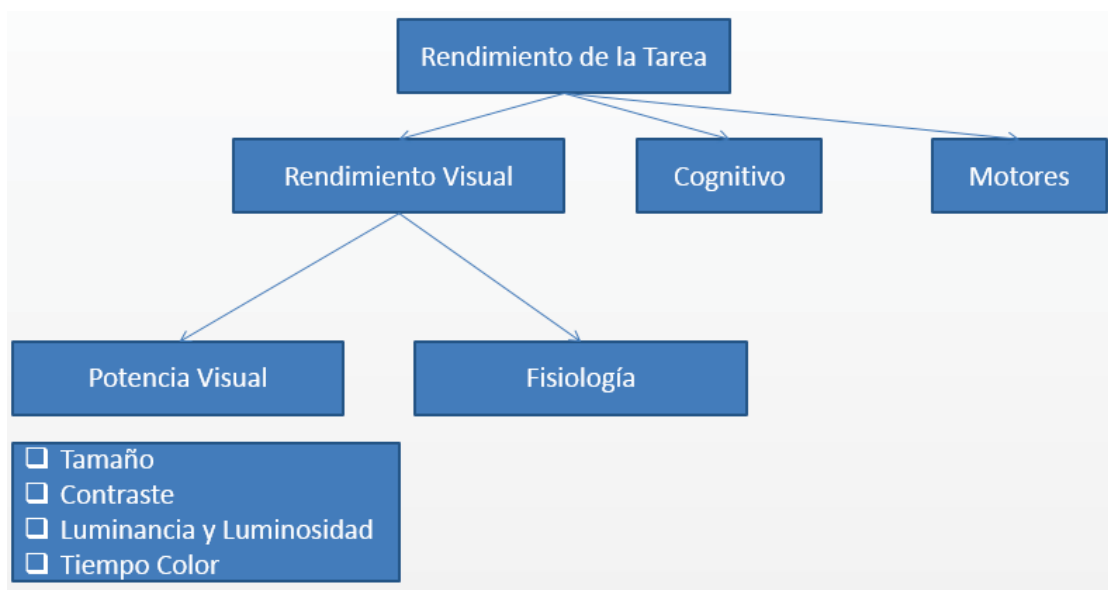


Figura 4-1 Rendimiento de una tarea y sus componentes

Si se considera la actividad de conducir un auto cuando se aproxima a un cruce de ferrocarril y las luces de advertencia del brazo cruzado se encienden. La persona debe detener el coche antes de llegar al cruce, debe ver las luces de advertencia este se identifica como el componente visual de la tarea y puede tener dificultades por condiciones como lluvia, distancia del cruce, parabrisas sucio, brillo, edad e iluminación del brazo transversal. El conductor se da cuenta y ve las luces, el componente cognitivo de la tarea comienza, se llama tiempo de percepción y tiene un valor típico de un segundo. Luego se pasa al componente motor, para esta acción el tiempo de reacción de frenado es de aproximadamente medio segundo (tiempo en que el conductor aplica su pie al freno), luego el tiempo adicional para que el auto se detenga.

El punto de realizar este ejemplo es demostrar que el rendimiento visual es solo una parte del rendimiento de la tarea. Sin embargo es la única parte que se puede afectar a través de cambiar la iluminación y las condiciones de visión.

Investigadores de la visión han desarrollado modelos de rendimiento visual, normalmente con el objetivo final de poder especificar niveles de iluminación para las tareas visuales. En su mayor parte, estos modelos no han logrado este objetivo y por lo tanto el procedimiento para prescribir iluminancias hoy en día es en gran medida basado en el consenso, es decir basado en la experiencia recogida de quienes diseñan instalaciones de iluminación y se encuentra de manera muy simplificada. Esto no quiere decir que la investigación que conduce estos modelos carece de valor. Más bien ha proporcionado a los profesionales un considerable conocimiento del efecto de los factores externos de ver en la visibilidad.

Se presentan 5 modelos de rendimiento visual, dos de estos se desarrollaron entre 1920 y 1940 siendo el primer modelo planteado por los investigadores P.W. Cobb y F.K. Moss, y luego H.C. Weston siguió con su propio modelo de rendimiento visual, cada uno notablemente incisivo con respecto a las interrelaciones entre los factores externos en la determinación de la visibilidad.

Los extensos estudios de umbral de H.R. Blackwell de 1950 a 1980 y los más recientes (1980 y 1990) sobre el rendimiento visual relativo de M.S Rea y M.J. Oullette y sobre el nivel de visibilidad de R. Clear y S.Berman.

Antes de examinar estos modelos, se observa que dos de estos modelos; Cobb Moss y Blackwell, son modelos de umbral. Los modelos de Weston y Rea-Oullette son modelos supra umbral, y Clear-Berman combina experimentos de ambos estilos.

En un experimento de umbral, se requiere que los observadores detecten la presencia o ausencia de un objeto o la discriminación del detalle de un objeto bajo condiciones de iluminación de umbral, es decir, se puede "ver" (50% de respuestas correctas). En un experimento supra umbral, las tareas y sus detalles bajo consideración están por encima del umbral, y los problemas son la velocidad y la precisión de ver, en lugar de simplemente detectar o reconocer.

Se ha intentado relacionar los dos tipos de condiciones a través de multiplicadores, para elevar los datos umbral a niveles supra umbral, pero la validez de estos esfuerzos ha sido cuestionada.

4.2 Modelo COBB-MOSS

P.W.Cobb y F.K.Moss expresaron las relaciones entre el tamaño visual, el contraste, el tiempo y la luminancia en 1920 en una serie de experimentos. Su trabajo se encuentra en la literatura Cobb y Moss, 1928 y se describe en detalle en "The Science of Seeing" (Luckiesh y Moss, 1937). [7]

Para el experimento se realizó una prueba de umbral donde se utilizó un objeto de prueba, que consistía en barras paralelas paralelas, tal como se muestra en la fig. 4-2, con el tercio medio de blanco y las barras exteriores variables de negro a gris claro.



