

PARPADEO DE LA LUZ Y NUEVOS MÉTODOS DE MEDICIÓN

Joachim Gertenbach, Wuppertal

Parpadeo de la luz: estado de la ciencia

Si aparecen rayas aisladas en la imagen de las cámaras digitales, un escáner de código de barras no puede capturar el artículo, el generador TAN (nº de transacción en bancos) no genera un código pin o un pulsioxímetro muestra incorrectamente la saturación de oxígeno, es un indicio de que existe una fuente de luz parpadeante en el entorno. El artículo describe el estado actual de las causas, los efectos biológicos, los métodos de medición y las evaluaciones.

Qué es el parpadeo de la luz

El parpadeo de la luz es un cambio periódico en el brillo o el espectro de la luz. Los posibles efectos sobre el ser humano se han denominado recientemente **TLA**, o artefactos luminosos temporales. Aquí se distingue entre efectos directamente perceptibles, como el parpadeo de una lámpara fluorescente antigua, y efectos que provocan una ilusión, por ejemplo, cuando una rueda que en realidad está girando parece estar parada o girar lentamente hacia atrás.

Frecuencia de fusión del parpadeo y percepciones

La denominada frecuencia de fusión del parpadeo (por encima de la cual el parpadeo deja de percibirse) es esencial para distinguir de qué efecto se trata. Se sitúa en un rango entre 60 Hz y 100 Hz, varía de una persona a otra y depende de lo fotosensible que esta sea. Por regla general, se supone que es de 80 Hz. Las fluctuaciones de luz de una lámpara por debajo de 80 Hz son directamente perceptibles. Esta percepción se denomina parpadeo.

A frecuencias superiores a la frecuencia de fusión del parpadeo, es decir, por encima de 80 Hz, pueden producirse, en determinadas condiciones, los denominados efectos estroboscópicos o efecto de «matriz fantasma».

Mientras que en el caso del parpadeo el ojo en reposo mira una fuente de luz inmóvil, en el caso del efecto estroboscópico un objeto está en movimiento (por ejemplo, una rueda de carreta o un plato de torno) mientras que la línea de visión de quien observa está en reposo (los engranajes de la rueda parecen frenar o no girar en una carreta en movimiento).

Si la persona que observa se desplaza hacia un objeto, por ejemplo, al pasar junto a un piloto trasero LED, la fuente de luz se alinea en el ojo, como si se tratara de una estela de luces o «fantasmas». Por lo que se le conoce como efecto de «matriz fantasma».

Factores de la percepción del parpadeo

El hecho de que el parpadeo pueda percibirse directamente y en qué medida depende de varios factores, tales como

- Frecuencia de parpadeo

Es la frecuencia de las fluctuaciones periódicas de luz de una fuente luminosa. La mayor sensibilidad de una fuente luminosa se encuentra en un intervalo entre 6 y 30 Hz, con un máximo en torno a 16 Hz. Por encima de 80 Hz, el parpadeo suele dejar de percibirse.

Los efectos estroboscópicos suelen detectarse hasta los 2000 Hz. A modo de comparación: las lámparas incandescentes o halógenas tienen una frecuencia de 100 Hz (el doble de la frecuencia de la red eléctrica). En las lámparas de bajo consumo, la frecuencia de parpadeo oscila entre 60 kHz y 100 kHz, mientras que los LED suelen variar entre 40 kHz y 70 kHz, según fabricantes.

