



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

Grado en Óptica y Optometría

TRABAJO FIN DE CURSO

El deslumbramiento molesto sobre la
función visual con tecnología LED

Presentado por: Elena García Jiménez

Tutor: Isabel Arranz de la Fuente

Tipo de TFG: Revisión bibliográfica

Índice

- Resumen - - - - -	-Pág 3
- Abstract - - - - -	-Pág 4
1. Introducción - - - - -	Pág 5
1.1. Justificación - - - - -	Pág 5
1.2. Marco teórico - - - - -	Pág 6
2. Objetivos - - - - -	Pág 9
3. Metodología	
3.1. Estrategias de búsqueda - - - - -	Pág 10
4. Resultados	
4.1. Deslumbramiento producido por tecnología LED - - - - -	Pág 11
4.2. Comparación del deslumbramiento provocado - - - - -	Pág 15
por tecnología LED frente a fuentes de luz incandescentes	
4.3. Comparación del deslumbramiento provocado por fuentes -	Pág 16
de luz azules frente a fuentes de luz naranjas en automóviles	
5. Conclusiones - - - - -	-Pág 18
6. Bibliografía - - - - -	Pág 19

- **Resumen**

El deslumbramiento molesto, según la CIE (CIE, 2020, 17-22-099), se puede definir como aquél deslumbramiento que provoca síntomas de molestias pero sin necesidad de afectar a la percepción de los objetos.

Los objetivos de este trabajo son la búsqueda de las repercusiones del deslumbramiento provocado por la tecnología LED sobre la función visual, la comparación del deslumbramiento ocasionado por la tecnología LED frente a las fuentes de luz incandescentes, y la comparación del deslumbramiento causado por las fuentes de luz azules frente a las fuentes de luz naranjas que llevan los faros de los automóviles.

Se ha llevado a cabo la revisión y búsqueda de diferentes artículos relacionados con el tema con el fin de obtener la información necesaria para poder desarrollar los objetivos descritos en el documento.

Resultados: Se desarrollan en este documento los diferentes factores que influyen sobre el deslumbramiento molesto provocado por la tecnología LED y se demuestra como la temperatura de color afecta a la percepción del mismo. También se explica como no se puede comparar entre el deslumbramiento producido por los LED y el producido por las fuentes de luz incandescentes.

Conclusiones: Se resume lo explicado a lo largo del documento, resaltando los factores más influyentes sobre el deslumbramiento molesto; como que la longitud de onda corta provoca mayor molestia que la longitud de onda larga, y justificando como no es posible comparar la tecnología LED con las fuentes de luz tradicionales en cuanto a deslumbramiento producido.

- **Abstract**

Discomfort glare, according to the CIE (CIE, 2020, 17-22-099), can be defined as the type of glare that causes symptoms of discomfort but doesn't necessarily affect the perception of objects.

The objectives of this work are the search for the repercussions of the glare caused by LED technology on the visual function, the comparison of the glare caused by LED technology versus incandescent lights, and the comparison of the glare caused by blue lights versus orange lights that car headlights have.

The review and search of different articles related to the topic has been carried out in order to obtain the necessary information to be able to develop the objectives described in the document.

Results: In this document, the different factors that influence discomfort glare caused by LED technology are developed and demonstrates how color temperature affects the perception of it. It is also explained how there is no possible comparison between the glare produced by LEDs and that produced by incandescent light sources.

Conclusions: What has been explained throughout the document is summarized, highlighting the most influential factors on discomfort glare; how short wavelength cause more discomfort than long wavelength and justifying how it is not possible to compare LED technology with traditional light sources regarding glare produced.

1. Introducción

La tecnología LED está consiguiendo reemplazar a las fuentes de luz tradicionales en el mercado sobre todo por los grandes beneficios que aporta como una gran eficiencia lumínica, elevada luminosidad, resistencia a bajas temperaturas y una mayor facilidad de manejo. De esta manera, los LEDs han sustituido a las fuentes de luz incandescentes en la industria automovilística, y a las lámparas de sodio de alta presión en el alumbrado vial. Por esta razón, los investigadores llevan a cabo numerosos estudios usando los LEDs como foco principal, centrándose en investigaciones como la del uso correcto de los LEDs para reducir el deslumbramiento molesto, entre otras.¹

Aunque este tipo de tecnología también tiene sus inconvenientes, los cuáles serán desarrollados a lo largo del documento, siendo uno de ellos el deslumbramiento molesto, en el que nos vamos a centrar.

Esta revisión da a conocer como afectan parámetros como la temperatura de color correlacionada (TCC) de la tecnología LED sobre la función visual.

1.1 Justificación

Con la transición de las fuentes de luz tradicionales a la tecnología LED, surgen diversas ventajas e inconvenientes producidas por este cambio.

Uno de los inconvenientes es la sensación de que estas nuevas fuentes de luz deslumbran más que las anteriores, ocurriendo no sólo en interiores pero también en exteriores, tal como se observa en los faros de los automóviles durante la conducción nocturna.

