

TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN
ANTE FLUCTUACIONES DE TENSIÓN:
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y
CONTROL DE INMUNIDAD

AUTOR:

IZASKUN AZCARATE BLANCO

DIRECTOR:

JOSÉ JULIO GUTIÉRREZ RUIZ

TESIS DOCTORAL

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES

Bilbao, Octubre 2016

*Dedicado a Fran y Martina,
Nati, Fernan y Pello*

RESUMEN

La integración de las nuevas tecnologías de iluminación en la red eléctrica supone un reto desde el punto de vista de la calidad del suministro eléctrico y, en concreto, de la medida del flicker. El estándar IEC 61000-4-15 establece un procedimiento de medida de flicker tomando como referencia la respuesta de la lámpara incandescente. Ante el uso masivo de tecnologías de iluminación eficientes y la retirada de la lámpara incandescente, resulta indispensable analizar la sensibilidad de las nuevas lámparas a las fluctuaciones de tensión. El presente trabajo de tesis presenta un amplio estudio de sensibilidad realizado a un conjunto de lámparas sometidas a diferentes fluctuaciones en su tensión de alimentación.

Los primeros estudios de sensibilidad apuntaban a que las nuevas tecnologías de iluminación presentaban una sensibilidad menor que la lámpara incandescente. En base a estos resultados se recomendaba la reconstrucción del marco de regulación del flicker, adaptándolo a una nueva lámpara de referencia o modificando los actuales niveles de compatibilidad. Los resultados obtenidos en este trabajo de tesis demuestran, de manera concluyente, la invalidez de estas propuestas al comprobar que las nuevas tecnologías de iluminación no tienen por qué llevar asociada una menor sensibilidad a las fluctuaciones de tensión que la que presenta la lámpara incandescente.

Desde el punto de vista metodológico, las conclusiones extraídas se sustentan en un extenso trabajo experimental. Por un lado, se ha analizado la sensibilidad de un conjunto de lámparas tomando como patrón fluctuaciones simuladas de tensión provocadas por modulaciones AM e interarmónicos. En general, los resultados muestran un comportamiento medio menos sensible que la lámpara incandescente. Sin embargo, cabe destacar que algunas de las lámparas superan la sensibilidad de la incandescente en determinados rangos frecuenciales. Por otro lado, se ha completado el estudio analizando

la respuesta de las lámparas a un conjunto de registros de tensión pertenecientes a localizaciones reales de la red del suministro eléctrico. Los resultados cuestionan la asumida insensibilidad de las nuevas tecnologías de iluminación al mostrar sensibilidades divergentes entre las distintas localizaciones, así como discrepancias entre su respuesta ante fluctuaciones de tensión simuladas y reales.

Otro aspecto crítico a analizar es la linealidad en la respuesta de las lámparas para distintos niveles de severidad flicker. El análisis de la linealidad mediante señales reales de tensión ha permitido demostrar que varias de las lámparas bajo estudio muestran un comportamiento claramente no lineal. Por tanto, ante este tipo de señales complejas, no existe garantía de que lámparas caracterizadas como menos sensibles que la incandescente sigan presentando una sensibilidad menor a ésta ante cualquier nivel de severidad flicker.

Finalmente, y en vista de estas conclusiones, se desaconseja modificar el marco actual de regulación del flicker y se plantea que sean los propios fabricantes los que deban controlar la inmunidad que presentan sus lámparas a las fluctuaciones de tensión. Para ello, se propone un procedimiento que permite garantizar, en el propio proceso de fabricación de las lámparas, que éstas no sean más sensibles que la lámpara incandescente. Este procedimiento ha sido incorporado en el informe técnico IEC TR-61547-1 elaborado por el grupo de trabajo MT1 TC34 del IEC, con el objetivo de considerar la incorporación de un procedimiento similar en el estándar de inmunidad para equipos de iluminación de uso general IEC 61547.

ABSTRACT

The introduction into the grid of new lighting technologies poses a significant challenge regarding power quality, and more specifically, regarding flicker measurement. The IEC 61000-4-15 standard establishes a flicker measurement procedure based on the response of the incandescent lamp. Because of the increasing use of efficient lighting technologies and the progressive disappearance of the incandescent lamp, it is necessary to analyse the sensitivity of new lamps to voltage fluctuations. This thesis presents a in-depth study of the sensitivity of a set of lamps subjected to fluctuations in their supply voltage.

The first sensitivity studies suggested that modern lamps were less sensitive to flicker than incandescent lamps. Based on this assumption, two different options were proposed for updating the flicker assessment procedure: to use a new reference lamp technology for the flicker assessment, or to increase the established compatibility levels for voltage fluctuations. The main conclusions of this thesis make the adoption of the aforementioned proposals unfeasible. The obtained results demonstrate that new lighting technologies do not necessarily present a lower sensitivity than the incandescent lamp to voltage fluctuations.

From a methodological point of view, the obtained conclusions are supported by an extensive experimental work. First, the sensitivity of a set of lamps was analysed using simulated voltage fluctuations produced by amplitude modulations or interharmonics. In general, lamps under test show a less sensitive response than the incandescent lamp. However, the sensitivity of some lamps is higher than that of the incandescent lamp over a specific frequency range. Then, the study was completed with the analysis of the sensitivity of the lamps using real voltage signals registered at different locations of the low-voltage grid. The results clearly challenge the assumed insensitivity of new lighting technologies, showing dispersed behaviors across different locations, as

well as inconsistencies between the responses to simulated and real voltage signals.

Another critical aspect is the linearity in the response of the lamps at different flicker severity levels. The study of the linearity using real voltage signals has demonstrated that some of the lamps under test present a clearly non-linear response. Hence, under complex input voltages, there is no guarantee that lamps characterized as less sensitive than the incandescent lamp would maintain this behavior at any flicker severity level.

Finally, in the light of the results, we recommend that the flicker measurement procedure remains unchanged, and that manufacturers control the immunity of their lamps to voltage fluctuations during the design and manufacturing process. To that end, a procedure for the immunity test of lamps is proposed to guarantee that the sensitivity of the lamp under test is lower than the one of the incandescent lamp. This procedure is included in the technical report of the IEC TC34-MT1 working group, with the aim of considering the adoption of a similar procedure in the immunity standard for lighting equipment IEC 61547.

LABURPENA

Erronka handia suposatzen du argiztapen teknologia berrien integrazioa sare elektrikoan hornidura elektrikoaren ikuspuntutik, flicker-aren neurketan zehazki. IEC 61000-4-15 standard-ak flicker-aren neurketa prozedura ezartzen du goritasunezko lanpara-ren erantzunaz erreferentzia gisa. Argiztapen teknologia eraginkorren erabilera masiboa eta goritasunezko lanpara-ren erretiratzearen ondorioz, ezinbestekoa dirudi lanpara berrien sentsibilitatea aztertzea tentsio gorabeheretan. Tesi lan honek hornidura-tentsioan fluktuazio ezberdinak jasotako lanpara multzo bati buruzko sentsibilitate azterketa aurkezten digu.

Sentsibilitateari buruzko lehenbiziko ikerketek argiztapen teknologiek goritasunezko lanpara baino sentsibilitate txikiagoa zutela zioten. Emaitza hauek ikusita, flicker-aren arau-esparruaren berreraikuntza gomendatzen zuten, erreferentzia lanpara berri bati egokituz edota egungo konpatibilitate mailak aldatuz. Tesi lan honetan lortutako emaitzek argi uzten dute proposamen hauen ezintasuna, argiztapen teknologia berriek ez dutelako goritasunezko lanparak aurkezten duena baino sentsibilitate txikiagoa aurkeztu behar.

Ikuspuntu metodologikoa kontuan hartuta, lortutako emaitzek lan esperimental bereziki zabal batean dute oinarria. Alde batetik, lanpara multzo baten sentsibilitatea neurtu da, AM modulazio eta interarmonikoek sortutako tentsio gorabeherak patroi gisa. Orokorrean, emaitzek goritasunezko lanpararen portaeran baino sentsibilitate txikiagoa erakusten dute batzbestekoan. Hala ere, lanpara horietako batzuk goritasunezko lanpararen sentsibilitatea gaintzen dute frekuentzia maila zehatz batzuetan. Beste alde batetik, lan hau osatu da lanpara hauen horniketa elektrikoaren leku zehatzetako tentsio erregistro talde baten erantzuna aztertuz. Emaitzek, zalantzan jartzen dute argiztapen teknologia berrien sentsibilitate eskasa, sentsibilitate ezberdinak ikusten direlako kokapen ezberdinen artean eta desadostasunak egiazko eta itxurazko tentsio gorabeheretako erantzunean.

Flicker-aren maila ezberdinentzako lanparen linealtasuna da aztertzea merezi duen beste puntu kritiko bat. Linealtasunaren analisiak egiazko tentsio seinaleekin lanpara askotako ez-linealtasuna baimendu du argi eta garbi. Seinale konplexu hauen aurrean, beraz, ezin dugu ziurtatu goritasunezko lanparak baino sentsibilitate gutxikoak ikusten ditugunak jarrera berdina erakustea flicker-aren edozein mailan.

Ondorio hauek ikusita, gaur egungo flicker-aren erregulazio sistema mantentzea aholkatzen da eta fabrikatzaileek izatea beraien lanparen tentsio gorabeheretako inmunitatea kontrolatzen dutenak. Horretarako, egintzan bertan ezarri liteken prozedura bat proposatzen da, lanparek goritasunezko lanpara baino sentsibleago ez izatea ziurtatzen duena. Prozedura hau IEC TR-61547-1 txosten teknikoan gaineratu da, IEC-ko MT1 TC34 taldeak egina, IEC 61547-an (erabilera orokorreko iluminazio Inmunitate standard-a) antzeko bat ezartzeko asmoarekin.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	Modelo de referencia para la medida del flicker	3
1.1.1	Fundamentos físicos y fisiológicos de la medida del flicker	6
1.1.2	Descripción del flickermetro IEC	9
1.2	Hacia una iluminación energéticamente eficiente	13
1.2.1	Descripción de las tecnologías de iluminación	14
1.2.2	Evolución de las tecnologías de iluminación	17
1.3	Influencia de la iluminación eficiente en la medida del flicker	20
1.4	Objetivos de la tesis	23
1.5	Estructura de la tesis	24
2	ESTADO DEL ARTE	27
2.1	Primeros estudios de sensibilidad de lámparas eficientes	28
2.1.1	La modulación AM como fuente de generación de flicker	28
2.1.2	Los interarmónicos como fuente de generación de flicker	30
2.1.3	Conclusiones de los primeros estudios de sensibilidad	32
2.2	Estudio de referencia sobre la sensibilidad de las lámparas	34
2.2.1	Sensibilidad a modulaciones AM de tensión	35
2.2.2	Propuesta de modificación del flickermetro IEC	41
2.3	Búsqueda de una nueva referencia para la medida de flicker	42
2.4	Propuesta de tesis	45
3	MATERIALES Y HERRAMIENTAS	49
3.1	Conjunto de lámparas bajo estudio	50
3.1.1	Características eléctricas de las lámparas bajo estudio	52
3.1.2	Características de luminosidad de las lámparas bajo estudio	55
3.1.3	Comportamiento de las lámparas en condiciones de regulación	56
3.2	Sistema para el análisis de sensibilidad de las lámparas	58

3.2.1	Generación de la señal de tensión y adquisición de la luz	59
3.2.2	Herramientas de análisis	66
3.2.3	Verificación del sistema de análisis	70
4	RESPUESTA DE LAS TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN	75
4.1	Problemática del factor de ganancia	77
4.1.1	Curvas de ganancia de las lámparas bajo estudio	77
4.1.2	Limitaciones del factor de ganancia	79
4.2	Sensibilidad en relación a la incandescente	82
4.2.1	Fluctuaciones de tensión provocadas por modulaciones AM	82
4.2.2	Fluctuaciones de tensión provocadas por interarmónicos	90
4.2.3	Valoración subjetiva de la sensibilidad	94
4.3	Comportamiento en escenarios reales	100
4.3.1	Descripción de las localizaciones	100
4.3.2	Sensibilidad ante señales reales de tensión	105
4.4	Sensibilidad en distintos niveles de severidad flicker	111
4.4.1	Fluctuaciones simuladas de tensión	114
4.4.2	Señales reales de tensión	116
4.5	Resumen del capítulo	128
5	CONTROL DE LA INMUNIDAD A LAS FLUCTUACIONES DE TENSIÓN	131
5.1	Descripción del procedimiento	133
5.2	Descripción del sistema de test	134
5.2.1	Calibración del flickermetro de luz	136
5.2.2	Verificación del sistema de test	141
5.3	Aplicación del procedimiento	144
5.4	Resumen del capítulo	146
6	CONCLUSIONES	149
6.1	Aportaciones de la tesis	150
6.2	Proyectos	152
6.3	Difusión de los resultados	153
6.3.1	Publicaciones	154
6.4	Líneas Futuras	157
A	ENSAYOS DE VERIFICACIÓN SEGÚN EL ESTÁNDAR IEC 61000-4-15	159
A.1	Descripción de los ensayos	159

A.2	Resultados de la verificación del flickermetro IEC	164
A.3	Resultados de la verificación del sistema de análisis completo	167
BIBLIOGRAFÍA		171