- **Profundidad de modulación (modulación porcentual, índice de modulación, porcentaje de parpadeo, Mod %)**

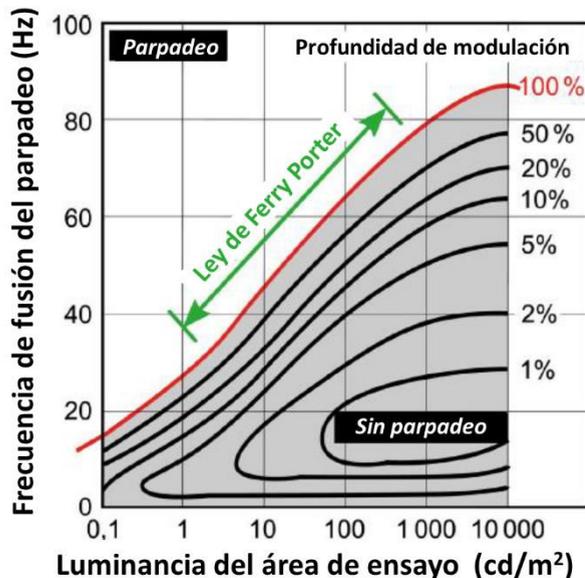


La profundidad de modulación indica la diferencia de amplitud (diferencia de intensidad) entre el valor máximo y mínimo del brillo (luminancia) medido. Se sitúa entre 0 (sin parpadeo) y 1 (parpadeo máximo). En el caso de los dispositivos de medición, también se especifica como valor de Mod % y se correlaciona con la ondulación

especificada en el SBM (denominado allí valor de porcentaje de parpadeo de la luz). Cuanto mayor sea la profundidad de modulación, mayores serán los efectos percibidos.

- **Luminosidad**

Según una ley descubierta por Ferry Porter, la frecuencia de fusión del parpadeo depende



de la luminancia (brillo) de la fuente o superficie iluminada y es casi lineal al logaritmo del cambio de luminancia. Cuanto más luminoso es un entorno de parpadeo, más sensible es el sistema visual humano al parpadeo. Así lo demuestra el aumento de la zona blanca en sentido horizontal.

(Gráfico: C. Schierz LITG 48)

- **Campo de visión**

Cuanto más puntual es una fuente luminosa, más pequeña es su imagen en la retina. Las superficies emisoras de luz más grandes responden a un campo visual más amplio del ojo. El parpadeo se percibe con mayor intensidad en un campo visual más amplio y a unos 30° del centro del eje visual.

- *Color de la luz*

El color de la luz también puede influir en la sensibilidad al parpadeo. Una investigación con luz coloreada ha demostrado que la sensibilidad al parpadeo es menor con una fuente de luz roja a partir de 40 Hz que con fuentes de luz blanca, amarilla, verde o azul.

- *Factores individuales*

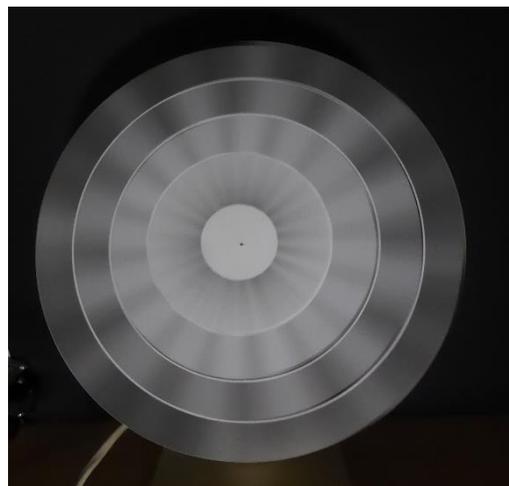
La edad de una persona desempeña aquí un papel importante. Las personas de 20 años son las más sensibles, mientras que las personas mayores se ven menos afectadas por el parpadeo debido a la menor transmisión de luz de su cristalino. También influye el hecho de que la percepción del parpadeo se haya comprobado con uno o con los dos ojos, ya que en este último caso la sensibilidad aumenta aproximadamente entre un 5 y un 8 %. Drogas como la Viagra o el alcohol reducen la sensibilidad al parpadeo, mientras que, por el contrario, el café o las anfetaminas aumentan la frecuencia de fusión del parpadeo.