Todo aquél que conduzca o haya viajado en automóvil habrá podido notar como los faros que usan LEDs dan una mayor sensación de deslumbramiento comparado con los faros con fuentes de luz que tradicionalmente usaban los automóviles.

Esta revisión quiere dar a conocer el por qué ocurre esto y que factores influyen en este problema provocado por la tecnología LED.

1.2. Marco teórico

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) es considerada como la principal autoridad en cualquier aspecto relacionado con la luz y la iluminación. Se trata de una organización que se dedica al intercambio de información, entre todos sus miembros, relativo al arte y a la ciencia de la iluminación. Si esta es muy intensa, puede provocar deslumbramiento. La CIE ha definido dos tipos de deslumbramiento:

- el deslumbramiento molesto, que es aquél que provoca molestias sin necesidad de que se produzca una reducción de la agudeza visual, y
- el deslumbramiento perturbador o incapacitante, que es aquél tipo de deslumbramiento que sí provoca una disminución de la agudeza visual, aunque no causa necesariamente síntomas de molestia.

Para identificar las fuentes de luz se usan distintos parámetros como la temperatura de color correlacionada (TCC) que, de forma muy simplista, se puede dividir en la luz azul relacionándose con longitudes de onda corta dentro del espectro visible, y la luz naranja que se relaciona con longitudes de onda larga. Mientras que la distribución espectral o *spectral distribution* es el rango de longitud de onda que es visible por el ojo humano, este rango está comprendido entre los 420 a los 700 nm aproximadamente.

Con el desarrollo de la tecnología LED (LED viene del inglés *lighting emitted diode*) y con los beneficios que esta aporta, en los últimos años, se ha ido incorporando su venta en el mercado.

El deslumbramiento, generado por cualquier fuente de luz, produce una disminución del contraste entre el fondo y el objeto, y un aumento en la detección de objetos cercanos.

Como se ha comentado anteriormente, el deslumbramiento molesto se trata de una sensación de molestia, que puede ser incluso dolorosa, al ver una fuente de deslumbramiento en algún punto del campo visual. Esto resulta, a largo plazo, en fatiga mental, dolores de cabeza y tensión, que puede reducir la atención y seguridad en la carretera. Es decir, el deslumbramiento molesto tiene una respuesta psicológica, lo que hace que sea más complicado explicar sus mecanismos comparado con el deslumbramiento incapacitante. Por ello, es necesario adquirir una mejor comprensión del deslumbramiento molesto provocado por los LED, para así conseguir definir unas pautas para una iluminación más segura de las vías de tránsito.²

Para evaluar el deslumbramiento molesto se usan escalas, la más utilizada es la de deBoer^{3,4,5,6,7}. Se basa en una escala de nueve puntos, donde un valor elevado representa una menor molestia percibida.

Basándose en esta escala, surgieron muchos otros modelos para evaluar el deslumbramiento molesto en iluminación vial. En la mayoría de estos modelos

el deslumbramiento producido por una fuente de luz individual se puede asociar a los cuatro parámetros siguientes:

- 1) La luminancia de la fuente de luz en dirección del ojo del observador
- 2) El ángulo sólido de la fuente de luz desde el ojo del observador
- 3) La excentricidad, o desplazamiento angular, de la fuente de luz con respecto a la línea de visión del observador
- 4) La iluminación global del campo visual que controla el nivel de adaptación del ojo del observador

Estos cuatro parámetros se pueden relacionar mediante una expresión general, siendo esta la más representativa:

$$R_G = \frac{L_s^a \cdot (\Omega_s \cos \theta)^b}{L_f^c \cdot \theta^d}$$

donde

R_G es el índice de deslumbramiento (Glare Rating), que expresa la sensación subjetiva del deslumbramiento en una escala numérica

L_s es la luminancia de la fuente de luz en la dirección del ojo del observador

Ω_s es el ángulo sólido subtendido por la fuente de luz desde el ojo del observador

θ es la excentricidad de la fuente de luz respecto a la línea de visión del observador

L_f es la iluminación global del campo visual que controla el nivel de adaptación del ojo del observador

a, b, c, d son exponentes de ponderación apropiados

Los factores que influyen en el deslumbramiento molesto son los relacionados con la iluminación como la luminancia de la fuente de deslumbramiento; los relacionados con la interacción entre el observador y la fuente de deslumbramiento como el tamaño o la posición de la fuente deslumbradora vista por el observador; los relacionados con características del entorno como el espectro y la temperatura de color, la cual será desarrollada en mayor profundidad a lo largo del documento.

Los factores relacionados con el observador como la edad o el género; los relacionados con características propias de la visión como la corrección óptica o

la densidad óptica del pigmento macular; y los factores relacionados con el estado actual del observador como el estado físico o emocional, o la fatiga que presente el propio observador.