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Ejemplo de una fluctuación sinusoidal de tensión de frecuencia $f_m = 20$ Hz.	5
Figura 1.2	Ejemplo de la luminosidad de una lámpara incandescente sujeta a una fluctuación sinusoidal en su tensión de alimentación de $f_m = 20$ Hz. . .	5
Figura 1.3	Factores de ganancia de dos lámparas incandescentes de 60 W (120 y 230 V) y una lámpara fluorescente ⁸⁶	7
Figura 1.4	Caracterización de la respuesta del conjunto lámpara-ojo ante fluctuaciones sinusoidales ¹	8
Figura 1.5	Diagrama de bloques del flickermetro IEC especificado en el estándar IEC 61000-4-15. ⁵⁰ . . .	9
Figura 1.6	Característica frecuencial del filtro de ponderación del flickermetro IEC.	11
Figura 1.7	Curva del umbral de molestia o $P_{st} = 1$ ⁴⁸	12
Figura 1.8	Fotografías de las diferentes tecnologías de iluminación. (a) Incandescente; (b) Fluorescente lineal; (c) Fluorescente compacta; (d) De descarga de alta intensidad; (e) LED.	14
Figura 1.9	Evolución histórica de la eficiencia de las distintas tecnologías de iluminación ²⁰	17
Figura 1.10	Cronología de la prohibición de las lámparas ineficientes en diferentes países ⁶²	19
Figura 1.11	Predicción del número de nuevas instalaciones de bombillas por cada tecnología de iluminación ⁶² . .	19
Figura 2.1	Factor de ganancia de 23 CFL sujetas a una modulación sinusoidal de la tensión de 8 Hz ⁸⁶ . . .	29
Figura 2.2	Variación porcentual del valor eficaz y de pico de una señal de tensión afectada por un interarmónico de frecuencia f_{ih} y amplitud del 1%. Método extraído de las referencias de Tayjasanant et al. ⁸¹ y Drapela et al. ²⁵	30

Figura 2.3	Resumen cualitativo de las conclusiones de los primeros estudios sobre la sensibilidad de las lámparas a las fluctuaciones de tensión.	33
Figura 2.4	Resultados de sensibilidad de las lámparas a las fluctuaciones AM de tensión. Figura extraída del trabajo de Cai ⁸	37
Figura 2.5	Amplitud relativa de la fluctuación de la luminosidad de una lámpara LED de 3.4 W para los distintos niveles de fluctuación de tensión generados ⁸ . Figura extraída del trabajo de Cai ⁸	38
Figura 2.6	Amplitud relativa de la fluctuación de la luminosidad de una lámpara incandescente utilizando uno de los reguladores de luz analizados (A). Figura extraída del trabajo de Cai ⁸	40
Figura 3.1	Señales de corriente y tensión registradas para cuatro tecnologías de iluminación diferentes.	53
Figura 3.2	Contenido armónico de la corriente registrada para cuatro tecnologías de iluminación diferentes.	53
Figura 3.3	Señales de luminosidad registradas para cuatro tecnologías de iluminación diferentes.	55
Figura 3.4	Evolución temporal del valor eficaz de la señal de luminosidad de cuatro tecnologías de iluminación diferentes.	56
Figura 3.5	Ejemplo del funcionamiento de un regulador LE. (a) Señal de tensión recortada por el regulador; (b) Señal de luminosidad de una lámpara incandescente en condiciones de regulación.	58
Figura 3.6	Sistema para el análisis de sensibilidad de las lámparas. (a) Diagrama del sistema; (b) Fotografía del sistema.	60
Figura 3.7	Fotografía de la caja utilizada para capturar la luminosidad de las lámparas bajo estudio.	62
Figura 3.8	Diagrama de la base de registros de luz obtenida a través de la realización de los distintos experimentos.	64
Figura 3.9	Diagrama de bloques del flickermetro de luz.	68
Figura 3.10	Respuesta en frecuencia de los distintos filtros utilizados en la obtención de la respuesta del ojo en el flickermetro de luz.	69

Figura 3.11	Puntos de verificación del sistema de análisis implementado	71
Figura 4.1	(a) Curvas de ganancia de las lámparas bajo estudio; (b) Curvas de ganancia de las lámparas bajo estudio normalizadas con respecto a la curva de ganancia de la incandescente.	79
Figura 4.2	Espectro de la luminosidad (en escala logarítmica) de las lámpara I1 y C4 sujetas a una fluctuación AM sinusoidal de tensión con $f_m = 27$ Hz.	80
Figura 4.3	Fluctuación de luminosidad producida por una fluctuación rectangular de $f_m = 27$ Hz en la tensión de alimentación de las lámparas I1 y C4.	81
Figura 4.4	Curva $P_{st} = 1$ para fluctuaciones de tensión sinusoidales y rectangulares obtenida mediante el flickermetro IEC implementado según la descripción de la Subsección 1.1.2	83
Figura 4.5	Valores de P_{st} de las lámparas bajo estudio normalizados respecto a los valores de la lámpara incandescente para fluctuaciones de tensión provocadas por modulaciones AM sinusoidales y rectangulares.	84
Figura 4.6	Valores de P_{st} de las lámparas para fluctuaciones de tensión sinusoidales en diferentes condiciones de regulación de la luminosidad, normalizados respecto a los valores de la lámpara incandescente en su nivel nominal de luminosidad.	88
Figura 4.7	Valores de P_{st} de las lámparas para fluctuaciones de tensión rectangulares en diferentes condiciones de regulación de la luminosidad, normalizados respecto a los valores de la lámpara incandescente en su nivel nominal de luminosidad.	89
Figura 4.8	Comparativa en el comportamiento de 3 lámparas ante una señal de tensión afectada por una modulación sinusoidal, un interarmónico cercano a un armónico par y un interarmónico cercano a un armónico impar. (a) Formas de onda de la tensión; (b) Fluctuación de la luminosidad de 3 lámparas.	91

Figura 4.9	Valores de P_{st} de las lámparas bajo estudio para fluctuaciones de tensión provocadas por la presencia de un interarmónico de frecuencia f_{ih}	93
Figura 4.10	Esquema del entorno habilitado para las pruebas subjetivas.	95
Figura 4.11	Evolución temporal de los valores de P_{st} y P_{lt} en cada localización.	102
Figura 4.12	Tramo de 72 h de la señal real de tensión Loc4; (a) Evolución temporal del valor eficaz de la tensión; (b) DEP calculada con un estimador Welch.	104
Figura 4.13	Evolución temporal de los valores de P_{lt} de las lámparas bajo estudio en cada localización.	107
Figura 4.14	<i>Box-plot</i> de los valores de P_{lt} absolutos (columna izquierda) y normalizados con respecto a I1 (columna derecha), de las lámparas bajo estudio en cada localización.	108
Figura 4.15	Análisis de la respuesta lineal del procedimiento de medida de flicker a partir del diagrama de bloques del flickermetro IEC.	112
Figura 4.16	Valores de P_{st} de tres de las lámparas bajo estudio normalizados con respecto a los valores de la incandescente en función de los valores de P_{st} de la incandescente en la localización Loc2.	117
Figura 4.17	Diagrama del procedimiento seguido para la generación de las fluctuaciones de tensión proporcionales en una señal real de tensión.	118
Figura 4.18	Respuesta frecuencial del filtro notch implementado para la generación de fluctuaciones de tensión proporcionales en una señal de tensión real.	118
Figura 4.19	Tramo de 24 horas del registro real de tensión Loc2; (a) Evolución temporal del valor eficaz de la tensión; (b) Valores de severidad flicker obtenidos para ese tramo.	120
Figura 4.20	Evolución temporal de la relación entre los valores de P_{lt_k} y $P_{lt_{ref}}$ obtenidos mediante el flickermetro IEC.	121
Figura 4.21	Relación entre los valores de P_{lt_k} y $P_{lt_{ref}}$ obtenidos para las siguientes lámparas bajo estudio: (a) L1; (b) F1.	122

Figura 4.22	Relación entre los valores de P_{t_k} y $P_{t_{ref}}$ obtenidos para las siguientes lámparas bajo estudio: (a) C1; (b) C2; (c) C5.	123
Figura 4.23	Relación entre los valores de P_{t_k} y $P_{t_{ref}}$ obtenidos para las siguientes lámparas bajo estudio: (a) C3; (b) C4; (c) L2.	124
Figura 4.24	Valores de P_{t_k} de las lámparas L1, C4, C5 y C2 normalizados con respecto a los valores del modelo de lámpara incandescente.	126
Figura 5.1	Diagrama de bloques del sistema de test del procedimiento de evaluación de la inmunidad de las lámparas.	135
Figura 5.2	Procedimiento para la calibración de la implementación del flickermetro de luz.	136
Figura 5.3	Valores de P_{st}^{LM} de 8 lámparas incandescentes sujetas a fluctuaciones rectangulares de tensión correspondientes a la curva $P_{st} = 1$	137
Figura 5.4	Diagrama de bloques del modelo de la lámpara incandescente de 60 W.	138
Figura 5.5	Diagrama de bloques del modelo modificado de la lámpara incandescente de 60 W.	139

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Comparativa de los costes eléctricos y económicos entre diferentes lámparas.	18
Tabla 2.1	Valores de amplitud relativa de luminosidad obtenidos por Chang et al. ¹¹ para una fluctuación sinusoidal de tensión de $f_m = 10$ Hz y $\frac{\Delta V}{V} = 2\%$	29
Tabla 2.2	Resultados de linealidad obtenidos para dos de las frecuencias analizadas, $f_m = 5$ Hz y $f_m = 15$ Hz. Valores extraídos del estudio de Cai ⁸	39
Tabla 2.3	Valores de amplitud relativa de la fluctuación de luminosidad obtenidos para una lámpara incandescente ante diferentes condiciones de regulación de luz utilizando tres reguladores de luz distintos. Valores extraídos del estudio de Cai ⁸	41
Tabla 2.4	Valores de sensibilidad normalizados para lámparas sujetas a modulaciones AM de tensión. Valores extraídos de los estudios de Chmielowiec ¹³ y Sharma et al. ⁷²	44
Tabla 2.5	Valores de sensibilidad normalizados para lámparas regulables con distintos niveles de regulación aplicados. Valores extraídos del estudio de Sharma et al. ⁷²	44
Tabla 3.1	Descripción de las lámparas bajo estudio.	51
Tabla 3.2	Valores de PF y TPF de cuatro tecnologías de iluminación diferentes.	54
Tabla 3.3	Resultados de la verificación de la señal de tensión de acuerdo a las especificaciones del ensayo 2 del protocolo de verificación del estándar IEC 61000-4-15.	72
Tabla 3.4	Resultados de la verificación del sistema completo de acuerdo a las especificaciones del ensayo 2 del protocolo de verificación del estándar IEC 61000-4-15.	73

Tabla 4.1	Conjunto de lámparas sujetas a fluctuaciones simuladas de tensión.	78
Tabla 4.2	Conjunto de lámparas sujetas a fluctuaciones simuladas de tensión en condiciones de regulación de luminosidad.	86
Tabla 4.3	Conjunto de lámparas utilizadas durante las pruebas subjetivas.	95
Tabla 4.4	Escala de valoración de la percepción para las pruebas subjetivas.	97
Tabla 4.5	Valoración de las pruebas subjetivas tomando como referencia un valor de $P_{st} = 2$ tanto en la lámpara incandescente como en la lámpara a comparar.	98
Tabla 4.6	Valoración de las pruebas subjetivas tomando como referencia un valor de $P_{st}^{I1} = 2$ en la lámpara incandescente y generando un valor de (a) $P_{st}^{LBE} = 2.5$ y (b) $P_{st}^{LBE} = 1.5$ en las lámparas bajo estudio.	99
Tabla 4.7	Entropía espectral de las señales de tensión analizadas.	105
Tabla 4.8	Conjunto de lámparas sujetas a fluctuaciones reales de tensión.	106
Tabla 4.9	T_s : porcentaje de tiempo en el que P_{lt}^{LBE} supera simultáneamente el valor unidad y el 90% del valor de la incandescente, $P_{lt}^N \geq 0.9$	109
Tabla 4.10	Conjunto de lámparas utilizadas en el estudio de sensibilidad de las lámparas en función del nivel de severidad flicker.	114
Tabla 4.11	Valores de desviación en la linealidad $\Delta P_{st}(\%)$ obtenidos con fluctuaciones de tensión rectangulares.	115
Tabla 4.12	Valores de $\Delta P_{st}(\%)$ obtenidos en la valoración de la precisión del método descrito en la Figura 4.17 , tomando como referencia las fluctuaciones de tensión rectangulares que producen un valor de $P_{st} = 1$ en la incandescente.	119
Tabla 4.13	Valores medios de los valores de desviación en la linealidad $\Delta P_{lt}(\%)$ obtenidos con señales reales de tensión.	122

Tabla 5.1	Especificaciones para las fluctuaciones de tensión rectangulares del procedimiento de evaluación de la inmunidad de las lámparas.	134
Tabla 5.2	Valores de P_{st}^{LM} obtenidos para una lámpara incandescente real mediante el flickermetro de luz calibrado a través del modelo de la Figura 5.4 ($S = 3.944 \cdot 10^6$).	138
Tabla 5.3	Valores de P_{st}^{LM} obtenidos para una lámpara incandescente real mediante el flickermetro de luz calibrado a través del modelo de la Figura 5.5 ($S = 1.102 \cdot 10^6$).	140
Tabla 5.4	Especificaciones para el patrón de luminosidad utilizado en la verificación del flickermetro de luz.	143
Tabla 5.5	Conjunto de lámparas sometidas al procedimiento de control de la inmunidad.	144
Tabla 5.6	Valores de P_{st}^{LM} obtenidos al aplicar el procedimiento de control de la inmunidad al conjunto de lámparas bajo estudio.	145
Tabla 5.7	Valores de P_{st}^{LM} obtenidos al aplicar el procedimiento de control de la inmunidad a las lámparas F1, C3 y C4.	146
Tabla A.1	Resumen de las especificaciones de los ensayos de verificación del flickermetro.	160
Tabla A.2	Respuesta normalizada para fluctuaciones de tensión sinusoidales.	160
Tabla A.3	Respuesta normalizada para fluctuaciones de tensión rectangulares.	161
Tabla A.4	Especificaciones de ensayo para fluctuaciones de tensión rectangulares.	161
Tabla A.5	Especificaciones de ensayo para una combinación de variaciones de frecuencia y tensión.	162
Tabla A.6	Especificaciones de ensayo para la tensión distorsionada por múltiples pasos por cero.	162
Tabla A.7	Especificaciones de ensayo para saltos de fase. . .	163
Tabla A.8	Resultados del flickermetro IEC para el ensayo 1 (sinusoidales).	165
Tabla A.9	Resultados del flickermetro IEC para el ensayo 1 (rectangulares).	165

Tabla A.10	Resultados del flickermetro IEC para el ensayo 2 con fluctuaciones rectangulares.	165
Tabla A.11	Resultados del flickermetro IEC para el ensayo 6.	167
Tabla A.12	Resultados del flickermetro de luz para el ensayo 1 (sinusoidales).	168
Tabla A.13	Resultados del flickermetro de luz para el ensayo 1 (rectangulares).	168
Tabla A.14	Resultados del flickermetro de luz para el ensayo 6.	169

ACRÓNIMOS

AM	Amplitude Modulation
BE	Balasto Electrónico
BEM	Balasto Electromagnético
CEM	Compatibilidad Electromagnética
CFL	Compact Fluorescent Lamp
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
CPA	Curva de Probabilidad Acumulada
DC	Direct Current
DEP	Densidad Espectral de Potencia
DFT	Discrete Fourier Transform
DPF	Distortion Power Factor
EE	Entropía Espectral
EPRI	Electric Power Research Institut
HID	High Intensity Discharge
IEC	International Electrotechnical Commission
IIR	Infinite Impulse Response
LBE	Lámpara Bajo Estudio

LE	Leading Edge
LED	Light-Emitting Diode
LFL	Linear Fluorescent Lamp
OLED	Organic Light-Emitting Diode
PF	Power Factor
PLED	Polymer Light-Emitting Diode
SIC	Subgrupo Interarmónico Centrado
SSL	Solid State Lighting
THD	Total Harmonic Distortion
TPF	True Power Factor
UE	Unión Europea
UIE	Unión Internacional de Electrotecnia
UPV	Universidad del País Vasco

1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Every action needs to be prompted by a motive.