Factores de la percepción estroboscópica

Debido a la capacidad de resolución temporal del ojo, la percepción directa de las fluctuaciones luminosas (parpadeo) es posible hasta una frecuencia de unos 80 Hz. Los efectos por encima de la frecuencia de fusión del parpadeo se conocen como efectos estroboscópicos y se producen con especial intensidad con señales luminosas de onda rectangular u oscilación de onda rectangular. Estos efectos se producen con la denominada modulación por ancho de pulsos (PWM, *Pulse Width Modulation*). Se trata de un método de regulación para LED en el que la iluminación se enciende y apaga de forma brusca y periódica a plena potencia. Cuanto menor sea el tiempo que la luz está encendida, más se atenúa. Si, por ejemplo, la luz se enciende durante la mitad de un periodo y se apaga el resto del tiempo, esto corresponde a un ciclo de trabajo del 50 % o una luminosidad media. El resultado de esta pulsación es la presencia de varios armónicos con un múltiplo de la frecuencia fundamental. El PWM se utiliza a menudo para controlar el brillo de los monitores de ordenador. En general, los siguientes factores son significativos para la percepción de los efectos estroboscópicos:



Frecuencia 100 Hz
Mod %: 93 LED



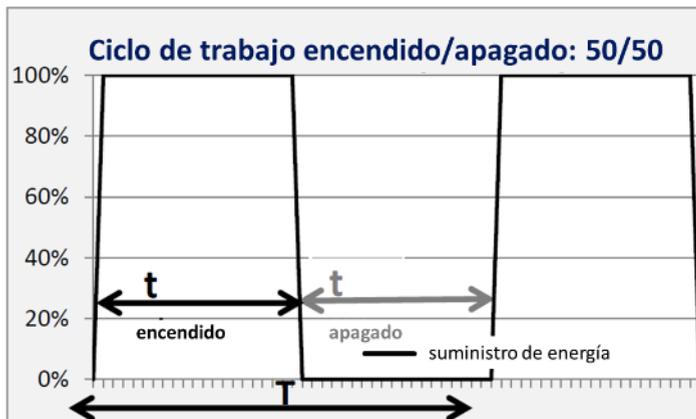
Frecuencia 100 Hz
Mod %: 13 Lámpara incandescente

- Frecuencia fundamental de la ondulación de la luz

Los efectos estroboscópicos con modulación por ancho de pulsos pueden percibirse en la modulación de la luz hasta 20 kHz, dependiendo de la velocidad de rotación o movimiento del objeto. En general, cuanto mayor sea la frecuencia básica a la que pulsa una fuente de luz, menos perceptibles son los efectos estroboscópicos. Se recomienda ajustar la frecuencia básica de la modulación luminosa por encima de 400 Hz.

- Ciclo de trabajo para PWM (modulación por ancho de pulsos)

El ciclo de trabajo del PWM, es decir, la relación entre el tiempo de encendido y el tiempo



de apagado de una fuente luminosa, es un factor esencial para la percepción de los efectos estroboscópicos.

Se ha demostrado que la percepción del efecto estroboscópico es mayor con una relación del 30 al 50 % entre el ciclo de trabajo (fuente de luz encendida) y el tiempo de apagado (fuente de luz apagada).

- Otros factores que influyen

En general, los estudios sobre los factores que influyen en los efectos estroboscópicos no son tan numerosos como los relativos al parpadeo. En principio, sin embargo, las formas de onda, la retroiluminación y la velocidad del objeto en movimiento también influyen en la percepción del efecto estroboscópico.

Fenómenos TLA (artefactos de luz temporales)

En el siglo pasado, los estudios científicos realizados en los lugares de trabajo se centraron inicialmente en la influencia del parpadeo de los monitores de ordenador CRT (Tubo de Rayos Catódicos) y los tubos fluorescentes en las molestias de personas trabajadoras, como dolores de cabeza o molestias oculares.