La variedad de factores en el deslumbramiento genera una gran dificultad a la hora de entender y poder cuantificar el mismo; por este motivo este documento se centrará en los factores más relevantes como la luminancia de la fuente deslumbradora, que se puede definir como la intensidad de la fuente por unidad de área de la fuente.

En sus experimentos, Einhorn reconoció que el deslumbramiento molesto aumenta si la luminancia de la fuente de luz también aumenta ^{8, 9}. Más recientemente, un estudio de Völker et al. en el alumbrado vial confirmó la influencia de la luminancia de la fuente deslumbradora sobre la percepción del deslumbramiento molesto ¹⁰.

Otros investigadores han concluido, que cuanto mayor sea la luminancia de la fuente de luz, mayor será el deslumbramiento percibido ¹¹. Se ha sugerido establecer un umbral para la luminancia de la fuente deslumbradora en diversos estudios ^{12, 13, 14, 15}, pero aún no se ha podido llegar a ningún acuerdo para establecer estos valores umbrales.

Aunque haya una existente correlación entre la luminancia de la fuente deslumbradora y la percepción del deslumbramiento molesto, la luminancia de la fuente no puede por sí sola predecir apropiadamente el deslumbramiento ya que otros factores, como el nivel de adaptación, el ángulo sólido o la posición en el campo visual, han sido reconocidos por ser factores que también influyen en esta percepción.

Factor influyente	Referencias principales	Probabilidad de influencia
Luminancia de la fuente de deslumbramiento	Völker et al. 2017 y Carlucci et al. 2015	Muy probable que influya este factor

Tabla 1. Probabilidad de influencia de la luminancia de la fuente deslumbradora

2. Objetivos

El objetivo principal es:

- analizar los efectos del deslumbramiento molesto causados por la tecnología LED y su repercusión sobre la función visual.

Los objetivos específicos son:

- conocer las diferencias del deslumbramiento provocado por la tecnología LED con respecto a las fuentes de luz incandescentes
- comprender las diferencias del deslumbramiento ocasionado por fuentes de luz de longitudes de onda corta frente a fuentes de luz de longitudes de onda larga localizadas en los faros de los automóviles.

3. Metodología

3.1. Estrategias de búsqueda

Para la realización de esta revisión bibliográfica, se llevó a cabo la búsqueda de diferentes artículos encontrados en diversas bases de datos como PubMed, WOS y SCOPUS.

Se realizó una búsqueda bibliográfica exhaustiva en las bases de datos previamente mencionadas, tratando de limitar la búsqueda de artículos publicados en los 10 últimos años aunque a falta de información se ha decidido también usar referencias bibliográficas tradicionales.

Los términos usados para la búsqueda de información están relacionados tanto con el deslumbramiento molesto como con los diferentes tipos de iluminación existentes: *discomfort glare* (deslumbramiento molesto), *mesopic / visual function mesopic* (mesópico / función visual mesópica), *LED*, *spectral distribution* (distribución espectral), *color temperature* (temperatura de color).

4. Resultados

4.1. Deslumbramiento producido por tecnología LED

La popularidad de los LED en el mercado no anticipó que este sistema de iluminación pudiera provocar mayor deslumbramiento que las luces incandescentes a sus usuarios, debido fundamentalmente a que los LED pueden ser observados como líneas o matrices de fuentes de luz.

El deslumbramiento molesto causado por los LED no puede evaluarse mediante métodos convencionales como la UGR (Unified Glare Rating). Este método solo puede ser aplicado para fuentes de luz que cumplan una serie de requisitos como que el ángulo sólido de la fuente de luz vista por el observador debe ser menor o igual a 0.1 sr (que corresponde aproximadamente a una fuente de luz cuadrada de 1 m x 1 m vista a una distancia de 3 m) y mayor o igual a 0.0003 sr (corresponde al ángulo de visión de una luz vista desde abajo usando una fuente de luz incandescente a una distancia de 10 m).

Intensidad luminosa

El deslumbramiento molesto causado por pequeñas fuentes de luz es determinado por la intensidad luminosa, en vez de la luminancia.

Paul, et al. llevó a cabo un experimento, en un ambiente cerrado como una oficina, para explicar las características del deslumbramiento molesto provocado por una fuente de luz pequeña. Llegaron a la conclusión de que el nivel de deslumbramiento está determinado por la intensidad luminosa de las fuentes de luz si estas tienen un tamaño menor a 0.005 m² (lo equivalente a un diámetro de 80 mm). Waters, et al. llevó a cabo otro experimento sobre las características del deslumbramiento molesto causado por fuentes de luz con una distribución de luminancia no uniforme, concluyendo que el deslumbramiento depende en gran medida de la posición de la fuente de luz en el campo visual del observador.

Con esto demostraron que el deslumbramiento molesto causado por un estímulo de luminancia no uniforme es mayor que el causado por uno que es uniforme si la fuente de luz es observada directamente, y el deslumbramiento disminuye cuando la posición de la fuente de luz se encuentra más periféricamente dentro del campo visual ¹⁶.