— Leonardo Da Vinci

El descubrimiento de la lámpara incandescente a finales del siglo XIX supuso una revolución en el ámbito de la iluminación. Fue Thomas A. Edison quien en 1880 patentó la primera lámpara incandescente comercialmente viable, convirtiéndose en uno de los inventos más utilizados por el hombre desde su creación hasta la fecha. Sin embargo, su bajo rendimiento la ha condenado a desaparecer en un mundo en el que la eficiencia energética juega cada día un papel más importante. Teniendo en cuenta que la iluminación constituye un porcentaje importante del consumo energético mundial, la búsqueda de tecnologías de iluminación cada vez más eficientes está suponiendo una revolución en el sector de la iluminación.

Sin embargo, la aparición de nuevas tecnologías de iluminación también presenta nuevos retos en cuanto a su integración en la red eléctrica. En este sentido se han de tener en cuenta dos aspectos: las perturbaciones que las nuevas lámparas puedan introducir en la red eléctrica y las perturbaciones existentes en la red que puedan afectar a las lámparas. El trabajo de la presente tesis se centra en el comportamiento de las nuevas tecnologías de iluminación ante fluctuaciones de tensión presentes en la red eléctrica. El estándar 61000-2-1⁴⁹ de IEC^a se refiere a esta perturbación como flicker, definiéndolo como la irritación que

^a IEC: International Electrotechnical Commission.

experimentan las personas ante el parpadeo de la luz de una lámpara provocado por fluctuaciones en su tensión de alimentación.

Esta perturbación adquiere gran relevancia cuando se valora la magnitud de las fluctuaciones de tensión que pueden llegar no sólo a provocar molestia sino incluso fatiga visual, migrañas, pérdida de concentración o dificultar actividades cotidianas como la lectura. De acuerdo a los estándares internacionales, variaciones en la luminosidad de una lámpara incandescente provocadas por una fluctuación de la tensión de alimentación de tan sólo el 0.25 % pueden resultar molestas para el sistema visual humano.

La molestia producida por esta perturbación lleva inevitablemente asociadas reclamaciones a la compañía de suministro por parte de los usuarios. Con el objetivo de controlar la magnitud de las fluctuaciones de tensión y sus efectos, surge la necesidad de un instrumento que valore la molestia de una manera objetiva. En el año 1983 se presenta, por medio de una normativa internacional de IEC, un medidor de flicker, en adelante flickermetro IEC, que sigue siendo utilizado actualmente como referencia universal de medida. Para el diseño de este instrumento fue necesario el estudio del comportamiento humano ante fluctuaciones de luminosidad producidas por una lámpara de referencia. En concreto, se empleó la lámpara incandescente ya que, ante las mismas fluctuaciones de tensión, se comportaba de manera más sensible que otras tecnologías de iluminación existentes en la época, como la fluorescente.

Actualmente el uso masivo de tecnologías de iluminación más eficientes, debido a regulaciones nacionales que restringen la comercialización de la lámpara incandescente, ha puesto el foco en la valoración de la sensibilidad que las nuevas tecnologías puedan presentar a las fluctuaciones de tensión. En este sentido, diversos trabajos han alertado de incoherencias entre medidas de flicker fuera de límites y ausencia de reclamaciones. Las primeras reacciones justificaron el problema basándose en la proliferación de las nuevas tecnologías de iluminación eficientes, teniendo en cuenta que la medida del flicker sigue tomando como referencia la lámpara incandescente. De hecho, se asumió que la causa principal residía en la baja sensibilidad que las nuevas tecnologías presentaban a las fluctuaciones de tensión. Este convencimiento orientaba la solución hacia la reconstrucción del marco

de regulación del flicker, adaptándolo a las características de las nuevas tecnologías de iluminación. Sin embargo, en paralelo también surgieron voces críticas que reclamaban mayor extensión de los estudios de sensibilidad antes de tomar decisiones precipitadas, teniendo en cuenta el rápido avance tecnológico de la iluminación.

En este contexto parece inevitable plantearse diversas cuestiones. ¿Es cierto que la mejora de la eficiencia energética va a garantizar una menor sensibilidad que la lámpara incandescente ante cualquier tipo de fluctuación de tensión? ¿Qué medidas serían necesarias en el marco de regulación del flicker para garantizar el control de las fluctuaciones de tensión que producen molestia? El presente trabajo de tesis pretende aportar luz sobre estas cuestiones.

A continuación se presenta un recorrido histórico del procedimiento de medida de flicker que finaliza con la descripción del diseño del propio flickermetro IEC. Por otro lado, se presenta el estado actual del sector de la iluminación y se describe el principio de funcionamiento de las principales tecnologías de iluminación. Finalmente, se contextualiza el trabajo de tesis, presentando la problemática existente entre la iluminación eficiente y su sensibilidad a las fluctuaciones de tensión, así como los principales objetivos del trabajo.

1.1 MODELO DE REFERENCIA PARA LA MEDIDA DEL FLICKER

La molestia que provocan las fluctuaciones de luminosidad depende tanto de la sensibilidad de la lámpara a las fluctuaciones de tensión como de la sensibilidad del usuario a las variaciones de luminosidad. Teniendo en cuenta este último aspecto, se trata de un fenómeno claramente subjetivo que hace que su medida y posterior evaluación no sean tareas sencillas.

El principal objetivo de un medidor de flicker es el de procesar la tensión de alimentación de una lámpara de manera que se pueda tener una indicación objetiva de la sensación visual que experimentaría un

observador expuesto a la fuente de luz. Para comprender correctamente el modelo de medida de flicker, en primer lugar es necesario definir los principales parámetros que caracterizan a las fluctuaciones de tensión que provocan el parpadeo.

Según el estándar IEC 61000-2-1⁴⁹, la amplitud de las fluctuaciones de tensión que provocan flicker no excede del $\pm 10\%$. Esto hace que, a excepción de las fuentes de luz, otro tipo de equipamiento conectado a la red no se vea afectado por esta perturbación. Las fluctuaciones en la tensión pueden ser debidas a variaciones de su valor eficaz o de su valor de pico. Históricamente, el flicker ha estado asociado a variaciones del valor eficaz de la tensión debido principalmente a dos razones. Por un lado, el principal origen de las fluctuaciones de tensión en la red eléctrica ha sido tradicionalmente el consumo irregular de corriente por parte de grandes cargas industriales, como los hornos de arco, lo cual generaba principalmente variaciones en el valor eficaz de la tensión. Por otro lado, la propia lámpara incandescente es únicamente sensible a fluctuaciones en el valor eficaz de su tensión de alimentación pero inmune a las variaciones de pico de la misma. La existencia de interarmónicos en la red puede hacer variar el valor de pico de la tensión y, por tanto, provocar flicker. Sin embargo, en el momento de la definición del modelo para la medida del flicker la polución interarmónica en la red eléctrica presentaba todavía valores poco preocupantes.

En términos del estudio del flicker, las fluctuaciones del valor eficaz de la tensión se han venido representando como variaciones en la envolvente de la tensión o modulaciones en amplitud (AM^b). Este tipo de modulaciones se caracterizan por la variación de la amplitud de una señal portadora en función de una señal de menor frecuencia llamada moduladora. El nivel de molestia causada por esta fluctuación depende de la magnitud de la fluctuación, ΔV , su tasa de repetición, f_m , y la duración de la misma. La [Figura 1.1](#) muestra una fluctuación de tensión sinusoidal de amplitud $\frac{\Delta V}{V} = 10\%$ y de frecuencia $f_m = 20$ Hz, que modula una señal de frecuencia $f_0 = 50$ Hz y amplitud $230 V_{ef}$ ^c. Esta fluctuación de tensión provoca una variación de la luminosidad de una lámpara incandescente de amplitud ΔL y frecuencia f_m sobre una portadora de frecuencia $2 \cdot f_0$ como se muestra en la [Figura 1.2](#).

^b AM: Amplitude Modulation.

^c V_{ef} : Voltios eficaces.

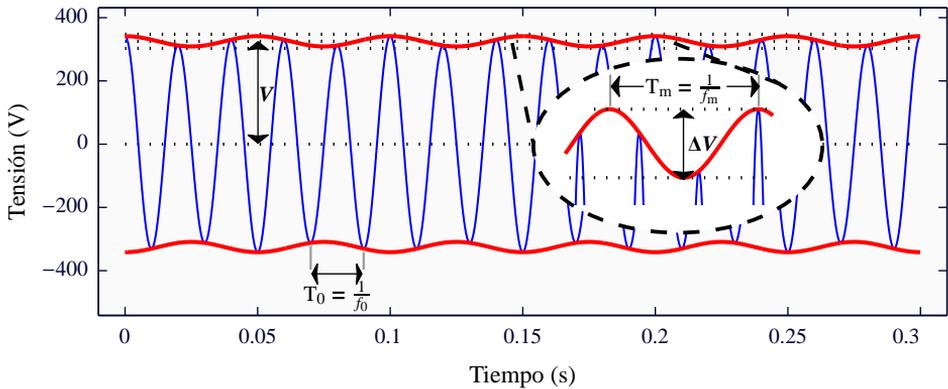


Figura 1.1. Ejemplo de una fluctuación sinusoidal de tensión de frecuencia $f_m = 20$ Hz.

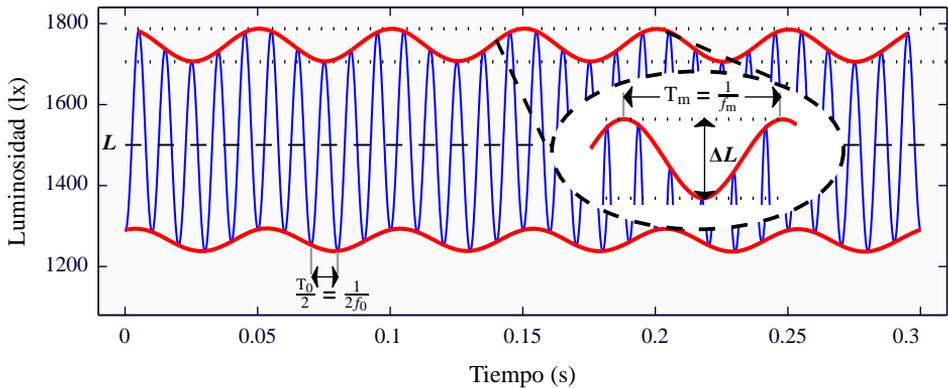


Figura 1.2. Ejemplo de la luminancia de una lámpara incandescente sujeta a una fluctuación sinusoidal en su tensión de alimentación de $f_m = 20$ Hz.

Ante la importancia de obtener una medida adecuada de la molestia provocada por las variaciones de luminancia, resulta necesario el conocimiento en profundidad de los procesos fisiológicos que experimenta el sistema visual humano. El método actual de medida de flicker, definido en el estándar IEC 61000-4-15⁵⁰, está basado en un modelo simplificado del comportamiento del conjunto lámpara-ojo-cerebro ante fluctuaciones en la tensión de alimentación de la lámpara. Este modelo se obtuvo a partir de los resultados obtenidos en distintos experimentos fisiológicos que analizaban, por un lado, el conjunto lámpara-ojo y, por otro, el conjunto ojo-cerebro. A continuación, se presenta un breve resumen del proceso de creación del modelo.

1.1.1 Fundamentos físicos y fisiológicos de la medida del flicker

A lo largo del siglo XX diferentes estudios han asumido el reto de analizar la respuesta del complejo sistema visual humano ante variaciones en la luminosidad^{31,43,66,85,86}. Los resultados obtenidos de estas experiencias han permitido modelar el conjunto lámpara-ojo-cerebro, utilizado posteriormente en la definición del flickermetro IEC.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que las variaciones de luminosidad dependen del comportamiento que la propia fuente de luz presente ante fluctuaciones en su tensión de alimentación. El análisis de la respuesta de distintas lámparas se llevó a cabo en varios estudios a partir de la obtención de su factor de ganancia^{1,74}. Se expresa el factor de ganancia como la relación entre la amplitud relativa de la fluctuación de la luminosidad, $\frac{\Delta L}{L}$, y la amplitud relativa de la fluctuación de tensión, $\frac{\Delta V}{V}$, para una determinada frecuencia de variación f_m :

$$G(f_m) = \frac{\Delta L/L}{\Delta V/V} . \quad (1.1)$$

En la [Figura 1.3](#) se representan las curvas de ganancia correspondientes a dos lámparas incandescentes y a una lámpara fluorescente sometidas a fluctuaciones sinusoidales de tensión⁸⁶. Se puede observar que la lámpara fluorescente muestra un comportamiento menos sensible a las fluctuaciones de tensión que la incandescente y, por esta razón, la incandescente fue la lámpara utilizada como referencia en los estudios fisiológicos posteriores.