Figura 4-2 Objeto utilizado en el experimento Fuente: IESNA, Lighting Handbook.

A cada observador se pidió detectar el espacio entre las dos barras paralelas. Se utilizó una amplia gama de contrastes de $C = 1$ a $C = 0,02$. El intervalo de separación oscilaba entre 0,5 y 15 minutos de arco. Los tiempos de exposición variaron de 0,075 y 0,3 segundos. Las luminancias de fondo abarcaban un rango de 1 a 1000 fL. Notar que indica que se utilizó un contraste igual a 1 por ende se interpreta factor de reflexión del 100%, lo que no podría ser posible, pero se entiende que era lo que se quería conseguir, un alto contraste. [1]

Los resultados se mostraron en trazado tridimensional, como se muestra en la Fig. 4-3. Con el contraste trazado contra el tamaño, en planos de luminancia constante paralelos al plano de la página. Dos curvas, una punteada y sólida, mostraron los límites de tiempo de exposición.

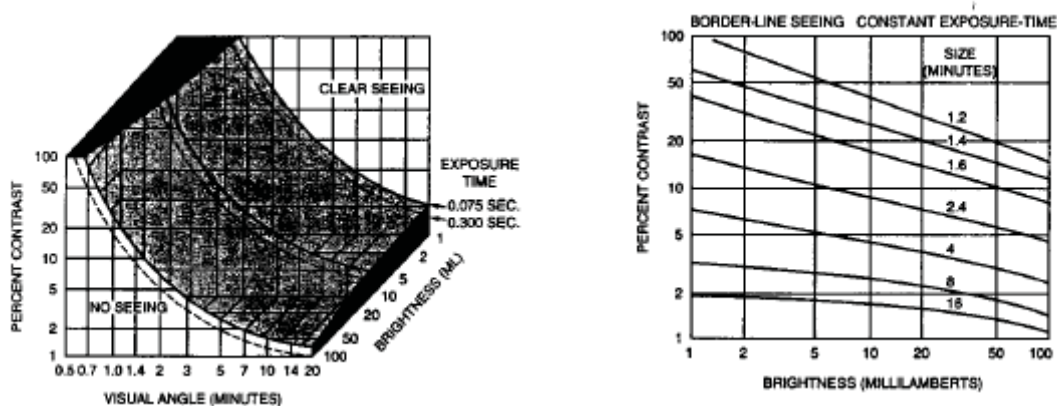


Figura 4-3 Resultados de Luckiesh-Moss experimento de visibilidad. Fuente: "The Science of Seeing".

En el gráfico tridimensional muestra la curva de umbral como varía de acuerdo a las condiciones expuestas. Si se toma en cuenta un objeto de ángulo visual 0,7 min arco, para un tiempo de exposición de 0,3 segundos, es necesario un porcentaje de contraste de al menos 90%, y una luminancia de fondo de 100 millilamberts.

En las curvas de dos dimensiones de la figura 4-3, se representan el contraste versus la luminancia de fondo, para varios valores de tamaños umbral, manteniendo el tiempo constante.

Las curvas son casi lineales en este gráfico, excepto para los tamaños visuales de mayor magnitud.

4.3 Modelo de WESTON

La obra de H.C. Weston ocurrió entre 1935 y 1945 y se divulga en la literatura (Weston, 1945). El experimento de Weston era en condiciones supra umbral y consistía en la detección de los huecos en anillos de Landolt que se encontraban orientados de diferentes maneras, como se muestra en la figura 4-4. Cada hoja de prueba tenía anillos en 8 diferentes orientaciones, correspondientes a las 8 direcciones principales de la brújula.

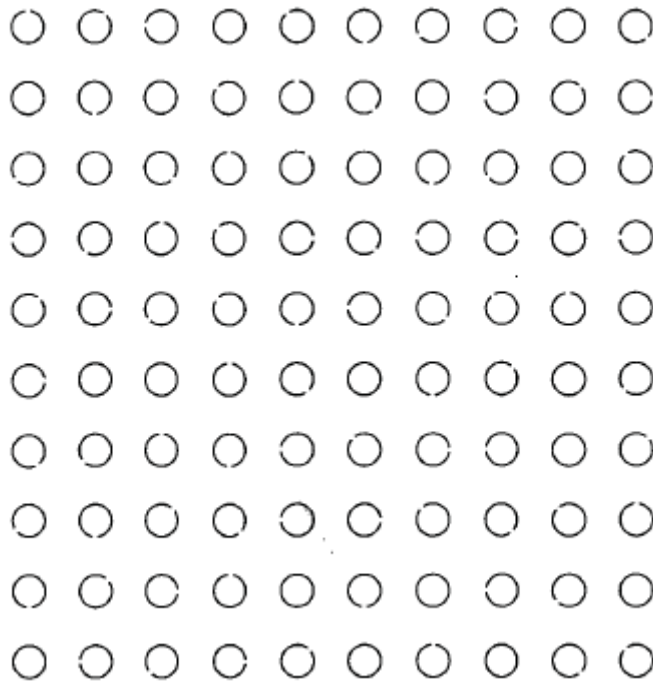


Figura 4-4 Anillos de Landolt utilizados en el experimento de Weston. Fuente: IESNA, Lighting Handbook.

Se pidió a los sujetos que completaran aquellos anillos que tuvieran cierta orientación, la cual era seleccionada por la persona encargada del experimento. Se tomó nota de cuanto demoro cada individuo y los errores cometidos en la cartilla de prueba.