Entretanto, existen otros estudios científicos que han investigado no solo las características de señal continua de las lámparas incandescentes, sino también las características de señal discontinua de los LED. De la bibliografía se conocen las siguientes molestias (extracto):

- Molestias astenópicas: enrojecimiento de los ojos, ardor ocular, aumento del lagrimeo, visión borrosa, aumento de la sensibilidad al deslumbramiento y dolor de cabeza.
- Aumento de la actividad cerebral en el rango de ondas alfa
- Desencadenamiento de migrañas
- Desencadenamiento de epilepsia, por ejemplo.

Un gran número de estudios también abordan la cuestión de a qué frecuencias, profundidades de modulación y niveles de luminancia se percibe y es aceptable un efecto estroboscópico.

Nuevos métodos de medición

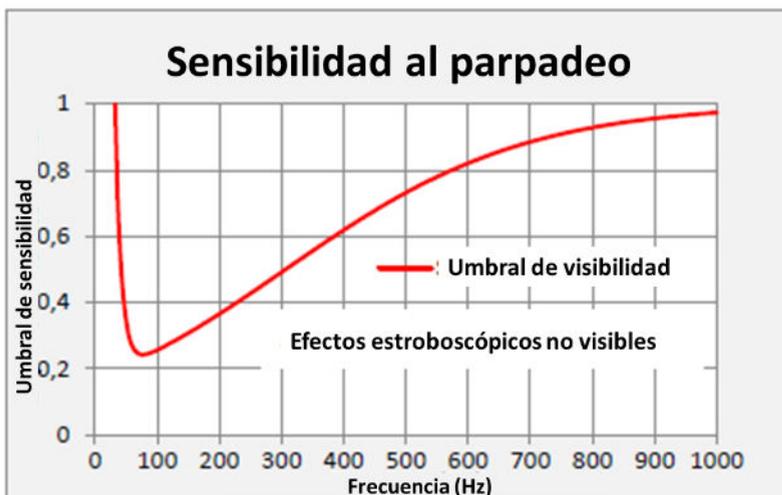
Existen nuevos métodos de medición y evaluación de los efectos de los artefactos de luz temporales (TLA). Estos han sustituido a métodos anteriores como la ondulación, la profundidad de modulación o el índice de parpadeo.

Mediciones hasta 80 Hz (**P_{st} LM**)

Para el rango de frecuencias de percepción directa del parpadeo, es decir, de 0,3 a 80 Hz, se utiliza el método **P_{st} LM** (*short term Perceptibility light flicker method*). Este método de medición filtra en gran medida las frecuencias más altas y relaciona el valor medido con un modelo especial ojo-cerebro. Un valor P_{st} LM=1 significa que existe una probabilidad del 50 % de percibir el parpadeo. Para valores <1, el parpadeo no es visible, mientras que para valores > 1, el parpadeo es visible.

Mediciones por encima de 80 Hz

Para la percepción de los efectos estroboscópicos, se utiliza el método de medición **SVM**



(*Stroboscopic Visibility Measure*) en un rango de frecuencias de 80 Hz a 2000 Hz. A diferencia del método P_{st} LM, aquí se realiza un análisis FFT (*Fast Fourier Transformation*), en el que se estandarizan la frecuencia fundamental y los armónicos y se relacionan con el umbral de percepción de una señal sinusoidal (senoidal).

De nuevo, un efecto estroboscópico no es visible con un valor de SVM < 1, solo visible con una probabilidad del 50 % con un valor de SVM = 1 y (claramente) visible con un valor > 1.