De los experimentos realizados por [Ailleret](#)¹ también se estableció una fórmula empírica que relaciona la intensidad luminosa y el valor eficaz de la tensión de alimentación de una lámpara incandescente:

$$\frac{L}{L_n} = \left(\frac{V}{V_n} \right)^\gamma \quad 3.4 < \gamma < 3.8 , \quad (1.2)$$

donde V_n representa la tensión nominal y L_n su correspondiente intensidad luminosa.

A partir de esta expresión se calculó la respuesta de la lámpara ante pequeñas variaciones de tensión dando como resultado:

$$\frac{\Delta L}{L_n} = \gamma \cdot \frac{\Delta V}{V_n} . \quad (1.3)$$

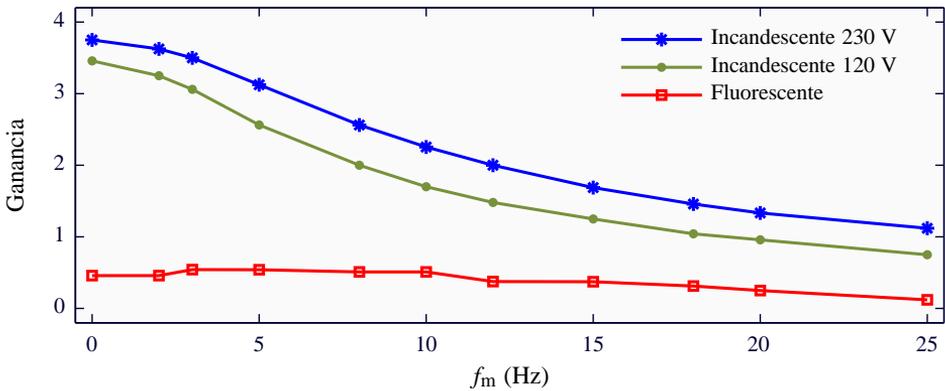


Figura 1.3. Factores de ganancia de dos lámparas incandescentes de 60 W (120 y 230 V) y una lámpara fluorescente⁸⁶.

Esta expresión permite deducir que, para pequeñas variaciones de tensión, existe una relación lineal entre las amplitudes relativas de la fluctuación de luminosidad y las amplitudes relativas de la fluctuación de tensión.

Una vez estudiado el comportamiento aislado de la lámpara, diferentes estudios analizaron el comportamiento del conjunto lámpara-ojo ante fluctuaciones de luminosidad^{1,22,74}. El objetivo fue caracterizar el umbral de percepción de flicker, es decir, determinar la magnitud de la fluctuación de tensión necesaria para provocar una variación de luminosidad perceptible para un conjunto de personas expuestas a ella. Dada la naturaleza subjetiva de la molestia estos estudios se realizaron sobre un número importante de sujetos. Uno de los estudios más extensos e influyentes en el modelo final para la medida de flicker fue el de [Ailleret](#)¹.

El estudio de [Ailleret](#)¹ se llevó a cabo sobre grupos representativos de individuos, los cuales experimentaron las variaciones de luminosidad producidas por una lámpara incandescente afectada por fluctuaciones sinusoidales en su tensión de alimentación. Las personas debían valorar las variaciones en la luminosidad mientras desarrollaban una actividad de lectura. En la [Figura 1.4](#) se muestra la curva resultante que caracterizaba la respuesta del sistema lámpara-ojo. Esta curva representa la amplitud de la fluctuación de tensión, ΔV , en el umbral de percepción para un rango de frecuencias entre 0 y 25 Hz, normalizada respecto

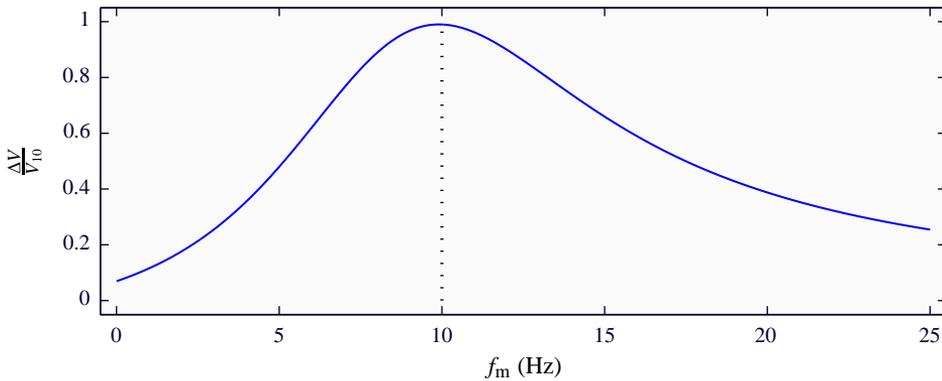


Figura 1.4. Caracterización de la respuesta del conjunto lámpara-ojo ante fluctuaciones sinusoidales¹.

al valor V_{10} correspondiente a la frecuencia de 10 Hz. Se observa que el sistema lámpara-ojo se comporta como un sistema paso-banda con un máximo de sensibilidad en 10 Hz. Es decir, una fluctuación de 5 Hz precisa de una amplitud de la fluctuación de tensión de aproximadamente 2 veces la de 10 Hz para percibir la fluctuación de luminosidad. Estudios posteriores, llevados a cabo durante el proceso de estandarización del flickermetro IEC, desplazaron el máximo de sensibilidad a la frecuencia de 8.8 Hz⁸⁶.

Otros estudios se orientaron hacia la caracterización de la respuesta del sistema ojo-cerebro. Durante la década de los 70, [Rashbass](#)⁶⁸, [Koenderink y Van Doorn](#)⁵⁹ llevaron a cabo una serie de experimentos con el objetivo de obtener un modelo matemático de los procesos neurofisiológicos involucrados en la percepción de las fluctuaciones de luminosidad. Los resultados obtenidos demostraron que el sistema ojo-cerebro sigue una respuesta cuadrática a las variaciones de luz, con un efecto de memoria entre 150 y 500 ms según el estudio que se analice.

El conocimiento adquirido a través de estos experimentos fisiológicos sirvió como base para el diseño de distintos medidores de flicker, entre ellos el flickermetro IEC, actualmente utilizado como referencia universal.

1.1.2 Descripción del flickermetro IEC

Ante la necesidad de disponer de un instrumento para medir y controlar los niveles de flicker presentes en la red, en la década de los 70 se diseñaron varios medidores nacionales en Francia, Alemania, Reino Unido y Japón. Estos medidores no proporcionaban medidas equiparables por lo que resultó necesario disponer de una herramienta de referencia que sirviera como medida universal del flicker. Fue el grupo de trabajo sobre perturbaciones de la Unión Internacional de Electrotecnia (UIE) quien asumió esta responsabilidad, preparando una especificación para la medida de flicker con el objetivo de que fuera mundialmente aceptada^{85,86}. A partir de este trabajo, la primera edición del flickermetro IEC fue aprobada en 1986 en la norma IEC 868⁵² y actualmente la última versión de la especificación, de 2010, la recoge el estándar IEC 61000-4-15⁵⁰ en su edición 2.0.

Las variaciones de luminosidad causadas por fluctuaciones de tensión dependen fundamentalmente de las características constructivas de la lámpara, de su potencia y de su tensión nominal. A la hora de especificar el modelo del flickermetro IEC fue, por tanto, necesario seleccionar una lámpara de referencia. Se seleccionó la lámpara incandescente como referencia ya que, entre las tecnologías de iluminación que coexistían en aquellos años en el mercado, incandescente y fluorescente, era la lámpara incandescente la que mostraba una mayor sensibilidad a las fluctuaciones de tensión (Figura 1.3).

La Figura 1.5 muestra el diagrama de bloques del modelo del flickermetro especificado en el estándar IEC 61000-4-15, el cual está compuesto por cinco bloques. A continuación se describe funcionalmente cada bloque.

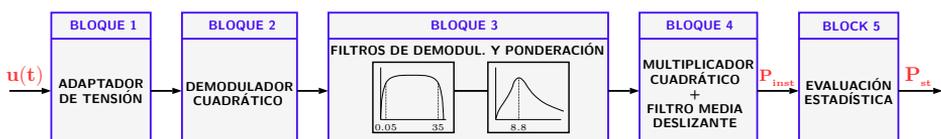


Figura 1.5. Diagrama de bloques del flickermetro IEC especificado en el estándar IEC 61000-4-15.⁵⁰

El bloque 1 consiste en un adaptador de la tensión de entrada. Debido a que la medida del flicker debe realizarse a partir de las fluctuaciones relativas de tensión expresadas en forma porcentual, este bloque permite normalizar la tensión de entrada a un valor interno, independizando así el resultado del nivel de tensión nominal en el punto de medida.

En los siguientes tres bloques se implementa la simulación de la respuesta del conjunto lámpara-ojo-cerebro, basada en los experimentos fisiológicos descritos en la sección anterior. El bloque 2 implementa el proceso de demodulación cuadrática que simula el comportamiento de la lámpara incandescente en la conversión de energía eléctrica en energía lumínica.

El bloque 3 está compuesto por tres filtros diferentes. Dos de ellos completan el proceso de demodulación con el objetivo de suprimir de la señal de salida del demodulador tanto la componente continua como las componentes frecuenciales por encima de 35 Hz. Para ello, el estándar especifica la conexión en cascada de un filtro paso alto de primer orden con frecuencia de corte de 0.05 Hz y de un paso bajo Butterworth de sexto orden con una frecuencia de corte de 35 Hz. El tercero se corresponde con un filtro de ponderación paso-banda con máximo en la frecuencia de 8.8 Hz que modela la respuesta del sistema lámpara-ojo.

En la [Figura 1.6](#) se presenta el módulo de la respuesta frecuencial del filtro de ponderación que especifica el estándar, cuya función de transferencia se corresponde con la siguiente expresión:

$$H(s)_{\text{lamp-ojo}} = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_4}\right)}, \quad (1.4)$$

donde:

$$k = 1.74802$$

$$\lambda = 2\pi \cdot 4.05981$$

$$\omega_1 = 2\pi \cdot 9.15494$$

$$\omega_2 = 2\pi \cdot 2.27979$$

$$\omega_3 = 2\pi \cdot 1.22535$$

$$\omega_4 = 2\pi \cdot 21.9$$

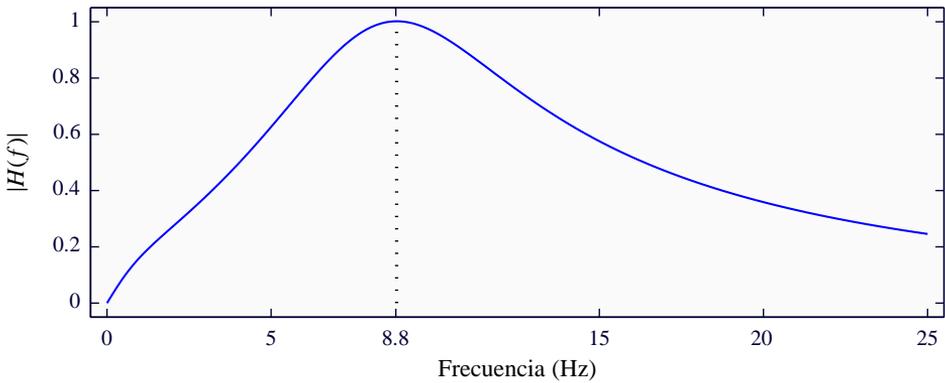


Figura 1.6. Característica frecuencial del filtro de ponderación del flickermetro IEC.

En el bloque 4 se modela el comportamiento del sistema ojo-cerebro. La respuesta no-lineal del sistema se representa mediante un multiplicador cuadrático, mientras que un filtro paso bajo de primer orden con constante de tiempo de 300 ms modela el efecto de memoria del cerebro. La salida de este bloque representa la percepción instantánea de flicker, P_{inst} . La referencia humana del umbral de percepción de flicker se corresponde con un valor de $P_{inst} = 1$. De esta forma, valores por encima de este límite indican que el parpadeo de la luz es perceptible.

El modelo del flickermetro se basa en los experimentos fisiológicos que, de manera precisa, reflejan la percepción real del flicker. Sin embargo, esta percepción no implica directamente molestia ni, por tanto, reclamaciones por parte de los usuarios de la red. Una vez modelado el conjunto lámpara-ojo-cerebro, el reto consistía en diseñar un procedimiento mediante el cual evaluar la molestia producida por las variaciones de luminosidad a partir de los valores de P_{inst} . En el bloque 5 se lleva a cabo un cálculo estadístico para integrar la percepción instantánea de flicker durante dos periodos de observación distintos: tiempos cortos de 10 minutos y tiempos largos de 2 horas, obteniendo la severidad flicker de tiempo corto, P_{st} , y de tiempo largo, P_{lt} , respectivamente. Por un lado, para obtener el P_{st} el estándar definió un algoritmo basado en la función de probabilidad acumulada de la percepción instantánea de flicker:

$$P_{st} = \sqrt{k_1 P_1 + k_2 P_2 + \dots + k_n P_n} \quad , \quad (1.5)$$

donde k_n son coeficientes de ponderación y P_n son los niveles correspondientes a los percentiles 1, 2...n de la salida del bloque 4. El ajuste de estos coeficientes se realizó de acuerdo al umbral de molestia o curva de $P_{st} = 1$ definida en el estándar IEC-555-3⁴⁸ y representada en la Figura 1.7. Esta curva se obtuvo experimentalmente al someter a un conjunto de 80 personas a las variaciones de luminosidad provocadas por fluctuaciones rectangulares de tensión¹⁹. Estas personas debían identificar el nivel de fluctuación de luminosidad para el cual el parpadeo de la luz les resultaba molesto. El experimento se realizó en grupos de dos personas, las cuales debían permanecer la mayor parte del tiempo leyendo periódicos colocados sobre una mesa con unas condiciones de luminosidad establecidas en 125 lx^d.