Las condiciones del experimento consistían en cuatro contrastes distintos, que van desde 0,97 hasta 0,28; cinco tamaños visuales que corresponden a la anchura del boquete, que van desde 1 a 6 minutos de arco visual; reflectancias de 38 a 90 por ciento del fondo, en este experimento ya se indican los valores de reflectancia que presentaba el material, y ocho valores de iluminación, de 0,5 a 512 fc, equivalentes a 5,3 a 5500 lux. [10]

Un mínimo de 15 sujetos realizaron el experimento, y cada uno de ellos procesa 65 hojas en cada sesión. Weston fue sensible al hecho de que la acción física de completar un anillo tomó tiempo (la componente motora). Weston ideó una prueba separada para determinar lo que él llama "tiempo de la acción" y la utilizó en el cálculo de rendimiento visual. Su procedimiento de cálculo era el siguiente:

Definir un factor de precisión (AF)

$$AF = \frac{\text{numero de anillos completados correctamente en un minuto}}{\text{número de anillos que debe haber cancelado en un minuto}} \quad (4-1)$$

Luego se define un índice de rendimiento bruto (IP)

$$IP = \text{numero de anillos completados correctamente en un minuto} \times AF \quad (4-2)$$

Tener en cuenta que el índice bruto contempla parámetros de velocidad y precisión.

Para incluir el tiempo de acción que Weston define como AT, se modifica el índice bruto de rendimiento para separar el rendimiento visual VP. [5]

$$\frac{1}{IP} - \frac{1}{AT} = \frac{1}{VP} \frac{\text{minutos}}{\text{anillos}} \quad (4-3)$$

Ejemplo de aplicación del modelo Weston.

Primer Caso: Los resultados de un test realizado son 18 anillos completados correctamente en un minuto, sin embargo el número de anillos que se debió cancelar en un minuto era 20. El tiempo que toma completar un anillo es 0,5 segundos. Encontrar VP (rendimiento visual).

Según Caso: En otra prueba el resultado son 36 anillos cancelados correctamente en un minuto y se debieron cancelar 40, siendo el tiempo de acción 0,5 segundos. Encontrar VP (rendimiento visual).

Primer Caso

$$AF = \frac{18}{20} = 0.9$$

$$IP = 18 \times 0.9 = 16.2 \frac{\text{Anillos}}{\text{minuto}}$$

$$\frac{1}{IP} - \frac{1}{AT} = \frac{1}{16.2} - \frac{1}{120} = 0.053 \frac{\text{minuto}}{\text{anillos}}$$

$$VP = 18.7 \frac{\text{anillos}}{\text{minuto}}$$

Segundo Caso

$$AF = \frac{36}{40} = 0.9$$

$$IP = 36 \times 0.9 = 32.4 \frac{\text{Anillos}}{\text{minuto}}$$

$$\frac{1}{IP} - \frac{1}{AT} = \frac{1}{32.4} - \frac{1}{120} = 0.0225 \frac{\text{minuto}}{\text{anillos}}$$

$$VP = 44.4 \frac{\text{anillos}}{\text{minuto}}$$

En el segundo caso, el índice de rendimiento bruto se ha duplicado, y el rendimiento visual ha aumentado a más de la mitad. Esto sucede porque el tiempo de acción sigue siendo el mismo, recordar que el tiempo de acción corresponde a la componente motora.

Weston fabricó curvas de rendimiento visual relativo (RVP) versus iluminación de la tarea, para valores de contraste y tamaño visual constantes, en la figura 4-4 se muestran curvas para 4 valores de contrastes distintos, y para un tamaño visual de 3 minuto arco.

El rendimiento visual relativo (RVP), es obtenido como el cociente del rendimiento visual real y el rendimiento máximo obtenible, para una iluminación dada, tamaño de boquete dado y el contraste especificado. [5]

El conjunto de curvas que aparece en la figura 4-5 muestran que para un determinado tamaño y contraste, el rendimiento visual relativo (RVP) aumenta a medida que la iluminación de la tarea aumenta. Además, si el contraste aumenta la inclinación de las curvas disminuye, es decir, la visibilidad de las tareas de alto contraste no se incrementa tanto por aumentos en iluminación como para tareas de bajo contraste.

El trabajo de Weston fue realmente fundamental para su época y durante muchos años los británicos utilizaban un rendimiento visual relativo del 90% como base para sus recomendaciones de iluminación. Sin embargo, el modelo de Weston tenía deficiencias.

- a.- Incluye un número limitado de las habilidades visuales y por lo tanto no podría aplicarse a una variedad de tareas visuales
- b.- Requiere hacer una respuesta a una tarea (completar un anillo) antes de proceder a la siguiente tarea (encontrar el siguiente anillo a completar);
- c.-Tenía una gama limitada de los contrastes y tamaños
- d.-Los datos no garantiza la extrapolación, particularmente hacia el umbral.

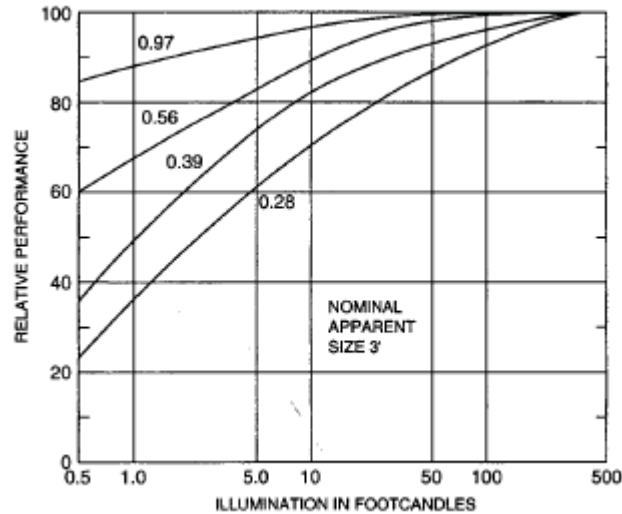


Figura 4-5 Rendimiento Visual Relativo en test de Landolt.
Fuente: IESNA Lighting Handbook.

Las cuatro curvas que aparecen en la figura corresponden a distintos contrastes. Para una curva de 28% de contraste, para alcanzar un rendimiento del 60% se necesita 53 lux de iluminación, mientras que con 53 lux y un contraste del 39% se puede alcanzar un rendimiento del 78%.