Por otro lado, Hibino, et al. evaluó el estrés visual provocado por un gran número de LEDs mediante la organización de estos en forma de matriz. Concluyeron que el deslumbramiento aumenta con el incremento de la iluminación en el ojo del observador; también observaron una fuerte correlación entre deslumbramiento e iluminación.

Para una mejor comprensión de los factores influyentes sobre el deslumbramiento molesto que se han mencionado en este apartado conviene explicarlos con más detalle.

La intensidad luminosa de una fuente de luz tiene un efecto importante sobre el deslumbramiento, como se ha mencionado antes. En el alumbrado vial se usan intensidades luminosas para dos ángulos críticos de 80° y 88° (CIE 031-1976). Cuando hay un fuerte gradiente en la distribución de la intensidad luminosa, el índice de control del deslumbramiento (Glare Control Mark), G, está determinado en base a estas intensidades luminosas y podría ser mayor que el grado real de deslumbramiento molesto percibido por el observador.

Uniformidad de la fuente de luz

Además, N. Tuaycharoen señaló que la vista con un amplio rango de luminancia resulta en una mayor percepción de deslumbramiento comparado con un rango de visión más uniforme¹⁷. Por otro lado, E. Mochizuki observó que al usar una ventana cubierta con una pantalla que genera grandes fuentes de deslumbramiento con una distribución de luminancia no uniforme inducía menos deslumbramiento que distribuciones más uniformes¹⁸. Este descubrimiento fue apoyado por Eble-Hankins y Waters, ya que en el experimento que realizaron con fuentes no uniformes fueron valoradas como menos deslumbrantes que las fuentes uniformes¹⁹. Aunque, también se concluyó de este experimento que la frecuencia espacial de los estímulos no uniformes tienen cierto efecto en el deslumbramiento molesto, y este efecto puede variar de acuerdo a la posición de la fuente de luz en el campo visual del observador.

Estudios recientes han observado la influencia de la falta de uniformidad de fuentes de luz artificiales, como los LED, en la percepción del deslumbramiento molesto; por lo que, están trabajando en modificar y buscar alternativas del índice de UGR para fuentes de luz no uniformes^{20, 21, 22, 23, 24, 25, 26}.

Ángulo sólido

Por otro lado, el ángulo sólido es definido como la anchura del estímulo cuando aparece en frente del observador. La distancia de la ventana puede, por tanto, afectar como se percibe el deslumbramiento molesto. Cuanto más alejada esté la ventana del observador, menor será el ángulo sólido subtendido y el deslumbramiento percibido. Velds lo confirmó en su tesis, donde menciona que el observador que se encontraba más alejado de la ventana percibía menos deslumbramiento que el observador que se encontraba más cerca, estando ambos bajo las mismas condiciones de iluminación²⁷. Un deslumbramiento molesto se puede reducir difundiendo la luz que pasa a través de una lente, es decir, aumentando el ratio de luminancia entre el LED simulado y el área periférica. Hopkinson definió el ángulo sólido subtendido por el trozo de cielo visto desde la ventana para referirse al tamaño de la fuente deslumbradora²⁸.

En la primera versión del índice GSV (Glare Sensation Vote), el tamaño de la fuente es evaluado como el ángulo sólido subtendido por toda la ventana hasta el punto de observación ²⁹.

En el índice de DGP (Discomfort Glare Index), el ángulo sólido de la fuente deslumbradora es la suma de los píxeles en una imagen HDR perteneciente a esta fuente ³⁰.

Este factor ayuda a describir el grado percibido de deslumbramiento de acuerdo a la distancia del observador a la fuente y el tamaño de la misma. Recientemente, Rodriguez y Pattini concluyeron por un experimento con una ventana simulada que el tamaño de la fuente tiene el mismo impacto en la percepción del deslumbramiento que la luminancia del estímulo ³¹. En definitiva, estos y otros estudios han confirmado que el incremento del ángulo sólido produce un mayor deslumbramiento molesto ^{32, 33}.

Posición de la fuente

Einhorn respaldó que la posición de la fuente es una de las cuatro variables que influyen en la percepción del deslumbramiento ^{8, 9}. Hopkinson lo describió en función de los ángulos entre la dirección de la fuente de luz y la dirección de visión del observador ²⁸. Otros autores como Chavuel et al., indican que el índice de posición (DGI) está determinado por los ángulos subtendidos por la fuente deslumbradora en las direcciones vertical y horizontal ³⁴. En el alumbrado vial, también fue reconocido que cuanto mayor sea el ángulo desde la línea de visión, menor será el efecto del deslumbramiento ¹⁰.

Iwata y Tokura investigaron la diferencia entre la sensibilidad visual, cuando la fuente deslumbradora se encontraba posicionada por encima o por debajo de la línea de visión ³⁵. A partir de esta investigación se planteó una nueva fórmula que se podía aplicar a las fuentes de luz localizadas por debajo de la línea de visión al observar que la sensación de deslumbramiento era mayor que cuando la fuente de luz se encontraba por encima de la línea de visión. Un índice de posición modificado fue creado a partir de estos descubrimientos, el cuál fue posteriormente usado en el índice DGP ³⁰.