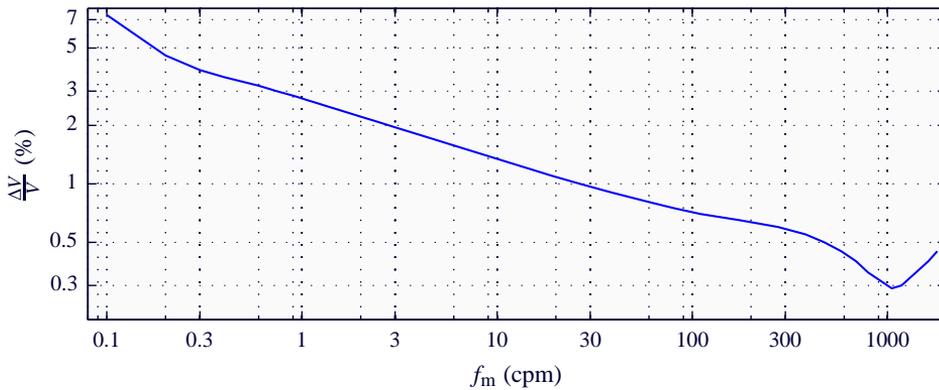


Figura 1.7. Curva del umbral de molestia o $P_{st} = 1$ ⁴⁸.

Finalmente, el valor de P_{lt} se obtiene a través del promedio geométrico cúbico de los 12 valores de P_{st} correspondientes al periodo de 2 horas:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{st,i}^3}{12}} . \quad (1.6)$$

^d El lux (lx) está definido por el Sistema Internacional de Unidades para medir el nivel de iluminación. Un lx equivale a un *lumen*/m². El lumen (lm) es la unidad definida para medir el flujo luminoso emitido por una fuente de luz.

1.2 HACIA UNA ILUMINACIÓN ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE

La eficiencia energética juega un papel muy importante en un mundo en el que la sostenibilidad se está convirtiendo en una prioridad. Las mejoras en el uso de la energía tienen un efecto directo sobre las emisiones de dióxido de carbono y sobre los costes energéticos. De hecho, uno de los puntos claves en la estrategia de mejora de la economía de la Unión Europea (UE)³⁶ consiste en la promoción de una Europa energéticamente eficiente que cumpla con los siguientes propósitos:

- Reducir la factura energética que pagan los hogares y empresas.
- Garantizar un suministro de energía fiable e ininterrumpido.
- Limitar el impacto medioambiental de la producción de energía, el transporte y su utilización.

A partir de estos objetivos, la UE define un marco común que recoge una serie de iniciativas a cumplir para el año 2020. Es lo que se conoce como paquete de medidas sobre clima y energía 20-20-20³³, en donde se establecen como prioritarios los siguientes tres retos: reducir las emisiones de dióxido de carbono en un 20%, aumentar la cuota de las fuentes de energía renovables en un 20% y aumentar la eficiencia energética en un 20%. En relación a este último objetivo, la UE establece específicamente que el mayor potencial en el ahorro de energía se encuentra en los propios edificios y promueve el uso de electrodomésticos, sistemas de calefacción-refrigeración, así como de sistemas de iluminación eficientes³⁷.

A continuación, se describen las características técnicas más relevantes de las tecnologías de iluminación actuales. Posteriormente, se realiza una descripción de la evolución de dichas tecnologías de iluminación desde el punto de vista de su eficiencia energética y la influencia de ésta sobre el mercado de la iluminación.

1.2.1 Descripción de las tecnologías de iluminación

La descripción se enfoca principalmente hacia los principios de funcionamiento así como a las características de eficiencia de las tecnologías de iluminación más relevantes en la actualidad.



Figura 1.8. Fotografías de las diferentes tecnologías de iluminación. (a) Incandescente; (b) Fluorescente lineal; (c) Fluorescente compacta; (d) De descarga de alta intensidad; (e) LED.

Lámparas de filamento.

Tanto las lámparas incandescentes como las halógenas se basan en esta tecnología. Una lámpara incandescente (Figura 1.8a) consiste en un filamento de wolframio que se encuentra encerrado dentro de una ampolla de vidrio rellena de gas. La radiación lumínica se produce cuando el filamento es calentado hasta la incandescencia por medio del paso de una corriente eléctrica²³. La ineficiencia de este tipo de lámpara radica en el hecho de que el 90 % de la energía de entrada se disipa en forma de calor y únicamente el 10 % es aprovechada para la emisión de luz. La eficiencia se puede incrementar a medida que la temperatura del filamento aumenta. Sin embargo, la vida útil de la lámpara es inversamente proporcional a la temperatura del filamento debido al proceso de evaporación del wolframio. Las lámparas halógenas incluyen gas halógeno dentro de la ampolla de vidrio con el objetivo de volver a depositar el wolframio evaporado en el filamento, incrementando así la vida útil y la eficiencia de la lámpara². La eficiencia luminosa^e de las lámparas incandescentes se encuentra dentro del rango 5–15 lm/W,

^e Relación entre el flujo luminoso (lúmenes) y la potencia (vatios).

mientras que las lámparas halógenas ofrecen eficiencias de entre 12–35 lm/W²⁰.

Lámparas de descarga.

Esta tecnología se basa en la fluorescencia^f. Entre los dos electrodos situados en cada extremo del tubo de vidrio se genera un arco eléctrico que excita los átomos de mercurio alojados en el interior del tubo, produciéndose luz ultravioleta. A continuación, los fotones de luz ultravioleta inciden en el fósforo que recubre el tubo produciendo finalmente la luz visible.

Las lámparas de descarga presentan una característica de resistencia negativa por lo que para que puedan funcionar correctamente requieren de un elemento adicional: el balasto. Éste es el encargado de proporcionar la tensión inicial necesaria para el encendido de la lámpara y limitar el paso de la corriente. Existen dos tipos de balastos: el electromagnético (BEM) y el electrónico (BE). El balasto electromagnético fue el primer tipo utilizado con las primeras lámparas fluorescentes. Estos balastos presentan una gran fiabilidad y robustez ante problemas mecánicos y una larga vida útil. Los balastos electrónicos son, en comparación, mucho más ligeros y presentan un incremento del 10 % en la eficiencia al trabajar a mayores frecuencias (20–50 kHz). El principal inconveniente se encuentra en que los balastos electrónicos son una fuente importante de perturbación en el sistema eléctrico^{2,20}.

Las lámparas de descarga se pueden clasificar en fluorescentes lineales (LFL^g) (Figura 1.8b) y en fluorescentes compactas (CFL^h) (Figura 1.8c). Las primeras LFL datan del año 1938⁵⁴. Estas lámparas pueden funcionar tanto con balastos electromagnéticos como electrónicos y han sido comúnmente utilizadas para aplicaciones comerciales e industriales. La eficiencia de las LFL puede variar entre 50 y 100 lm/W dependiendo de su longitud, potencia y temperatura de color²⁰. Las CFL se introdujeron a finales de la década de los 80⁷. El tamaño y peso de estas lámparas se reduce considerablemente en comparación a las LFL

^f Luminiscencia debida a la excitación de una sustancia que absorbe radiaciones.

^g LFL: Linear Fluorescent Lamp.

^h CFL: Compact Fluorescent Lamp.

gracias a que el tubo se puede construir con formas más compactas y a que habitualmente funcionan con balastos electrónicos integrados en la propia lámpara. Sus reducidas dimensiones permiten utilizar este tipo de lámparas en aplicaciones domésticas, pudiendo incluso instalarse en los mismos casquillos que utilizan las lámparas incandescentes. La eficiencia de las CFL es menor que las LFL, situándose en 40–65 lm/W²⁰.

Lámparas de descarga de alta intensidad (HID).

La luz visible se produce por medio de un arco eléctrico mantenido entre los dos electrodos contenidos en el tubo que se encuentra relleno de gas y de varios tipos de metales seleccionados para producir la radiación óptica. Las lámparas HIDⁱ (Figura 1.8d) se utilizan principalmente en lugares en los que se requieren altos niveles de luz que cubran grandes áreas y, por lo tanto, no se consideran para sustituir una lámpara de uso doméstico como es la lámpara incandescente. Su eficiencia varía entre 40 y 120 lm/W²⁰.

Iluminación de estado sólido (SSL).

El principio de funcionamiento de este tipo de lámparas es la electroluminiscencia. La luz se produce mediante la recombinación de huecos y electrones de un material cuando es atravesado por una corriente. La tecnología SSL^j es un término que abarca lámparas que emplean diodos semiconductores emisores de luz (LED^k), orgánicos (OLED) y poliméricos (PLED) como fuentes de iluminación. Actualmente la lámpara más prometedora y desarrollada es la LED (Figura 1.8e) presentando elevadas eficiencias que llegan hasta los 120 lm/W, pequeñas dimensiones y una larga vida útil²⁰.

ⁱ HID: High Intensity Discharge.

^j SSL: Solid State Lighting.

^k LED: Light-Emitting Diode.

1.2.2 Evolución de las tecnologías de iluminación

La iluminación representa un 20% del consumo energético mundial y un 14% en la UE³⁸. La eficiencia energética en la iluminación se puede mejorar no sólo mediante una buena planificación y control de su uso, sino también mediante la utilización de tecnologías de iluminación eficientes. La tecnología incandescente ha sido la más utilizada desde el siglo XIX, pero también la de menor rendimiento. La [Figura 1.9](#) presenta una cronología histórica de la eficiencia luminosa de las diferentes tecnologías de iluminación existentes. Se puede observar que, en las últimas décadas, la industria de la iluminación ha realizado considerables esfuerzos para conseguir tecnologías más eficientes. Además, la vida útil de estas nuevas lámparas es mucho mayor que la de las lámparas incandescentes, lo que reduce la huella ecológica durante las fases de producción y desecho de las lámparas. El ahorro energético y la reducción del número de lámparas necesarias no sólo tiene un efecto directo en la sostenibilidad, sino que también se traduce en la reducción del coste de compra y uso de las lámparas para el usuario final. La [Tabla 1.1](#) muestra una comparativa entre los costes económicos y eléctricos de la lámpara incandescente y de dos de las tecnologías eficientes más representativas hoy en día: las lámparas CFL y las LED. Como dato significativo, el uso de lámparas CFL o LED conlleva una reducción en el consumo eléctrico de en torno al 80%, mientras que el coste económico de 50 000 horas de uso se reduce alrededor del 75%.

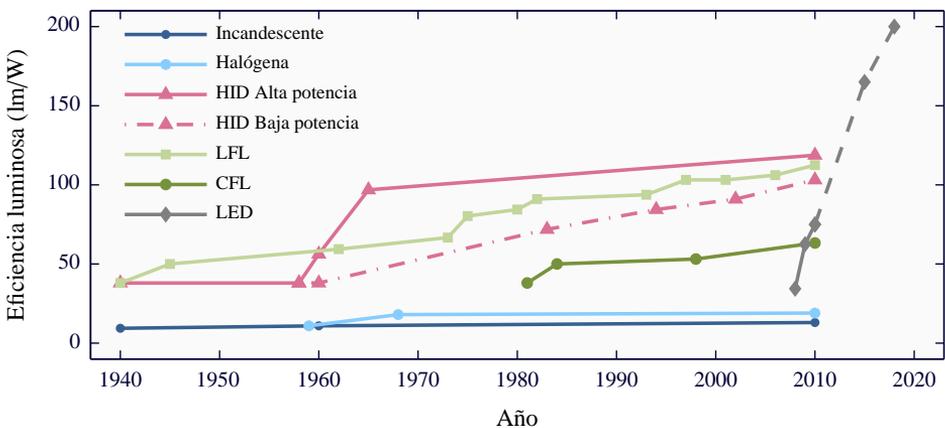


Figura 1.9. Evolución histórica de la eficiencia de las distintas tecnologías de iluminación²⁰.

		Incandescente	CFL	LED
Energía	Vatios por bombilla ^{a,d}	60	14	10
	kWh de electricidad ^{b,d}	3 000	700	500
	Coste eléctrico ^{c,d} (€)	420	98	70
Bombillas	Vida útil de la bombilla (horas) ^d	1 200	10 000	50 000
	Número de bombillas ^b	42	5	1
	Coste por bombilla ^d (€)	0.5	3.5	25
	Coste en bombillas ^b (€)	21	17.5	25
Total	Coste ^b (€)	441	115.5	95

^a Luminosidad equivalente a una lámpara incandescente de 60 W.

^b Para 50 000 horas de uso.

^c A 0.146€/kWh.

^d Cifras utilizadas con un fin comparativo.

Tabla 1.1. Comparativa de los costes eléctricos y económicos entre diferentes lámparas.

Teniendo en cuenta el ahorro energético y económico que supone el uso eficiente de la iluminación, muchos países están implantando distintas regulaciones para fomentar la adopción y el desarrollo de prácticas y tecnologías eficientes en el sector de la iluminación. Por un lado, los gobiernos están tratando de acelerar iniciativas que prohíban la comercialización de tecnologías energéticamente ineficientes. La [Figura 1.10](#) representa los plazos establecidos por diferentes países para la prohibición del uso y comercialización de la lámpara incandescente⁶². Como se puede observar, en la UE y en Japón la prohibición de la comercialización de estas lámparas estaba programada para el año 2012 mientras que otros países como China y Brasil extendieron este plazo hasta el año 2016. Por otro lado, además de las regulaciones orientadas a la prohibición de lámparas ineficientes, los gobiernos también están aunando esfuerzos para la aprobación de legislaciones más estrictas referentes a los requisitos que deben cumplir los nuevos productos en materia de eficiencia energética^{34,35}.