Criterios de valoración y especificaciones

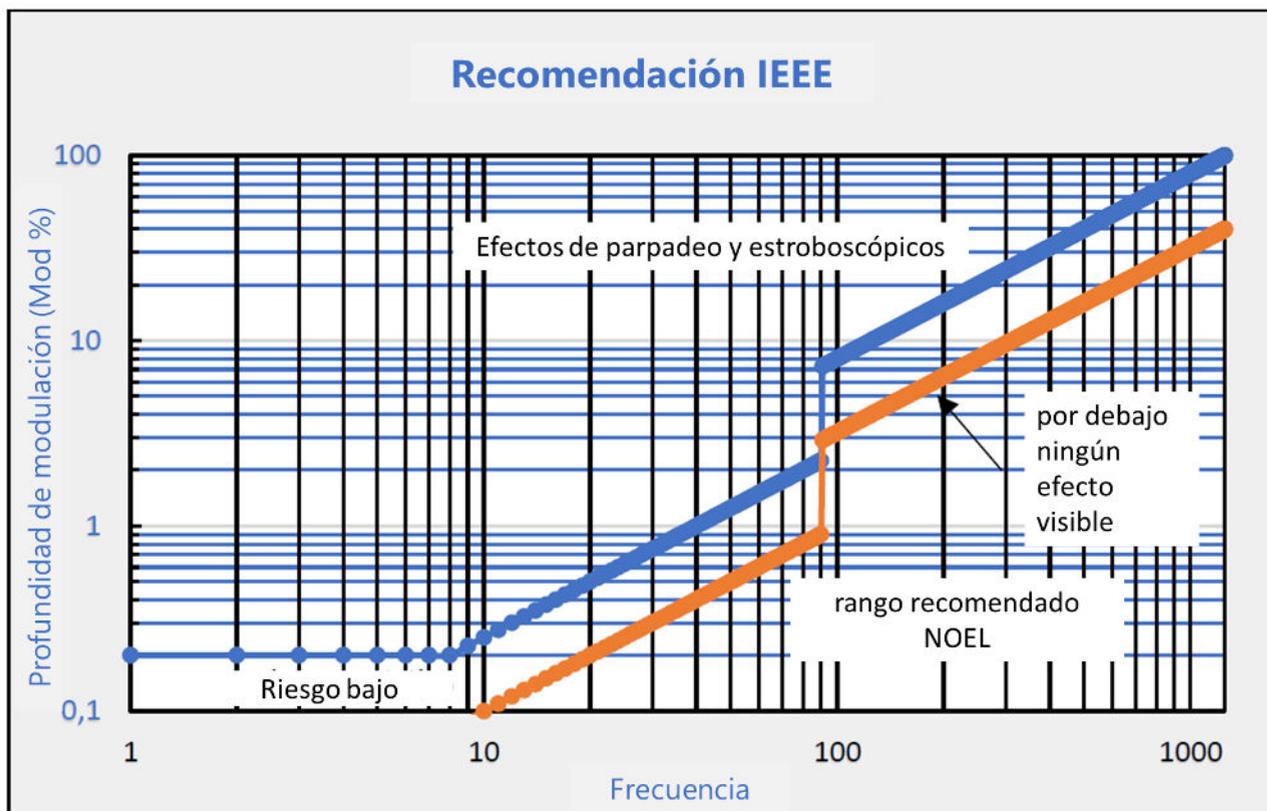
Desde la introducción de la tecnología de semiconductores en la luminotecnica, con sus nuevos métodos de regulación, el problema del parpadeo de la luz ha cobrado mucha más importancia. Mientras que las lámparas incandescentes y halógenas difuminan las fluctuaciones de tensión debido a la inercia del filamento y producen gradientes de luminosidad continuos, los LED y OLED se ajustan directamente la tensión de alimentación y pueden producir modulaciones discontinuas con multitud de armónicos. Por lo tanto, el problema del parpadeo de la luz no se ha vuelto insignificante, como se suele suponer, sino que, por el contrario, ha aumentado. Lo mismo puede decirse de los posibles efectos de la energía sucia o de la comunicación por luz visible (VLC, *Visible Light Communication*).

Mientras tanto, las especificaciones para limitar el parpadeo también se están abriendo camino en la legislación.