Explicados estos factores se puede entender como influye cada uno de ellos en la percepción del deslumbramiento molesto provocado por los LED. Aunque la influencia de la disposición como también el número de LEDs, y la distribución de luminancia de la fuente de luz no ha sido aclarada; por lo que se llevó a cabo un estudio para aclarar estas incógnitas. En el estudio llevado a cabo por Kasahara T, Aizawa D, Irikura T, Moriyama T, Toda M, Iwamoto M., en 2006, se usó una fuente de luz simulada mientras que se alternaban intervalos, la cantidad de LEDs usados y la posición de los LEDs. ³⁶

Los resultados obtenidos de este estudio se pueden resumir que al incrementar el número de LEDs dentro de la misma zona de la fuente de luz se

puede reducir el deslumbramiento mientras que se mantiene el mismo nivel de iluminación.

4.2. Comparación del deslumbramiento provocado por tecnología LED frente a fuentes de luz incandescentes

Sammarco J, Mayton A, Lutz T y Gallagher S, en 2009, evaluaron el deslumbramiento causado por fuentes de luz incandescentes y LEDs en las lámparas que van incorporadas en los cascos de los mineros en condiciones mesópicas, y no encontraron ninguna diferencia significativa entre el deslumbramiento provocado por los LEDs en comparación por el producido por fuentes de luz incandescentes.³⁷

Sin embargo, los resultados se veían influenciados por la edad del sujeto; mientras que los sujetos de mayor edad afirmaban encontrarse más cómodos usando luces LED de mayor contenido en frecuencia espectral corta, que les proporcionaba mayor sensibilidad al contraste, los sujetos más jóvenes manifestaban una mayor molestia con este tipo de fuente de luz.

Desde un punto de vista más objetivo, con el envejecimiento la sensibilidad a la luz y al contraste, y la cantidad de luz que llega a la retina se reduce, por lo que, varios autores^{38,39,40,41} sostienen que la edad debería tener cierta influencia, por muy pequeña que fuera, en nuestra percepción del deslumbramiento molesto. Por otro lado, Kuhn et al. sugirió que la edad tiene cierta influencia pero que estadísticamente tiene muy poco valor significativo⁴².

Saur⁴³, sin embargo, no observó que la edad supusiera ningún efecto en su estudio sobre los aspectos psicológicos del deslumbramiento molesto en usuarios de automóviles. Tampoco hubo ninguna relación encontrada entre la edad y las valoraciones en los estudios de Vos y Van Bergem, sobre las reacciones subjetivas ante la luz emitida de los invernaderos.⁴⁴

Además, otros autores como Osterhaus⁴⁵, Shin et al.¹⁵ y Hirming et al.⁴⁶ tampoco encontraron ninguna relación estadísticamente significativa entre la edad de los sujetos y el nivel de deslumbramiento percibido en sus respectivos experimentos y encuestas.

La conclusión que se puede sacar de estos estudios es que si hay un efecto de la edad sobre la percepción del deslumbramiento molesto, este no es significativamente relevante, y dependerá más de las características visuales del observador. Son otros, como ya se ha mencionado previamente, los factores que influyen en el deslumbramiento como la distribución espectral, la luminancia de la fuente de luz y la posición de la fuente deslumbradora.

Los LED, por un lado, y las fuentes de luz incandescentes, por otro, pueden provocar deslumbramiento molesto al observador pero no se ha podido establecer una diferencia entre ambas fuentes de luz, por lo que no se puede hacer una comparación entre estas.

4.3. Comparación del deslumbramiento provocado por fuentes de luz azules frente a fuentes de luz naranjas en los faros de los automóviles

Varios experimentos utilizando faros de automóviles y tecnología LED, han demostrado que la fuente de deslumbramiento o el color de fondo llegan a tener una influencia significativa en la percepción del deslumbramiento molesto, al percibirse la luz azul como más incómoda. ^{47, 48, 49, 50, 51}

Otros autores confirman esta sospecha demostrando que las fuentes de luz con mayor longitud de onda corta provocaban una mayor sensación de deslumbramiento. ^{52, 53, 54, 48, 55, 51}

Recientemente, Huang et al. 2017 ha demostrado que fuentes de luz de diferentes distribuciones espectrales pero con el mismo color no genera distinta sensación de deslumbramiento en el observador. ⁵⁶ Esta última investigación, realizada con LEDs, implica que la distribución espectral no influye directamente pero el color de la fuente deslumbradora sí que podría influir. Sin embargo, existe gran controversia pues en un estudio de Ko y Choi no se pudo hallar una influencia entre el color de la fuente de luz y una mayor sensación de deslumbramiento molesto. ⁵⁷

Por ello, sería necesario realizar más investigaciones para poder ampliar los resultados de todos estos estudios.