Ante el amplio abanico de posibilidades existente en tecnologías de iluminación eficientes, es necesario acudir a estudios de mercado para valorar qué lámpara podría convertirse en el referente en el sector de la iluminación en un futuro cercano. En este sentido, [McKinsey & Company Inc.](#)⁶² presenta un modelo de predicción del mercado de la iluminación para el año 2020 basado en una encuesta realizada tanto a

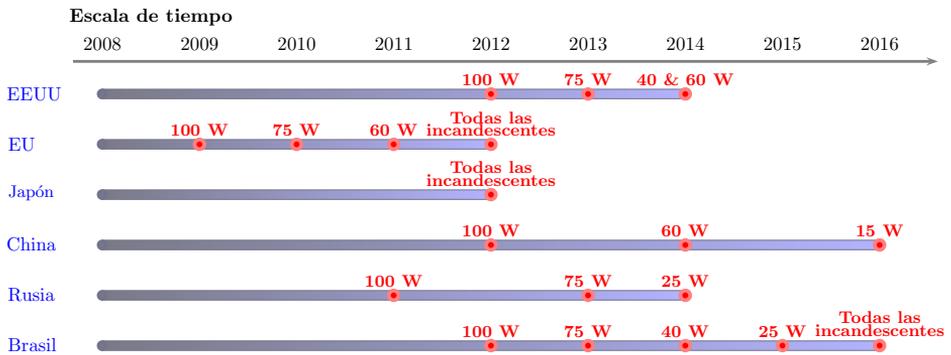


Figura 1.10. Cronología de la prohibición de las lámparas ineficientes en diferentes países⁶².

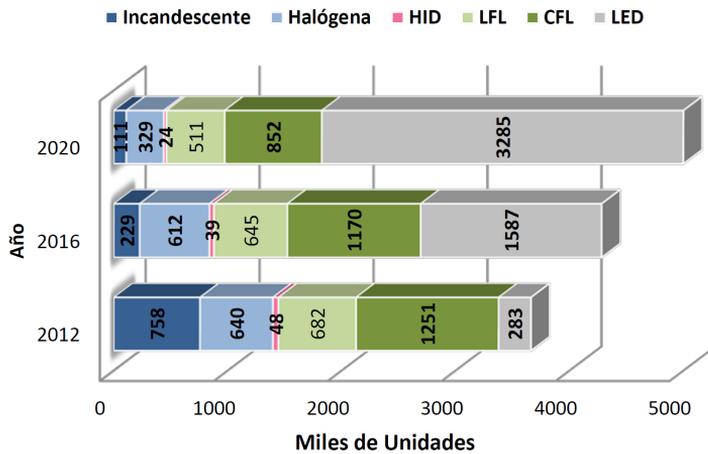


Figura 1.11. Predicción del número de nuevas instalaciones de bombillas por cada tecnología de iluminación⁶².

profesionales del sector como a consumidores. Este estudio apunta a que el mercado se encuentra en una clara transición desde las tecnologías tradicionales de iluminación hacia las lámparas LED. La Figura 1.11 muestra la predicción anual del número de bombillas de cada tecnología de iluminación utilizadas en nuevas instalaciones. Se aprecia claramente el cambio existente hacia la iluminación eficiente, colocándose las lámparas LED en una posición dominante. El rápido incremento en el uso de las lámparas LED es atribuible a la rápida disminución de su precio. En concreto, se espera que el precio de las lámparas LED descienda en un factor de 10 durante los próximos 10 años, mientras

que su eficiencia aumente 20 veces⁴⁴. Mientras esto ocurre, las lámparas CFL juegan un papel muy importante como tecnología de transición antes de la completa implantación de las lámparas LED.

1.3 INFLUENCIA DE LA ILUMINACIÓN EFICIENTE EN LA MEDIDA DEL FLICKER

Del análisis anterior se deduce que la perspectiva del panorama energético mundial ha cambiado, lo que ha provocado que dentro del sector de la iluminación se disponga de una gran variedad de lámparas eficientes que se posicionan como las sustitutas de la lámpara incandescente. Sin embargo, estos cambios no se han visto reflejados en lo que a la normativa de flicker se refiere. Tanto el procedimiento de medida, flickermetro IEC, como los niveles de compatibilidad referentes a las fluctuaciones de tensión, siguen referidos a la lámpara incandescente. En este contexto, parece inevitable cuestionarse cómo se comportan las nuevas tecnologías de iluminación ante las fluctuaciones de tensión.

El grupo de trabajo C4.108¹ del CIGRE^m inició la andadura de este estudio. La motivación del trabajo surgió de la necesidad de buscar una razón que justificara la baja correlación existente entre los altos niveles de flicker medidos en distintas localizaciones y la ausencia de quejas recibidas^{3,14}. El estudio alertó de que las lámparas eficientes analizadas eran menos sensibles a las fluctuaciones de tensión que la lámpara incandescente. Las conclusiones argumentaron que la baja correlación existente entre medidas de flicker y quejas podría ser debida a la utilización de este tipo de lámparas mientras la medida se realiza utilizando la lámpara incandescente como referencia¹⁵. Ante esta hipótesis, el grupo de trabajo C4.108 planteó dos líneas de acción: incrementar los niveles de compatibilidad establecidos para las fluctuaciones de tensión y modificar el propio flickermetro IEC, adaptándolo a una nueva referencia de iluminación.

¹ CIGRE WG C4.108: *Review of Flicker Objectives for LV, MV, and HV Systems*.

^m CIGRE: Conseil International des Grands Réseaux Électriques.

La validez de estas propuestas ha estado sujeta a debate en grupos de trabajo, organizaciones de estandarización y foros internacionales. En concreto, coincidiendo con el inicio del trabajo de tesis, se estableció la colaboración entre un nuevo grupo de trabajo, el C4.111ⁿ del CIGRE¹⁷ y el grupo de trabajo 77A-WG2^ñ del IEC, responsable de la estandarización del flickermetro. El trabajo conjunto de ambos grupos se orientó hacia el doble objetivo de determinar una nueva lámpara de referencia para el modelo de medida de flicker, y de valorar la viabilidad de incrementar los niveles de compatibilidad establecidos. Con respecto a este último aspecto, se hizo circular un cuestionario para recoger las opiniones acerca de la modificación de los actuales niveles de compatibilidad. Se recibieron 29 respuestas por parte de distintas empresas del sector eléctrico así como de fabricantes de lámparas y de otro tipo de equipamiento. La mayoría de respuestas apoyaban la idea de mantener los límites actuales debido principalmente a tres razones: por un lado, a pesar de la prohibición de su comercialización la lámpara incandescente seguirá siendo usada en diferentes regiones del mundo durante algunos años más; por otro, se podría comprometer el correcto funcionamiento de otro tipo de equipamiento conectado a la red, al resultar sometido a fluctuaciones de tensión más elevadas; por último, el amplio rango de sensibilidades que pueden presentar diferentes equipamientos hace prácticamente imposible establecer un único criterio en la definición de nuevos límites que satisfagan a todas las partes. De este modo, la especificación de un nuevo modelo de medida de flicker basado en una nueva lámpara de referencia quedó como la única alternativa de avance.

Por otra parte, estudios paralelos alertaban sobre la posibilidad de que determinadas tecnologías pudieran presentar sensibilidades mayores que la incandescente al flicker en determinadas situaciones como, por ejemplo, ante fluctuaciones de tensión provocadas por componentes interarmónicas de alta frecuencia. Este hecho toma vital relevancia al encontrarnos actualmente con una red eléctrica que presenta una mayor y creciente polución armónica debido principalmente al notable incremento de generación distribuida de origen renovable como la energía solar o eólica^{75,83,90} y al creciente número de cargas electrónicas

ⁿ CIGRE WG C4.111: *Review of LV and MV Compatibility Levels for Voltage Fluctuation.*

^ñ IEC 77A-WG2: *Voltage fluctuations and other low-frequency disturbances.*

conectadas a la red, como motores de inducción, convertidores estáticos de frecuencia o incluso lámparas eficientes como las CFL y LED^{6,42,73,82}.

Para responder a este escenario complejo, resultaba necesario un estudio extenso que abordara las siguientes cuestiones:

1. ¿Qué sensibilidad a las fluctuaciones de tensión presentan las nuevas tecnologías de iluminación ante diferentes tipos de perturbación? O dicho de otro modo, ¿se puede afirmar que la evolución de las tecnologías de iluminación en busca de una mayor eficiencia energética garantiza la inmunidad a las fluctuaciones de tensión con los actuales niveles de compatibilidad?
2. Si el objetivo es la adaptación del flickermetro IEC a una nueva referencia, ¿se puede confiar en que la rápida evolución de la tecnología lleve, a corto plazo, a un estado de madurez tal que permita elegir una nueva lámpara de referencia?
3. ¿Presentan las nuevas tecnologías de iluminación una respuesta lineal ante diferentes niveles de fluctuaciones de tensión? Es decir, ¿su grado de sensibilidad respecto de la incandescente es igual para cualquier amplitud de la fluctuación de tensión?
4. Los estudios de sensibilidad se han realizado tradicionalmente en entornos de laboratorio controlados. ¿Son representativos estos resultados de su comportamiento en escenarios reales?
5. En un entorno electromagnético en el que las perturbaciones conducidas son cada vez más complejas, ¿son los métodos de análisis de la sensibilidad usados hasta ahora los más adecuados?
6. ¿La garantía de una iluminación de calidad en términos de flicker pasa por adoptar soluciones en el lado del suministro eléctrico, del medidor de flicker o del fabricante de lámparas?

1.4 OBJETIVOS DE LA TESIS

Teniendo en cuenta las cuestiones planteadas en la sección anterior, han sido dos los principales propósitos del trabajo: por un lado, contrastar la hipótesis de que las nuevas tecnologías de iluminación son menos sensibles a las fluctuaciones de tensión que la lámpara incandescente; por otro lado, aportar una solución que garantice la ausencia de flicker para cualquier tipo de tecnología de iluminación. Para lograr estos propósitos, la tesis doctoral se ha planteado de acuerdo a los siguientes objetivos:

1. Analizar la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de un conjunto de lámparas, representativas de las distintas tecnologías de iluminación. En este estudio se han desarrollado las siguientes tareas:
 - Definir el método más adecuado de análisis teniendo en cuenta la complejidad de las fluctuaciones de luminosidad.
 - Estudiar la sensibilidad en función de las características de la fluctuación de tensión.
 - Estudiar la sensibilidad de las lámparas ante señales de tensión registradas en localizaciones reales.
 - Estudiar la linealidad en el comportamiento de las lámparas en función de la magnitud de la fluctuación.
2. Definir un procedimiento que garantice su inmunidad durante la etapa de fabricación de las lámparas ante fluctuaciones de tensión que se encuentren por debajo de los actuales niveles de compatibilidad. Para ello es necesario:
 - Definir la herramienta que permita llevar a cabo el análisis durante el proceso de fabricación.
 - Definir el protocolo de pruebas a las que deben de ser sometidas las lámparas durante su proceso de fabricación.

Cabe destacar que el trabajo presentado en esta tesis doctoral forma parte del informe final del grupo de trabajo C4.111 del CIGRE¹⁶, y es el núcleo fundamental del informe técnico IEC TR-61547-1⁵³ elaborado por el grupo MT1 TC34^o del IEC en el que se especifica un método para el control de la inmunidad de las lámparas asociado al estándar IEC 61547⁵¹.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El trabajo realizado en la presente tesis se va a presentar siguiendo la siguiente estructura:

- En este capítulo 1 se ha presentado la problemática existente en cuanto a la medida de flicker y la sustitución de las lámparas incandescentes por tecnologías más eficientes. Por un lado, se describe el procedimiento estandarizado de la medida del flicker. Por otro lado, se presenta la situación actual del mercado de la iluminación así como las diferentes tecnologías de iluminación existentes. Finalmente, se describe la influencia que las nuevas tecnologías de iluminación tienen en la medida del flicker. Además se desglosan los objetivos de la tesis y se detalla la organización del documento.
- En el capítulo 2 se contextualiza el trabajo mediante una revisión del estado de la materia en la que se fundamenta la tesis, realizando un recorrido histórico de los diferentes estudios relacionados con la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de las diferentes tecnologías de iluminación.
- En el capítulo 3 se describen los materiales y las herramientas que han sido necesarias para llevar a cabo el estudio. Por un lado, se presenta el conjunto de lámparas bajo estudio, así como sus principales características. Por otro lado, se presenta la implementación del sistema necesario para el análisis de la

o IEC MT1 TC34: *Revision of IEC 61547: Equipment for general lighting purposes - EMC immunity requirements.*

sensibilidad de las lámparas. Este sistema incluye la generación de la tensión de alimentación de la lámpara, la adquisición de su luminosidad y por último, las herramientas necesarias para el análisis de la sensibilidad.

- En el capítulo 4 se describen los diferentes estudios realizados con el objetivo de analizar el comportamiento de las lámparas ante fluctuaciones en su tensión de alimentación. Primeramente, se establece la herramienta de análisis adecuada para poder analizar la sensibilidad de las lámparas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada una de las pruebas a las que son sometidas las lámparas.
- En el capítulo 5 se presenta un procedimiento para limitar la sensibilidad de las nuevas tecnologías de iluminación a las fluctuaciones de tensión. Se describe el sistema de test para el análisis de inmunidad de las lámparas y se presenta la problemática existente en la implementación de la herramienta de análisis. Finalmente, se proponen una serie de pruebas necesarias dentro del protocolo de test y se presentan los resultados obtenidos al aplicar el protocolo de inmunidad a un conjunto de lámparas.
- En el capítulo 6 se presentan las principales conclusiones extraídas del trabajo, así como la difusión de los resultados obtenidos. Finalmente se plantean las futuras líneas de investigación derivadas de la realización de este trabajo.
- En la parte final del documento se recopilan las citas bibliográficas referenciadas a lo largo del documento, así como un apéndice en el que se incluye información adicional sobre la verificación de las herramientas de análisis utilizadas en el estudio.

2 | ESTADO DEL ARTE

*If you don't have time to read, you don't have the
time or the tools to write.*

— Stephen King

En este capítulo se presenta un análisis bibliográfico de los distintos estudios y experiencias relacionados con el análisis de la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de lámparas distintas a la incandescente. Se pretende contextualizar el trabajo de la tesis, identificando las necesidades específicas surgidas de los trabajos citados.