Ha sido poco claro cómo Weston realizó sus experimentos y cómo manejó la dispersión en sus resultados. Por lo tanto, no ha sido posible para los investigadores de iluminación actual replicar y validar su trabajo. Weston realizó dos experimentos importantes que rindieron resultados algo diferentes. Adrian de Werner, en el trabajo para el Instituto de investigación de la iluminación, examinó el trabajo de Weston y desarrolló las ecuaciones que se ajusten a los datos del segundo experimento de Weston, ofreciendo así un modelo basado en los datos de Weston (Adrian. 1994). Los estudios de otros investigadores también han producido resultados que apoyan las tendencias mostradas por Weston.

4.4 Modelo de BLACKWELL

Se realizó un estudio exhaustivo de los cuatro factores de percepción visual por H. Richard Blackwell en la década de 1940. Blackwell había estado trabajando para el ejército durante la II Guerra Mundial en un proyecto para determinar la calidad de visión de los militares, y él continuó este trabajo en la Universidad de Michigan y la Universidad Estatal de Ohio después de la guerra.

Sus primeros trabajos fueron divulgados en la literatura (Blackwell, 1946 y 1952) y más tarde fue adoptado y publicado (con algunas modificaciones y salvedades) por la Comisión Internacional sobre iluminación como CIE 19/2. [5]

El experimento consistía en que los participantes tomaban asiento en una sala, frente a una pantalla translúcida en la que se proyectaban una serie de anillos de diversos tamaños durante centésimas de segundo, con contrastes y luz variables. Un participante modelo concluyó cientos

de pruebas. La tarea consistía en seleccionar uno de cuatro períodos de tiempo durante el cual el disco aparecía sobre la pantalla. Se analiza la precisión de los participantes para detectar el objeto que se encuentra en condiciones de visión umbral, Blackwell desarrolló un índice de visibilidad, basado principalmente en el tamaño visual, contraste y luminancia.

La condición que tenían los observadores es que eran jóvenes, entrenados, y tenía visión 20/20, una persona con visión 20/20 es aquella que ve lo que una persona normal ve en una cartilla de agudeza visual cuando está a una distancia de 20 pies.

Una técnica importante que desarrollo Blackwell en su trabajo fue el uso de la técnica de "elección forzada". Sus estudios se realizaron en el umbral, y sus observadores debían elegir a uno de los cuatro intervalos. Él para ajustar sus datos utilizo la siguiente ecuación 4-4:

$$N_a = \frac{N_o - 25}{75} \times 100 \tag{4-4}$$

Donde N_o es el porcentaje de identificaciones correctas dentro de un intervalo de tiempo y N_a es porcentaje corregido. Por ejemplo, si un observador tenía identificaciones correcta en el 90%, la puntuación corregida sería $0,87 \times 100 = 87\%$.

Los resultados del experimento fueron trazados como una familia de curvas, un conjunto que aparece en la figura 4-6. Cada curva presenta contraste versus la luminancia de fondo en las escalas logarítmicas para acotar las curvas, los resultados son para distintos valores de tamaño visual y para un valor de tiempo determinado.

Siete de estos conjuntos aparecen en su investigación, uno para cada una de las duraciones, la expuesta corresponde al tiempo de 1[s]. El eje vertical de cada conjunto de curvas tiene cuatro escalas, una para cada valor del nivel de rendimiento (rendimiento del 99% significa que el objetivo se encuentra a 99 de 100 veces, 50% de rendimiento umbral).

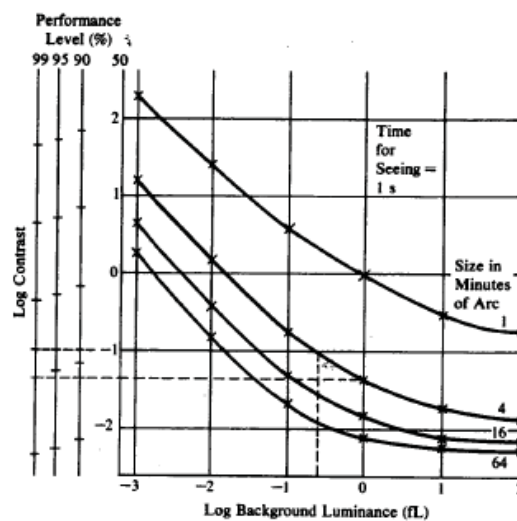


Figura 4-6 Relación de los 4 factores de la visión. Fuente: IESNA, Lighting Handbook."

Ejemplo

Un ejemplo del uso de estas curvas es encontrar la luminancia de fondo necesaria para ver con exactitud de 50% (ver umbral) un objetivo de 4 minutos arco teniendo un contraste con su fondo de 0,1 cuando el objetivo es iluminado para un tiempo determinado de 1[s].

Solución.

Posicionarse en las curvas de la figura 4-5, y mover horizontalmente del valor $-1 \log$ de la línea de contraste en la escala de precisión de 50% y cruzar con la curva de tamaño de 4 minutos en $-0,62 \log$ de la luminancia de fondo. Esto da una luminancia de fondo de 0,24 fL. Luego la luminancia de la tarea de la ecuación puede encontrarse como;

$$0,1 = \frac{|0,24 - L_t|}{0,24}$$

$$L_t = 0,26 fL$$

Supongamos que se desea una exactitud del 99% de discernimiento. Hay dos opciones. Tamaño y contraste se pueden mantener constantes, y se puede aumentar la luminancia de fondo.

De las curvas de la figura 4-5, $L_b = 1,0 fL$, para esta situación, la luminancia de la tarea es $L_t = 1,10 fL$ fL.

Noventa y nueve por ciento de exactitud de discernimiento también se logra aumentando el contraste manteniendo la luminancia de fondo y el tamaño fijo. Procede verticalmente $-0,62$ en el eje de registro L_b el tamaño de 4 minutos de la curva y luego horizontalmente a la escala de 99%, registro $\log C = -0,65$ se puede encontrar, dando $C = 0,22$.

Esto da una luminancia de la tarea de 0,28 fL. La proporción de contrastes requeridos para el 99% y el 50% de rendimiento visual, con todos los demás factores cabo constantes, es de $0,22/0,1 = 2,2$, mientras que la proporción de luminancia de fondo necesaria, con todos los demás factores cabo constantes, es $1,0/0,24 = 4,2$. Así, la visibilidad de la tarea es más sensible en función del contraste en este caso de lo que es a la luminancia de fondo.