En definitiva, al aumentar la radiación de las longitudes de onda cortas, aumenta el índice de deslumbramiento molesto.

Por otro lado, los experimentos realizados en el estudio de Caruso D, Fabretto M, Field S, Evans D, Murphy P y Hall C., en 2015, han demostrado que la longitud de onda corta encontrada en los faros que usan LEDs y fuentes de luz HID producen un mayor deslumbramiento que las longitudes de onda largas encontradas en lámparas halógenas. ⁵⁸

Bouma, en 1936, ⁵⁸ llevó a cabo una encuesta sobre los diferentes tipos de deslumbramiento como también sobre los efectos del mismo, y llegó a la conclusión de que las longitudes de onda corta son la causa principal del deslumbramiento percibido por el observador. En 1989, Flannagan ⁵⁸ realizó un experimento similar donde los sujetos fueron expuestos a estímulos monocromáticos de 6 tipos de longitudes de onda diferentes (480, 505, 550, 577, 600 y 650 nm). Los resultados sugieren que las longitudes de onda de 577 nm y 600 nm inducían menor deslumbramiento mientras que las longitudes de 480 nm y 505 nm eran las que más deslumbramiento provocaban.

Dee, en 2003, ⁵⁸ en su tesis doctoral sugiere que los fotorreceptores sensibles a longitudes de onda corta pueden jugar un papel importante en esa sensación de molestia. Fue demostrado que la fuente de deslumbramiento de

450 nm produce significativamente un deslumbramiento mayor para una iluminación similar que el resto de fuentes estudiadas.

En este estudio se ha propuesto una curva de sensibilidad espectral del deslumbramiento molesto:

$$V_{dg}(\lambda) = V_{10}(\lambda) + (0.19 S_s(\lambda))$$

Donde $V_{dg}(\lambda)$ es la sensibilidad espectral del deslumbramiento molesto, $V_{10}(\lambda)$ es la iluminación fotópica en el ojo en un campo de 10° , $S_s(\lambda)$ es la función del cono sensible a la longitud de onda corta y λ es la longitud de onda dada.

Factor influyente	Referencias principales	Probabilidad de influencia
Distribución espectral y color de la temperatura	Yang et al. 2016 y Huang et al. 2017	Muy probable que influya este factor

Tabla 2. Probabilidad de influencia de la distribución espectral y TCC

En conclusión, la distribución espectral y el color de la fuente de luz tienen una pequeña influencia, aunque significativa, sobre el deslumbramiento molesto.

5. Conclusiones

La tecnología LED está permitiendo sustituir las fuentes de luz tradicionales, gracias a sus numerosas ventajas. Sin embargo, este tipo de tecnología sigue en desarrollo debido a ciertos inconvenientes que también provoca, más concretamente, el deslumbramiento molesto. A lo largo de este documento se han desarrollado los factores más influyentes en la percepción de este tipo de deslumbramiento, como la luminancia, la intensidad luminosa, el ángulo sólido o posición de la fuente deslumbradora, entre otros. También, la edad del sujeto, como factor no físico, podría tener una pequeña influencia en el deslumbramiento.

No se han encontrado diferencias estadísticamente significativas entre el deslumbramiento producido por tecnología LED y las fuentes de luz incandescentes, debido a que los factores influyentes estaban más relacionados con la distribución espectral y la temperatura de color que con el tipo de fuente de luz.

Sobre el efecto de la temperatura de color sobre el deslumbramiento molesto varios estudios concluyen que luces con más contenido en longitud de onda corta provocan mayor molestia sobre el observador que luces con mayor proporción en longitud de onda larga. Esto tiene una gran importancia durante la conducción nocturna, ya que los faros que usen LEDs con mayor proporción en longitud de onda corta pueden provocar mayor deslumbramiento en el resto de conductores, y esto puede generar no sólo molestias sino también accidentes.

Por ello, es necesario promover el uso y desarrollo de fuentes de luz que causen el menor deslumbramiento posible para mejorar la conducción nocturna.