La presentación de los distintos estudios se ha estructurado en base a una serie de criterios que condicionan cada uno de los análisis realizados. Por un lado, se tienen en cuenta las distintas tecnologías de iluminación incluidas en los trabajos. Además, se considera el tipo de perturbación que provoca las fluctuaciones en la tensión de alimentación de las lámparas. También se ha tenido en cuenta la metodología de análisis aplicada, que depende de la herramienta utilizada para el estudio, así como del entorno en el que se llevan a cabo las pruebas. Por último, se ha considerado el objetivo que persigue cada estudio: análisis comparativo de sensibilidad de varias lámparas; influencia de los equipos de regulación y control de la luminosidad; estudio de la sensibilidad a distintos niveles de fluctuación de tensión.

La estructura del capítulo es la siguiente. En primer lugar, se introducen los primeros estudios e impresiones generales acerca de la sensibilidad que mostraban las primeras lámparas eficientes. A continuación, se describe de manera más detallada el principal estudio dedicado a caracterizar la sensibilidad de un conjunto más amplio de tecnologías de iluminación, cuyas conclusiones sirvieron como base de las posibles

acciones futuras a tomar dentro del marco de regulación del flicker. Además, se presentan otros estudios más recientes que han abordado experimentos más extensos en la búsqueda de una nueva referencia para la medida del flicker. Finalmente, ante los objetivos planteados en el capítulo anterior y el contexto enmarcado a través del estado del arte, se exponen los principales retos a los que se enfrenta el trabajo de tesis.

2.1 PRIMEROS ESTUDIOS DE SENSIBILIDAD DE LÁMPARAS EFICIENTES

2.1.1 La modulación AM como fuente de generación de flicker

En la época en la que la lámpara incandescente era la fuente de luz dominante, las fluctuaciones de tensión eran principalmente debidas a la conexión de cargas fluctuantes en la red eléctrica. Cargas con ciclos de trabajo regulares, como las bombas de calor o las máquinas de soldadura, o cargas con ciclos de trabajo más largos e irregulares, como los hornos de arco, eran considerados los principales generadores de flicker. Representando esta situación, las modulaciones AM eran el principal patrón de fluctuación de tensión utilizado en los estudios de sensibilidad de las lámparas^{60,63,85}.

Con la llegada de nuevas tecnologías en el sector de la iluminación, a finales de los años 90 se comenzaron a incluir las primeras CFL en estudios que trataban de comparar la sensibilidad de estas lámparas con las lámparas incandescente y LFL. Chang et al.¹¹ estudió la sensibilidad de 6 lámparas incandescentes, 4 lámparas LFL con balasto electromagnético y 10 CFL con balasto electrónico. Únicamente analizó la respuesta de estas lámparas ante una fluctuación AM sinusoidal de frecuencia $f_m = 10$ Hz, calculando la amplitud de la fluctuación de luminosidad en cada lámpara a partir del análisis espectral de la luz. En la [Tabla 2.1](#) se muestran los valores de amplitud relativa de la fluctuación de luminosidad obtenidos para algunas de estas lámparas para la fluctuación sinusoidal de tensión de $f_m = 10$ Hz y $\frac{\Delta V}{V} = 2\%$. Los resultados señalan claramente a las CFL como menos sensibles que la

incandescente, sugiriendo su utilización en aquellos entornos donde las fluctuaciones de tensión pueden llegar a ser un problema.

	Inc.	LFL1	LFL2	CFL1	CFL2	CFL3	CFL4
$\frac{\Delta L}{L}$ (%)	1.4	1.4	1.0	0.9	0.6	0.5	0.4

Tabla 2.1. Valores de amplitud relativa de luminosidad obtenidos por Chang et al.¹¹ para una fluctuación sinusoidal de tensión de $f_m = 10$ Hz y $\frac{\Delta V}{V} = 2\%$.

En esta misma época, el EPRI^a realizó diversos ensayos en los que se estudiaba la respuesta de un gran conjunto de lámparas. En concreto, para 23 modelos diferentes de CFL se obtuvo el factor de ganancia de las lámparas sujetas a una fluctuación AM sinusoidal de tensión de 8 Hz (Figura 2.1)⁸⁶. En general, las lámparas presentaban una menor sensibilidad que la lámpara incandescente. En aquellos casos minoritarios en los que la sensibilidad de las CFL era mayor, se recomendaba a los fabricantes de lámparas una mayor atención a la hora de diseñar sus productos.

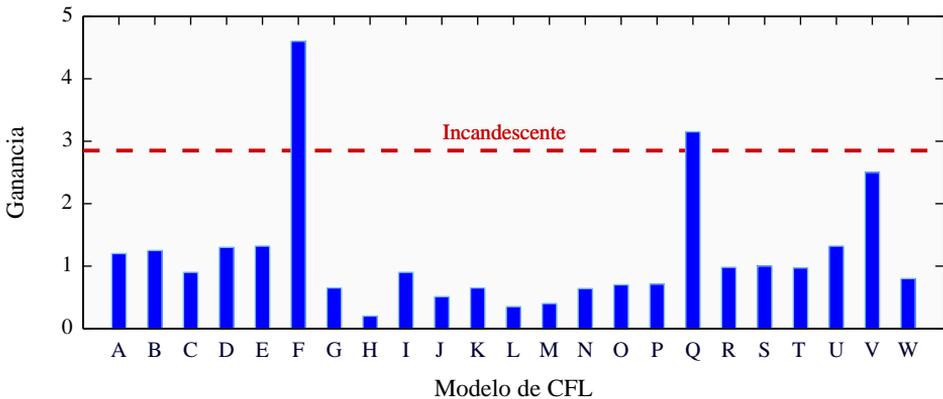


Figura 2.1. Factor de ganancia de 23 CFL sujetas a una modulación sinusoidal de la tensión de 8 Hz⁸⁶.

A pesar de que la opinión general era que la lámpara incandescente seguía siendo la tecnología de iluminación más sensible, algunos estudios comenzaban ya a indicar que para el caso de frecuencias

^a EPRI: Electric Power Research Institute.

interarmónicas mayores que 100 Hz, las lámparas fluorescentes podían resultar más sensibles a las fluctuaciones de tensión^{64,86}, llegando a provocar quejas por parte de los usuarios de la red eléctrica^{80,88}.

2.1.2 Los interarmónicos como fuente de generación de flicker

Hasta finales del siglo XX, las fluctuaciones en el valor eficaz de la tensión provocadas por una modulación AM eran consideradas como fuente principal de las variaciones de la luminosidad. Sin embargo, la presencia de interarmónicos en la señal de tensión provoca que tanto su valor eficaz como su valor de pico fluctúen^{25,81,91}. La [Figura 2.2](#) muestra la amplitud relativa de la fluctuación del valor eficaz y de pico, $\frac{\Delta V_{ef}}{V_{ef}}$ y $\frac{\Delta V_{pico}}{V_{pico}}$, de una señal de tensión compuesta por una componente fundamental de 50 Hz y un interarmónico de 1% de amplitud, donde su frecuencia, f_{ih} , se hace variar desde 1 hasta 400 Hz, exceptuando los valores correspondientes a las componentes armónicas de 50 Hz. Las fluctuaciones del valor eficaz tienden a desaparecer a medida que la frecuencia del interarmónico aumenta, a diferencia de las fluctuaciones en el valor de pico, cuya amplitud se mantiene aproximadamente constante e igual a la magnitud del interarmónico durante todo el rango de frecuencias^{25,81}.

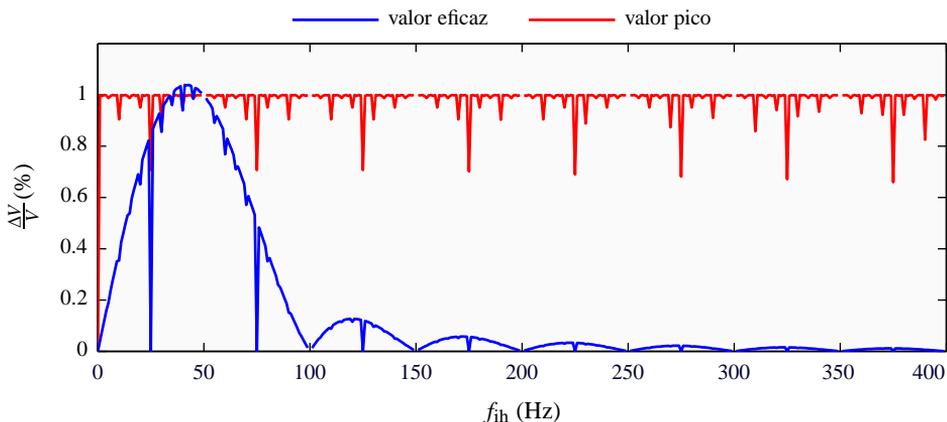


Figura 2.2. Variación porcentual del valor eficaz y de pico de una señal de tensión afectada por un interarmónico de frecuencia f_{ih} y amplitud del 1%. Método extraído de las referencias de [Tayjasanant et al.](#)⁸¹ y [Drapela et al.](#)²⁵.

Una consecuencia relevante de este efecto se produce en la reacción de las distintas tecnologías de iluminación frente al origen de las fluctuaciones de tensión. Para las lámparas incandescentes, la fluctuación de su luminosidad depende de las variaciones existentes en el valor eficaz de la tensión y, por tanto, la presencia de interarmónicos mayores de 100 Hz no produce ningún efecto en ellas^{57,65}. Sin embargo, la mayoría de lámparas fluorescentes responden a variaciones en el valor de pico de la tensión lo que las hace especialmente vulnerables a la presencia de interarmónicos mayores de 100 Hz^{21,25,30,64}.

Con una red eléctrica cada vez más afectada por perturbaciones armónicas y con las lámparas CFL en auge, en la primera década del siglo XXI se incrementó notablemente el número de estudios que trataban de analizar la respuesta de las lámparas ante fluctuaciones de tensión provocadas por la presencia de interarmónicos. Uno de estos primeros estudios fue el elaborado por [De Koster et al.](#)²¹ en donde se presentaban los factores de ganancia obtenidos para algunas LFL y CFL sujetas a distintas componentes interarmónicas presentes en su tensión de alimentación. Los resultados mostraban un comportamiento de las CFL muy sensible a todas las frecuencias interarmónicas. [Drapela et al.](#)²⁵ presentó un estudio más extenso abarcando una gran variedad de lámparas fluorescentes. Calculó las curvas de ganancia de, al menos, 50 combinaciones diferentes de lámparas fluorescentes y de tipos de balastos, con frecuencias interarmónicas desde 1 hasta 2000 Hz. Los resultados mostraban que la sensibilidad se encontraba muy influenciada por el tipo del balasto y por las características constructivas y de potencia de la lámpara fluorescente. Por un lado, los balastos electromagnéticos atenuaban significativamente el factor de ganancia de las LFL para frecuencias interarmónicas entre 100 y 800 Hz. Por otro lado, las LFL funcionando con balastos electrónicos presentaban factores de ganancia y, por tanto sensibilidad a las fluctuaciones de tensión mayores para una banda frecuencial más alta, hasta los 2000 Hz. El factor de ganancia que presentaban algunas CFL con balasto electrónico era mayor que las lámparas LFL con balasto electromagnético para un rango de frecuencias interarmónicas mayor.

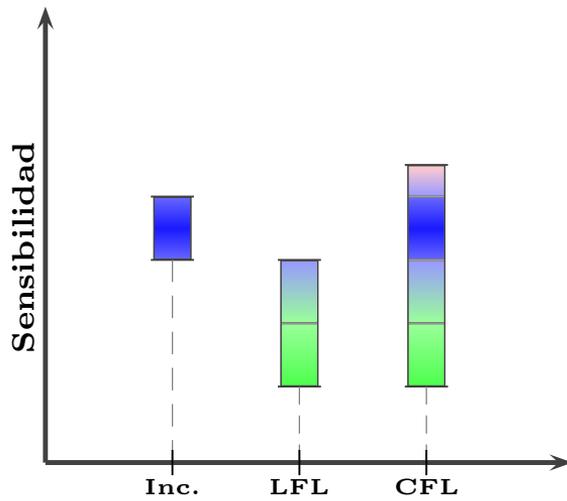
Teniendo en cuenta la inmunidad de las lámparas incandescentes a frecuencias interarmónicas mayores de 100 Hz, no existen niveles de compatibilidad definidos para esta banda de frecuencias y, por tanto,

no existen umbrales que delimiten la molestia de las fluctuaciones de luminosidad producidas por este tipo de perturbaciones. En consecuencia, existen algunos estudios que han tratado de establecer umbrales de molestia para distintas lámparas fluorescentes analizadas, indicando la magnitud mínima del interarmónico necesario en cada frecuencia que supera el umbral de molestia $P_{st} = 1$ ^{29,39}.

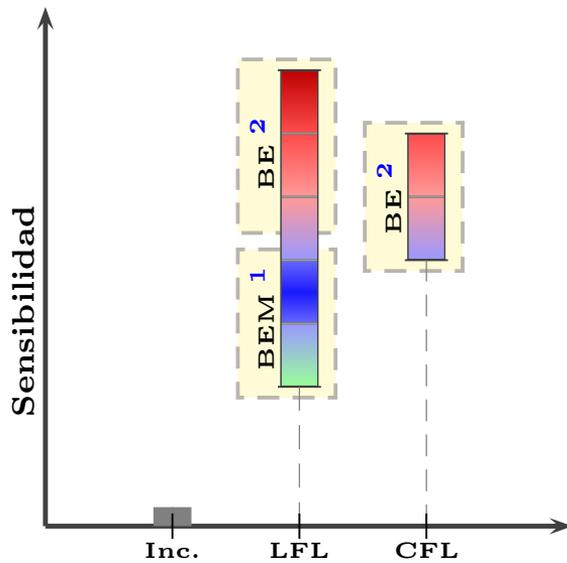
2.1.3 Conclusiones de los primeros estudios de sensibilidad

La [Figura 2.3](#) resume los resultados obtenidos en los primeros estudios sobre la sensibilidad de las lámparas. La ilustración se realiza de manera cualitativa comparando los valores de sensibilidad de las lámparas normalizados respecto de los valores obtenidos para la lámpara incandescente.