En el experimento de Blackwell hay que tener presente que las pruebas fueron desarrolladas en condiciones especiales, donde los observadores sabían cuándo y dónde aparecería la tarea visual. También su visión estaba estática, y no dinámica; es decir, a los observadores no fueron requeridos para analizar con sus ojos antes de centrarse en la tarea visual. Por último, se les pidió solo detectar únicamente la presencia o ausencia de una tarea, no sus detalles. Blackwell postula que cada uno de estos efectos podría ser representado por un multiplicador de contraste, un número mayor que uno que podrían multiplicar los valores de contraste de su estudio original para tener en cuenta estas restricciones adicionales.

De numerosos estudios, estos factores multiplicadores fueron determinados como: [5]

Nombre	Valor
Factor de cuando y donde	1,5
Factor dinámico de la visión	2,78
Factor detección del detalle	2,51
Factor de Agudeza	1,9

Las curvas originales de Blackwell son un poco difíciles de trabajar, debido a que cambian de posición si se consideran los factores multiplicadores. Lo que se necesitaba para simplificar su uso, es una función de referencia estándar de visibilidad la que podría estar relacionada con todas las demás situaciones donde se requiere ver. La condición de umbral es la más fácil de obtener y Blackwell propone relacionar todas las situaciones viendo a este nivel.

También se incluyó el factor del sentido común en el nivel de umbral, la razón es que la mayoría de las veces un objeto debe identificarse, y no sólo se debe detectar su presencia. [9]

¿Qué estándares de tamaño y el tiempo se deben usar? La lectura es la tarea más común de ver, y la duración promedio de las pausas en la lectura es de 0,2s. Así, se estandarizó en una exposición de 1/5 s. Además, un disco circular luminoso de tamaño de 4 minutos fue elegido como el objeto de la prueba estándar.

Lo último necesario era determinar las características de la tarea, el fondo y la luminosidad envolvente. Se decidió establecer una luminancia de fondo que es difusa y requieren una luminancia envolvente uniforme e igual en valor a la luminancia de fondo. Un ambiente de iluminación puede ser producido mediante la colocación de la tarea en el centro de un hemisferio luminoso difusor y así se puede lograr fácilmente en el laboratorio. En la figura 4-7, la función de referencia de visibilidad, se muestra como VL1 (nivel 1 de visibilidad). Repitiendo esto es una curva de umbral de visibilidad de sentido común para una tarea circular de tamaño de 4 minutos con un tiempo de exposición de 1/5[s] para su reconocimiento.

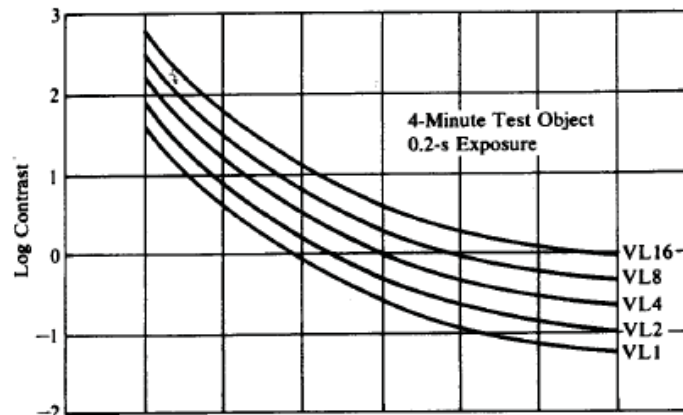


Figura 4-7 Niveles de Visibilidad. Fuente: IESNA Lighting Handbook.

El siguiente paso fue indicar qué nivel de visibilidad razonable a esperar en las tareas "normales" de visión. Blackwell estimó que para una condición normal de visión se requiere el:

- a) 99% de precisión,
- b) Que el observador no debe confiar en saber cuándo y dónde un objeto puede aparecer,
- c) y que debe incluir movimientos oculares normales. Utilizando los multiplicadores de contraste mencionados anteriormente, lo que significa un multiplicador global de $1.5 \times 2.78 \times 1.9 = 7.92 = 8$.

La segunda curva de la parte superior en la figura 4-6 se etiqueta VL8 (nivel 8 de visibilidad) y era el nombre de la función de criterio de rendimiento visual. Para una luminancia de fondo determinada, VL8 representa ocho veces el contraste de la VL1. Es este nivel de visibilidad que tenía por objeto prescribir los niveles de iluminación de tarea.

Ejemplo

Asumir el fondo de la prueba estándar de 4 minutos el objeto tiene una luminancia de 10 fL. ¿Qué luminosidad del objeto de prueba es necesaria para lograr VL1? ¿VL8?

Solución.

De la figura 4-6, para llegar a VL1 (umbral) requiere un contraste de 0,11 a una luminancia de fondo de 10 fL. Para llegar a VL8 requiere un contraste de 0,91. Usando la ecuación de contraste luminancia del objeto de prueba VL1 es 11,1 fL y VL8 es 19,1 fL. Tenga en cuenta que la relación de los dos contrastes es de aproximadamente 8, como debe ser.

Parece que las curvas, proporcionan un procedimiento eficaz y fácil de usar para evaluar los cuatro factores, estableciendo niveles de visibilidad y prescribir iluminancias. Con los años, sin embargo, deficiencias y problemas serios han surgido en su aplicabilidad:

1. El modelo de Blackwell asume curvas de visibilidad supra umbral que son paralelas a las curvas de visibilidad umbral, permitiendo que con un solo multiplicador de contraste pasar de un VL. a otro. Investigaciones posteriores han demostrado que esta aseveración no es correcta.
2. Como se indicó un pequeño porcentaje en cambios en el contraste, a menudo producen gran porcentaje cambios en la iluminación necesaria para el mismo nivel de visibilidad, no en consonancia con experiencias reales y prácticas. Esto es causado otra vez por el supuesto de curvas paralelas.
3. Las curvas de Blackwell se basaron en una tarea que contemplaba un disco de tamaño de 4 minutos, expuesto durante 0,2 segundos. Él extrapolaría esta tarea, a través de contraste equivalente, con una variedad de tareas prácticas. No existen directrices avanzadas en cuanto a hasta qué punto uno podría desviarse de la tarea de disco luminoso antes de que los resultados se convirtieron en no válidos.