6. Bibliografia

1. Czyżewski D. The Photometric Test Distance in Luminance Measurement of Light-Emitting Diodes in Road Lighting. *Energies*. 2023;16(3):1199.
2. Lin Y, Liu Y, Sun Y, Zhu X, Lai J, and Heynderickx I, (2014). Model predicting discomfort glare caused by LED road lights. *Optics express*, 22 (15), 18056.
3. J. B. deBoer and D. A. Schreuder, "Glare as a criterion for quality in street lighting," *Trans. Illum. Eng. Soc.* 32, 117–135 (1967).
4. H. J. Schmidt-Clausen and J. T. H. Bindels, "Assessment of discomfort glare in motor vehicle lighting," *Lighting Res. Tech.* 6(2), 79–88 (1974).
5. J. D. Bullough, J. A. Brons, R. Qi, and M. S. Rea, "Predicting discomfort glare from outdoor lighting installations," *Lighting Res. Tech.* 40(3), 225–242 (2008).
6. J. D. Bullough, K. Sweater-Hickcox, and N. Narendran, "A method for estimating discomfort glare from exterior lighting system," *Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies* 9, 1–7 (2011).
7. J. D. Bullough and K. Sweater Hickcox, "Interactions among light source luminance, illuminance and size on discomfort glare," *SAE Int. J. Passeng. Cars-Mech. Syst.* 5, 199–202 (2012).
8. Einhorn HD. 1969. A new method for the assessment of discomfort glare. *Lighting Research & Technology*. 1(4):235-247.
9. Einhorn HD. 1979. Discomfort glare: A formula to bridge differences. *Lighting Research & Technology*. 11(2):90-94.
10. Völker S, Freyer M, Raphael S, Meyborg M. 2017. Influence factors for discomfort glare of headlamps and a new model for its estimation. *CIE 2017 Midterm Meeting*. Jeju, South Korea. October 21-28, 2017.
11. Carlucci S, Causone F, De Rosa F, Pagliano L. 2015. A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 47:1016-1033.
12. Bülow-Hübe H. 2008. Daylight in glazed office buildings - a comparative study of daylight availability, luminance and illuminance distribution for an office room with three different glass areas. Lund, Sweden: Lund University. No. EBD-R--08/17. 98p.
13. Dubois M-C. 2001. Impact of shading devices on daylight quality in offices - simulations with radiance. Lund, Sweden: Lund University. No. TABK--01/3062. 162p.
14. Lee JS, Kim BS. 2007. Development of the nomo-graph for evaluation on discomfort glare of windows. *Solar Energy*. 81(6):799-808.
15. Shin JY, Yun GY, Kim JT. 2012. View types and luminance effects on discomfort glare assessment from windows. *Energy and Buildings*. 46:139-145.

16. Waters CE, Mistrick RG, Bernecker CA. 1995. Discomfort glare from sources of nonuniform luminance. *The Journal of the Illuminating Engineering Society*. 24(2):73-85.
17. Tuaycharoen N, Tregenza PR. 2007. View and discomfort glare from windows. *Lighting Research & Technology*. 39(2):185-200.
18. Mochizuki E, Iwata T. 2005. Discomfort glare caused by a window screen with non- uniform luminance distribution. *Lux Pacifica 2005*. Cairns, Australia. July 24-26, 2005.
19. Eble-Hankins ML, Waters CE. 2009. Subjective impression of discomfort glare from sources of non-uniform luminance. *The Journal of the Illuminating Engineering Society*. 6(1):51-77.
20. Cai H, Chung T. 2012. Evaluating discomfort glare from non-uniform electric light sources. *Lighting Research & Technology*. 45(3):267-294.
21. Donners MAH, Vissenberg MCJM, Geerdinck LM, van den Broek-Cools JHF, Buddemeijer-Lock A. 2016. A psychophysical model of discomfort glare in both outdoor and indoor applications. CIE 2016 "Lighting Quality and Energy Efficiency". Melbourne, Australia. March 3–5, 2016.
22. Geerdinck LM, Van Gheluwe JR, Vissenberg MCJM. 2014. Discomfort glare perception of non-uniform light sources in an office setting. *Journal of Environmental Psychology*. 39:5-13.
23. Scheir GH, Hanselaer P, Bracke P, Deconinck G, Ryckaert WR. 2015. Calculation of the unified glare rating based on luminance maps for uniform and non-uniform light sources. *Building and Environment*. 84(0):60-67.
24. Scheir GH, Hanselaer P, Ryckaert WR. 2017. Pupillary light reflex and receptive field calculation of visual discomfort for different spatial frequencies and luminance steps. CIE 2017 Midterm Meeting. Jeju, South Korea. October 21-28, 2017.
25. Tashiro T, Kawanobe S, Kimura-Minoda T, Kohko S, Ishikawa T, Ayama M. 2015. Discomfort glare for white led light sources with different spatial arrangements. *Lighting Research & Technology*. 47:316–337.
26. Yang Y, Ronnier Luo M, Ma SN. 2017. Assessing glare. Part 2: Modifying unified glare rating for uniform and non-uniform led luminaires. *Lighting Research & Technology*. 49:727–742.
27. Velds M. 2000. Assessment of lighting quality in office rooms with daylighting systems [PhD dissertation]. [Delft, The Netherlands]: Technische Universiteit Delft (TUD). 231p.
28. Hopkinson RG. 1972. Glare from daylighting in buildings. *Applied Ergonomics*. 3(4):206-215.
29. Tokura M, Iwata T, Shukuya M. 1996. Experimental study on discomfort glare caused by windows: Development of a method for evaluating discomfort glare from a large light source. *Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering*. (489):17-25.