- El Instituto Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo (BAUA) exige en sus normas técnicas para lugares de trabajo ASR A3.4 Iluminación: El parpadeo o la pulsación no deben provocar riesgos de accidente (por ejemplo, debido al efecto estroboscópico) ni fatiga.
- El estado norteamericano de California exige una **profundidad de modulación <0,3** para la iluminación con una frecuencia de parpadeo inferior a 200 Hz.
- A partir del 1/9/2021, según la [Directiva de Ecodiseño de la UE 2019/2020](#), se fija un valor de **$P_{st} LM \leq 1$** y un **$SVM \leq 0,9$** para LED y OLED en funcionamiento a plena carga.
- A partir del 1/9/2024, se aplica un **$SVM \leq 0,4$** de acuerdo con la Directiva de Ecodiseño UE.

Otros métodos de evaluación

La [IEEE Standard Association](#) describe un método de precaución. En función de la profundidad de modulación y la frecuencia, define rangos específicos entre **10 Hz-90 Hz** y **100 Hz-2000 Hz** en los que existe un riesgo bajo y no puede observarse efecto visible de parpadeo (NOEL = *no observable effect level*). Los cálculos se refieren exclusivamente a la frecuencia y la profundidad de modulación y no tienen en cuenta ningún otro factor.



Todos los valores por debajo de la línea naranja (NOEL) representan un ámbito sin riesgo, mientras que los valores por encima de la línea azul indican que es probable que se produzca un parpadeo perceptible.

Para una lámpara comercial con una frecuencia de modulación de 100 Hz, esto significa una profundidad de modulación máxima de $0,08f$ (8 %) con riesgo bajo y una profundidad de modulación máxima de $0,03f$ (3 %) como valor recomendado. Esta especificación la cumplen las fuentes luminosas de bajo parpadeo.

Biología del hábitat

El método utilizado en biología del hábitat para medir la ondulación o profundidad de modulación no está, sin embargo, completamente obsoleto, ya que la diferencia calculada entre la luminosidad máxima y mínima tiene una influencia muy grande en la percepción directa e indirecta de los efectos del parpadeo y se aplica también a todas las frecuencias. Esto significa que las lámparas de bajo consumo, los LED, las lámparas incandescentes y las halógenas siguen siendo comparables. Sin embargo, la forma de onda y la frecuencia de parpadeo deben especificarse al mismo tiempo.

Como medida de precaución, la Comisión de Normas, en colaboración con científicos/as, recomienda una **profundidad de modulación de 0,01 (1 %) para la SBM 2024**.

Joachim Gertenbach, Wuppertal

Referencias para este artículo:

- Publicación LITG 48: Perturbaciones y efectos sobre la salud causados por el comportamiento ante el parpadeo de las fuentes de luz artificial. ISBN 978-3-927787-70-4 1ª edición Sept. 2022
- Schierz,C.: Fast temporal light modulations: on the technical status of flicker evaluation en Light2021 Conference Proceedings
- IEEE Standard Association: Recommended Practices for modulating Current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers; IEEE Std 1789TM2015; ISBN 978-0-7381-9644-2
- CIE: Aspectos visuales de los sistemas de iluminación modulados en el tiempo - Definiciones y modelos de medición; CIE TN 006:2016
- IEC: Equipos para alumbrado general - Requisitos de inmunidad CEM - Parte 1: Método de ensayo objetivo de inmunidad a las fluctuaciones de tensión; IEC TR 61547-1; ISBN 978-2-8322-2649-0
- ZVEI Fachverband Licht: Light modulation Temporal Light Artefacts and interaction with technical devices, noviembre de 2021
- Current Biology Vol 16 No 2R44 La Viagra ralentiza la respuesta visual al parpadeo [https://www.cell.com/current-biology/pdf/S0960-9822\(06\)01023-2.pdf](https://www.cell.com/current-biology/pdf/S0960-9822(06)01023-2.pdf)
- Harding, G.F.A.; Photosensitive Epilepsy, Londres: Mac Keith Press,1994

Artículo original:

<https://baubiologie.de/downloads/messverfahren-flimmern-kuenstlicher-beleuchtung.pdf>

Traducción: Instituto Español de Baubiologie (IEB) www.baubiologie.es