Debido a los problemas citados, Blackwell, procedimiento de 19/2 CIE ha descendido de su papel dominante como el modelo de rendimiento visual de opción a partir de 1960 a 1980. Sin embargo, muchas de las ideas avanzadas por Blackwell son muy válidas hoy en día, como ejemplos, el concepto de interpretación de contraste, el equilibrio de la luminancia y contraste y el procedimiento de selección forzada para obtener los datos. El modelo de Clear-Berman es un modelo de nivel de visibilidad que se basa fuertemente en trabajo de Blackwell.

4.5 Modelo de REA-OULLETTE

El modelo Rea-Ouellette es uno de los dos modelos de rendimiento visual contemporáneo que han logrado cierta aceptación (modelo de Rea 1981-1987 y Rea-Ouellette, 1988-1991). Es un modelo que está basado en dos experimentos; el primer experimento es una tarea de verificación numérica, donde los observadores registraron las diferencias que existen entre dos columnas idénticas de números y el segundo experimento es medir el tiempo de reacción en la que observadores detectan la presencia de una escuadra en la pantalla de un computador.[5]

En la prueba de verificación numérica, a los observadores se les pidió comparar dos listas de números impresos como las presentadas en la figura 4-8, la columna de la izquierda es una hoja de referencia, que consta de 20 números de cinco dígitos. Hubo 64 hojas de referencia, 32 con negro brillante sobre un fondo blanco mate y las otras 32 con gris mate impreso en blanco mate. La columna que se encuentra a la derecha en la fig. 4-8 corresponde a una hora de respuestas. Los números en la lista de respuesta fueron los mismos que en la lista de referencia, excepto un dígito siendo diferente en algunos números. Hubo 128 hojas de respuesta, cuatro grupos de 32 hojas, todas las hojas de respuesta fueron impresas de negro mate de alto contraste sobre un fondo blanco mate.

Ocho observadores jóvenes participaron en el experimento. Estaban sentados en un escritorio en una habitación pintada de negro. Se utilizaron ocho posiciones del escritorio. Cuatro niveles de iluminación fueron proporcionados por una luminaria fluorescente montada ligeramente delante de la mesa. La luminancia de fondo de las hojas de referencia, a los ojos del observador, fueron 12, 22, 31 y 169 cd/m² (aproximadamente 47 a 185 lux en la tarea). El tamaño de las cifras de la lista de referencia subtende ángulos de 13 minutos de arco horizontalmente y 19 minutos verticalmente a los ojos del observador.

Los contrastes de la hoja de respuesta variaron de 0,670 a 0,826, en función de la orientación de escritorio con respecto a la iluminación de arriba. La hoja de referencia de negro brillante, presenta contrastes que variaron de 0,199 a 0,894; para la hoja de referencia gris mate presenta contrastes de 0,092 a 0,156. Se pidió a los observadores comparar las listas "rápidamente y con precisión". El tiempo total transcurrido, número de discrepancias y falsos positivos fueron tabulados.

69179	69179
27982	27982
15179	15179
39940	39940
60468	60468
18602	18602
71194	71124
94595	94595
57740	57740
38867	38867
56865	56865
18663	18663
36320	36320
67689	67689
47564	47562
60756	60756
55322	55322
18594	18594

Figura 4-8 Listas de comparación utilizada en el experimento de REA-OULLETE. Fuente: IESNA, Lighting Handbook.

Los resultados del experimento se muestran en la figura 4-9, donde el recíproco del tiempo transcurrido para comparar la referencia y la hoja de respuesta (1/s) enfrenta a contraste de los números en las hojas de referencia para los cuatro valores de luminancia de fondo. Las curvas muestran el efecto de saturación (compresión) del supra-umbral inherente en todos los modelos de rendimiento visual.

De los resultados de este experimento, Rea deriva un modelo computacional, con el objetivo de representar el comportamiento visual relativo, su resultado es el que aparece en la representación tridimensional en la figura 4-10. Lo que realiza Rea es definir la ecuación $VP/VP_{máx}$, como el rendimiento visual relativo, donde VP es el recíproco del tiempo que le toma al individuo realizar la tarea, y $VP_{máx}$ es el recíproco del tiempo mínimo alcanzable donde el individuo realiza la tarea, Rea lo define como el rendimiento máximo alcanzable.

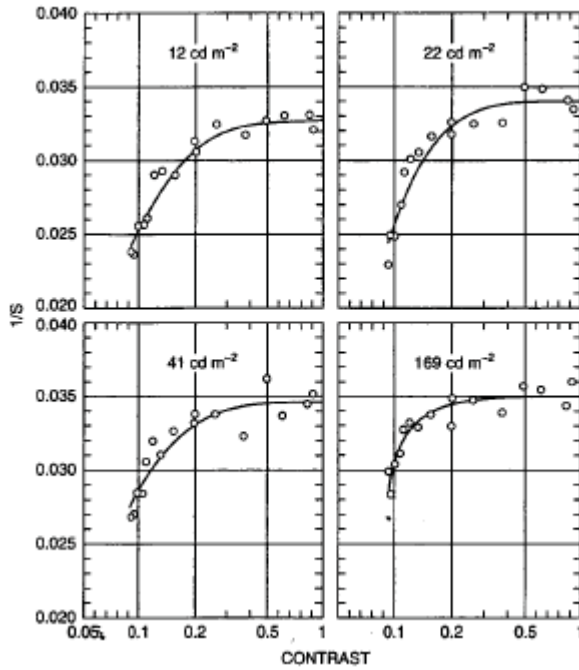


Figura 4-9 Comportamiento visual en Función del Contraste para distintas luminancias de fondo. Fuente: "Toward a model of visual performance: Foundations and data"

Por ejemplo:

Si el individuo demoró en reconocer 5 segundos su rendimiento, VP sería 1/5, y suponiendo un tiempo mínimo de reconocimiento 2 segundos VP_{máx} 1/2, lo que nos da un rendimiento visual de 40%. Todo esto dependerá de las condiciones de iluminación que se encuentre el individuo, además de otros factores.