30. Wienold J, Christoffersen J. 2006. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of ccd cameras. *Energy and Buildings*. 38(7):743-757.
31. Rodriguez RG, Pattini A. 2014. Tolerance of discomfort glare from a large area source for work on a visual display. *Lighting Research & Technology*. 46(2):157-170.
32. Lin Y, Liu Y, Sun Y, Zhu X, Lai J, Heynderickx I. 2014. Model predicting discomfort glare caused by led road lights. *Optics express*. 22(15):8056-8071.
33. Tyukhova YI. 2015. Discomfort glare from small, high luminance light sources in outdoor nighttime environments [PhD dissertation]. [Lincoln, USA]: University of Nebraska - Lincoln. 295p.
34. Chauvel P, Collins JB, Dogniaux R, Longmore J. 1982. Glare from windows: Current views of the problem. *Lighting Research & Technology*. 14(1):31-46.
35. Iwata T, Tokura M. 1997. Position index for a glare source located below the line of vision. *Lighting Research & Technology*. 29:172-178.
36. Kasahara T, Aizawa D, Irikura T, Moriyama T, Toda M, Iwamoto M. Discomfort Glare Caused by White LED Light Sources. *Journal Of Light & Visual Environment*. 2006;30(2):95-103.
37. Sammarco J, Mayton A, Lutz T, Gallagher S. Evaluation of glare for incandescent and LED miner cap lamps in mesopic conditions. January 2009.
38. Boyce PR. 2014. Human factors in lighting - third edition. Boca Raton, USA: Taylor & Francis Group. 690p.
39. Karwowski W. 2006. International encyclopedia of ergonomics and human factors - volume 1. Boca Raton, USA: CRC Press. 3652p.
40. Mainster MA, Turner PL. 2012. Glare's causes, consequences, and clinical challenges after a century of ophthalmic study. *American Journal of Ophthalmology*. 153(4):587-593.
41. Narisada K, Schreuder D. 2004. Light pollution handbook. Groningen, The Netherlands: Springer Netherlands. 966p.
42. Kuhn T, Wienold J, Moosmann C. 2013. Daylight glare : Age effects and their impact on glare evaluation. 8th Energy Forum on Solar Building Skins. Bressanone, Italy. November 05-06, 2013.
43. Saur RL. 1969. Influence of physiological factors on discomfort glare level. *Optometry & Vision Science*. 46(5):352-357.
44. Vos J, Van Bergem-Jansen PM. 1995. Greenhouse lighting side-effects: Community reaction. *Lighting Research & Technology*. 27(1):45-51.
45. Osterhaus WKE. 2001. Discomfort glare from daylight in computer offices: What do we really know? *Lux Europa 2001*. Reykjavik, Iceland. June 17-20, 2011.
46. Hirning MB, Isoardi GL, Cowling I. 2014. Discomfort glare in open plan green buildings. *Energy and Buildings*. 70:427-440.

47. Kimura-Minoda T, Ayama M. 2011. Evaluation of discomfort glare from color leds and its correlation with individual variations in brightness sensitivity. *Color research and application*. 36:286 – 294.
48. Sivak M, Schoettle B, Minoda T, Flannagan MJ. 2005. Short-wavelength content of led headlamps and discomfort glare. *The Journal of the Illuminating Engineering Society*. 2(2):145-154.
49. Sweater-Hickcox K, Narendran N, Bullough JD, Freyssinier JP. 2012. Effect of different colored background lighting on led discomfort glare perceptivo. Twelfth International Conference on Solid State Lighting and Fourth International Conference on White LEDs and Solid State Lighting. San Diego, USA. August 12-16, 2012.
50. Van Bommel W. 2015. Road lighting: Fundamentals, technology and application. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. 343p.
51. Yang Y, Ronnier Luo M, Huang WJ. 2016. Assessing glare, part 3: Glare sources having different colours. *Lighting Research & Technology*.
52. Akashi Y, Asano S, Kakuta Y, Fujita T. 2013. Visual mechanisms of discomfort glare sensation caused by leds. CIE Centenary Conference. Paris, France. April 12-19, 2013.
53. Bullough JD. 2009. Spectral sensitivity for extrafoveal discomfort glare. *Journal of Modern Optics*. 56(13):1518-1522.
54. Fekete J, Sik-Lanyi C, Schanda J. 2009. Spectral discomfort glare sensitivity investigations. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 29:1-6.
55. Stringham JM, Fuld K, Wenzel AJ. 2003. Action spectrum for photophobia. *Journal of the Optical Society of America*. 20(10):1852-1858.
56. Huang WJ, Yang Y, Ronnier Luo M. 2017. Discomfort glare caused by white leds having different spectral power distributions. *Lighting Research & Technology*.
57. Ko JK, Choi SY. 2017. Contents development for office smart lights. CIE 2017 Midterm Meeting. Jeju, South Korea. October 21-28, 2017.
58. Caruso D, Fabretto M, Field S, Evans D, Murphy P, Hall C. Market evaluation, performance modelling and materials solution addressing short wavelength discomfort glare in rear view automotive mirrors. *Translational Materials Research*. 2015;2(3):035002.