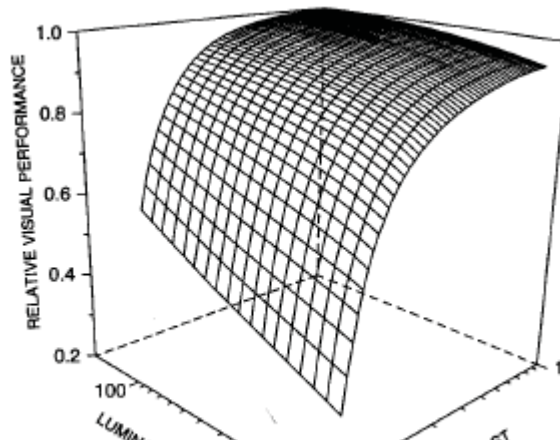


Figura 4-10 Comportamiento Visual Relativo Tridimensional. Fuente: "Toward a model of visual performance: Foundations and data"

El segundo experimento en que se basa el modelo Rea-Ouellette se llevó a cabo no para crear un modelo adicional, sino para validar y ampliar los resultados de la prueba de verificación numérica. Este experimento mide se realiza en condiciones de umbral y se debe detectar un cuadrado blanco de tamaño, contraste variable que se presenta en la pantalla de un computador, nuevamente en este experimento se tabula el tiempo que demora el individuo en detectar el objeto. Se utilizaron contrastes positivos y negativos. Los observadores fueron adultos jóvenes.

El monitor se veía a través de una abertura de 2 mm de diámetro que su efecto era controlar la iluminación retiniana, que era medida en trolands. Un troland (T) es por definición, el producto de la luminancia en cd/m^2 del objeto multiplicada por el área de apertura de la pupila del ojo en mm^2 . Un troland es la iluminación en la retina producida por $1 \text{ cd}/\text{m}^2$ a través de 1 mm^2 de la pupila.

La luminancia retiniana vario entre $0,53$ y $80T$, los tamaños del objeto a detectar en la pantalla variaron entre 2 y 2800 micro-estereorradián, se tabularon los tiempos de reacción y valores de umbral.

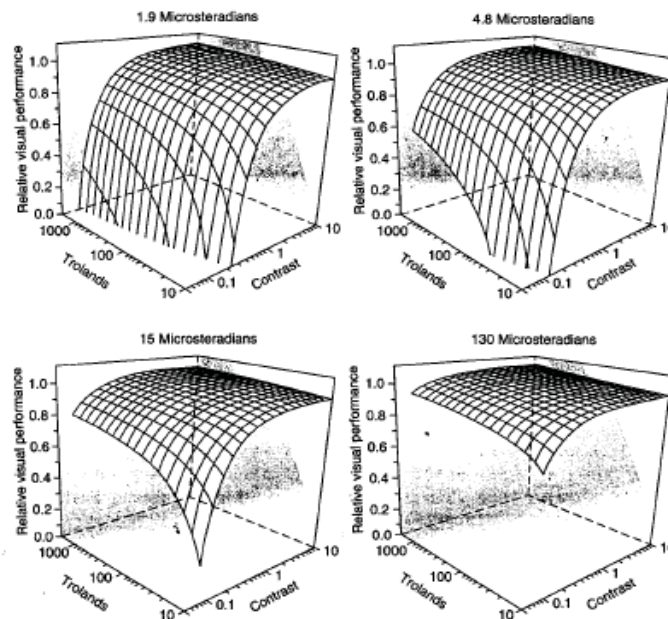


Figura 4-11 Comportamiento Visual Relativo Tridimensional. Fuente: IESNA Lighting Handbook, 9ª edición.

4.6 Modelo CLEAR-BERMAN

Este modelo puede ser utilizado en condiciones de visión umbral y supra umbral por lo tanto, abarca una amplia variedad de tareas visuales. Predice rendimiento absoluto, no relativo. La métrica básica es la velocidad para realizar una tarea, o su recíproco, tiempo total, la suma del tiempo necesario para los componentes no visuales T_{NV} , que incluye la componente cognitiva y tiempos de respuesta motora, más el tiempo necesario para los componentes estrictamente visuales T_V , que incluye la detección, reconocimiento o identificación. El término T_{NV} puede variar en tamaño y luminancia de fondo, pero también puede ser constante para algunas tareas. El término de T_V depende del tamaño, además contiene a VL como su componente principal. Tener velocidad y precisión como variables codependientes es una característica única del modelo Clear-Berman. [5]

Es la ecuación básica de Clear-Berman

$$S = (T_{NV} + T_V)^{-1} \quad (4-5)$$

Donde S es el recíproco del tiempo, T_{NV} y T_V son los tiempos en segundos para realizar la tarea no visuales y visual, respectivamente. Clear Berman postula que el tiempo visual podría ser dado por

$$T_V = \frac{TC}{f(VL)} \quad (4-6)$$

Donde TC es una constante de tiempo que es independiente de VL, pero depende de la luminancia de fondo y el tamaño del objeto. Su valor ha sido determinado por otro investigador (Adrian en su literatura "On the contrast Sensitivity of the Human Eye") estableciendo un rango de 0,12 a 0.35 [s], para una amplia gama de tamaños y de luminancia de fondo. Clear Berman encontró que un único valor de TC = 0.21s proporcionada un ajuste de calidad de los datos.

El término $f(VL)$ es una función del nivel de visibilidad. Sea VL (t) el nivel de visibilidad como una función del tiempo de exposición t. VL (t) puede expresarse en términos $VL(\infty)$, quedando VL para un tiempo de exposición infinito,

$$VL(t) = VL(\infty) \times \frac{1}{t + TC} \quad (4-7)$$

Resolviendo para t

$$t = TC \times \frac{VL(t)}{VL(\infty) - VL(t)} \quad (4-8)$$

Suponiendo que V sea el nivel de visibilidad necesario para obtener una cierta exactitud. Entonces $t = T_V$ y;

$$T_V = TC \times \frac{V}{VL(\infty) - V} \quad (4-9)$$

Reemplazando en ecuación 5.6

$$\frac{VL(\infty) - V}{V} \quad (4-10)$$

Cuando Blackwell desarrolló sus curvas de nivel de visibilidad, empleó un tiempo de exposición de 0.2 [s] y VL1 asignado basado en el "sentido común" de ver (resolución de detalle). Esto requiere un multiplicador de contraste de 2.51 a levantar sus curvas VL sobre detección de selección forzada. Reescribiendo de $VL(\infty)$ en la ecuación 5.8, en términos de VL (0.2) rinde una expresión para T_v en términos de la base de selección forzada.

$$T_v = TC \times \frac{V}{VL(0.2) \times \frac{TC + 0.2}{0.2} - V} \quad (4-11)$$

Entonces la ecuación 5.5

$$S = \left(T_{NV} + \frac{TC}{\frac{TC + 0.2}{0.2} \times \frac{VL(0.2)}{V} - 1} \right)^{-1} \quad (4-12)$$

Si T_c es constante en 0.21s, S se convierte en

$$S = \left(T_{NV} + \frac{0.21}{2.05 \times \frac{VL(0.2)}{V} - 1} \right)^{-1} \quad (4-13)$$

El resultado en la ecuación demuestra que S es una función de VL pero también puede ser una función de iluminancia de fondo y del tamaño del objetivo, a través de TC.

La precisión es una función de sólo VL pero, como se señaló anteriormente, la velocidad y precisión son variables co-dependientes, es decir, V corresponde a una particular precisión deseada.

Discusión y conclusiones

Es posible alejarse de las condiciones umbrales modificando algunas características de la tarea: aumentando el tamaño visual o el contraste del detalle, presentarla durante mayor tiempo o reducir la velocidad si esta fuera el caso. Pero también se puede actuar sobre el medio que rodea la tarea, aumentando la luminancia de adaptación, seleccionando la lámpara con mejores propiedades de color.

El conocimiento de los factores de percepción visual y como se relacionan entre sí, se debe utilizar cuando se proyecten ambientes, para que la iluminación sea de calidad y se encuentre presente el potencial visual.

El objetivo es que las relaciones entre los factores de percepción visual y los resultados expuestos por las gráficas obtenida de los modelos de rendimiento visual, entreguen respuestas acerca de cómo se puede crear o mejorar un espacio iluminado. No necesariamente se debe pensar en aumentar la cantidad de luz de un espacio para mejorar los niveles de iluminación, sino como se puede lograr una buena iluminación utilizando los demás factores como el contraste y el tamaño visual.

Se debe tener en cuenta la tarea visual a realizar, y como se pueden optimizar las relaciones entre factores de percepción visual, para lograr una iluminación satisfactoria para un alto rendimiento visual.

El potencial visual es la componente del rendimiento visual que puede tener modificaciones a través de los factores de percepción visual, ya sea aumentando el tamaño de los objetos, tener en cuenta el contraste del objeto respecto a su fondo, o simplemente aumentado la iluminación de algún espacio.

Existen numerosos trabajos, por lo que en cada uno de ellos existirán diferentes maneras de armonizar los factores de percepción visual. Y su importancia será distinta, dependiendo del nivel de visión que quiere alcanzar el observador.

Si bien este estudio comprende 4 factores, existen otros conceptos que no fueron tomados en cuenta como el índice de reproducción del color y la temperatura de color, factores que hoy en la actualidad toman fuerza debido a los avances tecnológicos. Los modelos de rendimiento visual desarrollados no contemplan el índice de reproducción de color ni la temperatura de color.

Los modelos de rendimiento visual se han desarrollado en base a experimentos empíricos ya sea en condiciones de umbral o supra umbral, y en condiciones de laboratorio. Actualmente no existe un modelo de rendimiento visual 100% aceptado, por lo que aun los niveles de iluminación proyectados se basan en la experiencia principalmente del modelo de Blackwell.

Trabajar cerca de condiciones umbrales no es fácil pues crecen las exigencias sobre casi todas las variables del estímulo que son importantes para el sistema visual. De hecho, puede argumentarse que la principal función de quien diseña la iluminación es proveer condiciones que eviten la necesidad de usar el sistema visual cerca de las condiciones umbrales. Sin embargo, si ésta es la situación, entonces pueden tomarse precauciones y encarar acciones efectivas, para mejorar la eficiencia visual umbral, acordes a cada situación y cada problema, teniendo en cuenta la discusión precedente.

Bibliografía

- [1] Matthew Luckiesh and Frank K.Moss, The New Science of Lighting, publicado por General Electric Company.
- [2] Jhon E.Hall, Guyton y Hall, sexta edición, publicado por Elsevier, en 2016.
- [3] Richard L .Gregory, Eye an Brain, tercera edición, publicado por OXFORD, en 1998.
- [4] Elisa Colombo, Beatriz O´Donell, Carlos Kirschbaum, Iluminación Eficaz, Calidad y Factores Humanos, publicado por Universidad de Tucumán, en 2014.
- [5] Joseph B. Murdoch, Illuminating Engineering, segunda edición, publicado por Visions Communications, University of new hampshire, en 2003.
- [6] Elisa Colombo y Beatriz O´Donell, Luz, Color y Visión, publicado por Universidad de Tucumán, en 2014.
- [7] Matthew Lukiesh, Seeing and Human Walfare, en 1934.
- [8] IESNA, The Lighting Handbook, decima edición, publicado por IESNA, Illuminating engineering society, en 2011.
- [9] H. Rcihard Blackwell, Visual Performance Data for 156 Normal Observers of Various Ages, publicado por IERI, en 1971.
- [10] J.G. Fortuin, Visual power visibility, publicado por PHILIPS, en 1951.