Para el caso de fluctuaciones de tensión debidas a modulaciones AM ([Figura 2.3a](#)), las lámparas fluorescentes respondían de manera menos sensible que la incandescente, a excepción de algunas de las primeras muestras de lámparas CFL en las cuales se sugería una mayor atención por parte de los fabricantes en su proceso de producción. Para el caso de los interarmónicos ([Figura 2.3b](#)), los valores de sensibilidad no pueden ser comparados con los de la incandescente al ser ésta inmune a este tipo de perturbaciones. La sensibilidad de las lámparas fluorescentes a estas frecuencias depende tanto del balasto utilizado como de las características constructivas de la lámpara. Las LFL y las CFL con balastos electrónicos presentan mayor sensibilidad para un rango mayor de frecuencias interarmónicas que las LFL que utilizan balastos electromagnéticos.



(a) Modulaciones AM



- ¹ Balasto Electromagnético
- ² Balasto Electrónico

(b) Interarmónicos

Figura 2.3. Resumen cualitativo de las conclusiones de los primeros estudios sobre la sensibilidad de las lámparas a las fluctuaciones de tensión.

2.2 ESTUDIO DE REFERENCIA SOBRE LA SENSIBILIDAD DE LAS LÁMPARAS

A comienzos del siglo XXI, y ante las primeras normativas orientadas hacia la sustitución de la lámpara incandescente por lámparas más eficientes, el análisis de la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de estas lámparas cobró vital importancia. El grupo de trabajo C4.108 del CIGRE trató este punto como uno de sus principales objetivos⁴⁶. La contribución principal a este grupo en relación a la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de las distintas tecnologías de iluminación fue realizada por Cai^{8,9,10,18} en su tesis titulada: "*Flicker Interaction Studies and Flickermeter Improvement*". En este trabajo se realiza por primera vez un estudio comparativo de un conjunto diverso y extenso de las tecnologías de iluminación existentes en el mercado. Los principales objetivos del mencionado trabajo fueron:

- El estudio de sensibilidad de diferentes lámparas representativas de las distintas tecnologías de iluminación. El trabajo presenta la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión producidas por modulaciones AM, analizando también la linealidad en su comportamiento a distintos niveles de magnitud de la fluctuación de tensión. Además incluye el estudio de la influencia de la utilización de distintos sistemas de regulación de la luminosidad sobre el flicker producido por una lámpara incandescente. Todo este análisis se realiza exclusivamente en términos del factor de ganancia.
- El análisis de las deficiencias que presenta el flickermetro IEC en relación a las nuevas tecnologías de iluminación. La medida del flicker sigue basada en la respuesta de la lámpara incandescente a pesar del uso masivo de otras tecnologías de iluminación. Por tanto, el flickermetro IEC no evalúa correctamente la verdadera percepción de la molestia. Ese mismo hecho provoca que no se evalúe correctamente la influencia del contenido interarmónico en la generación de fluctuaciones en la tensión, al ser la lámpara incandescente inmune a este tipo de perturbaciones.

- Una propuesta de mejora del flickermetro IEC. Para ello, incluye el modelado de la respuesta a las fluctuaciones de tensión de cada una de las lámparas en el filtro de ponderación del bloque 3 del flickermetro IEC.

A continuación, se presentan sus principales resultados y conclusiones, que quedaron reflejados en el informe final del grupo C4.108 del CIGRE¹⁵.

2.2.1 Sensibilidad a modulaciones AM de tensión

La autora compara la sensibilidad de un conjunto de lámparas sujetas a modulaciones AM, tanto sinusoidales como rectangulares, en su tensión de alimentación. Para ello, implementa un sistema mediante el que se generan las fluctuaciones en la tensión de alimentación de las lámparas con unos valores controlados de amplitud y frecuencia de la fluctuación, y se registra la variación de luminosidad de cada una de las lámparas. El análisis de sensibilidad se realiza calculando la amplitud relativa de la fluctuación de luminosidad, $\frac{\Delta L}{L}$, para cada frecuencia de la fluctuación de tensión generada, relacionando los valores de las lámparas con respecto a los valores obtenidos con la lámpara incandescente. El conjunto de lámparas bajo estudio incluye distintas tecnologías de iluminación al analizar 2 lámparas halógenas, 2 CFL, una LFL y una LED.

A continuación, se resumen los principales resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas.

Experimento 1

El estándar IEC 61000-4-15 establece los valores de $\frac{\Delta V}{V}$ tanto de fluctuaciones AM sinusoidales como rectangulares correspondientes al umbral de perceptibilidad, es decir, los valores para los que el flickermetro IEC proporciona un valor máximo de percepción instantánea $P_{\text{inst,max}} = 1$ (ver [Tabla A.2](#) y [Tabla A.3](#) del [Apéndice A](#)). En este experimento se generaron las fluctuaciones de tensión

correspondientes a estos valores y se calcularon los $\frac{\Delta L}{L}$ correspondientes a cada lámpara normalizados con los valores obtenidos para una lámpara incandescente. De esta forma, valores normalizados de sensibilidad mayores que la unidad indicarían un comportamiento más sensible que el de la lámpara incandescente.

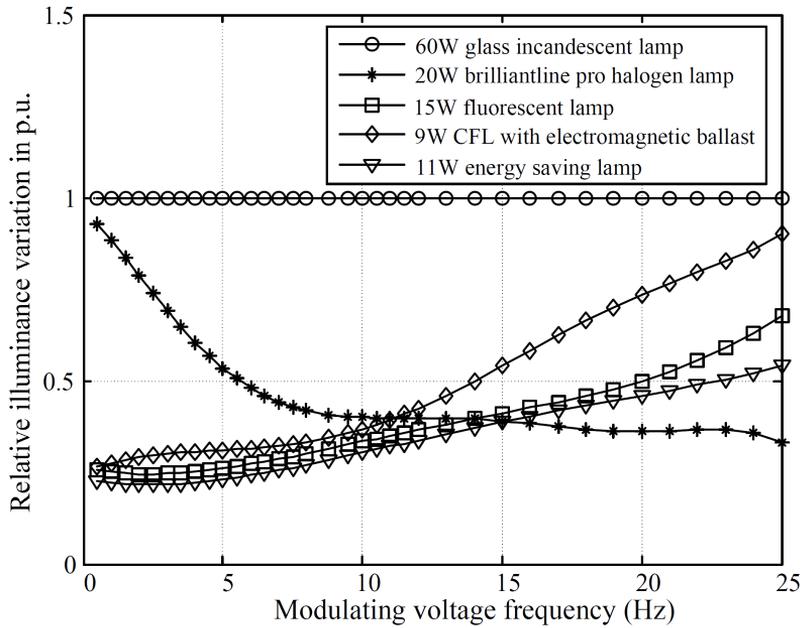
La [Figura 2.4](#) muestra los resultados obtenidos para cada una de las lámparas analizadas. Para el caso de las fluctuaciones sinusoidales de tensión se analizó la sensibilidad de una lámpara incandescente, una halógena, una LFL, una CFL con balasto electromagnético y otra CFL con balasto electrónico. Para las fluctuaciones rectangulares las lámparas utilizadas fueron una incandescente, una halógena, una LFL, una CFL con balasto electrónico y una LED, tecnología que comenzaba a dar sus primeros pasos dentro del sector de la iluminación en el momento del desarrollo del trabajo. Como se puede observar, los resultados mostraban que todas las lámparas se comportaban claramente de manera menos sensible que la lámpara incandescente dentro del rango de frecuencias analizado, tanto para el caso de fluctuaciones AM sinusoidales como rectangulares.

Experimento 2

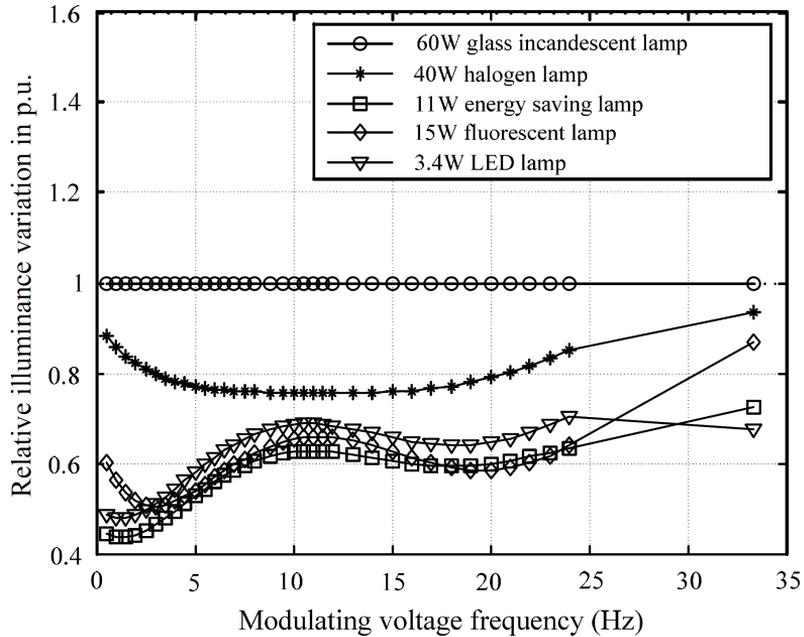
En esta prueba se comprobó el comportamiento lineal de las lámparas ante fluctuaciones AM sinusoidales de tensión. Para ello, la autora utilizó tres niveles de amplitud de la fluctuación de tensión en cada una de las frecuencias analizadas. Tomando uno de los valores de la fluctuación de tensión como referencia, $(\frac{\Delta V}{V})_0$, que generaría una fluctuación en la luminosidad $(\frac{\Delta L}{L})_0$, los distintos niveles se relacionan proporcionalmente de la siguiente manera:

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_i = k_i \cdot \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_0 . \quad (2.1)$$

Una respuesta lineal por parte de la lámpara implica que la relación proporcional existente entre los valores de amplitud de las fluctuaciones de tensión se mantenga entre las amplitudes de las fluctuaciones de luminosidad registradas. La [Figura 2.5](#) muestra los valores de $\frac{\Delta L}{L}$ de la lámpara LED analizada, obtenidos para cada una de las amplitudes



(a) Fluctuaciones de tensión sinusoidales



(b) Fluctuaciones de tensión rectangulares

Figura 2.4. Resultados de sensibilidad de las lámparas a las fluctuaciones AM de tensión. Figura extraída del trabajo de Cai⁸.

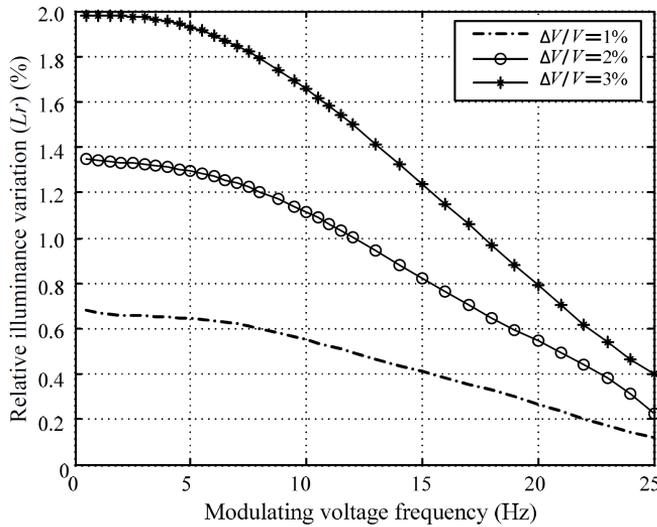


Figura 2.5. Amplitud relativa de la fluctuación de la luminosidad de una lámpara LED de 3.4 W para los distintos niveles de fluctuación de tensión generados⁸. Figura extraída del trabajo de Cai⁸.

de las fluctuaciones de tensión generadas. Se puede observar que la lámpara muestra un comportamiento lineal en todo el rango de frecuencias analizado. Tomando como ejemplo la frecuencia $f_m = 15$ Hz, se obtiene un valor de $\frac{\Delta L}{L} = 0.4\%$ para una amplitud de la fluctuación de tensión de $\frac{\Delta V}{V} = 1\%$, obteniendo un valor doble y triple, $\frac{\Delta L}{L} = 0.8\%$ y $\frac{\Delta L}{L} = 1.2\%$, para el doble y triple de la amplitud de la fluctuación de tensión generadas respectivamente, $\frac{\Delta V}{V} = 2\%$ y $\frac{\Delta V}{V} = 3\%$.

Con el objetivo de mostrar los resultados de linealidad de todas las lámparas analizadas en este estudio, la [Tabla 2.2](#) resume parte de los valores de amplitud de la fluctuación de luminosidad, $(\frac{\Delta L}{L})_i$, obtenidos para dos de las frecuencias generadas, 5 y 15 Hz. Además, se muestra la desviación porcentual que presentan los valores $(\frac{\Delta L}{L})_i$ con respecto a la relación ideal de linealidad, tomando como referencia el valor $(\frac{\Delta L}{L})_0$, esto es:

$$Desv_i = \left| \frac{(\frac{\Delta L}{L})_i - k_i \cdot (\frac{\Delta L}{L})_0}{k_i \cdot (\frac{\Delta L}{L})_0} \right| \cdot 100 . \quad (2.2)$$

En todos los casos estudiados la desviación es inferior a un 7%. En base a estos resultados Cai⁸ afirma que, de forma generalizada, la variación

f_m (Hz)	Tecnología	Potencia (W)	$(\frac{\Delta L}{L})_{ref}$ (%)	$k_1 = 2$		$k_2 = 3$	
				$(\frac{\Delta L}{L})_1$ (%)	$Desv_1$ (%)	$(\frac{\Delta L}{L})_2$ (%)	$Desv_2$ (%)
5	Incandescente	60	1.30	2.60	0.00	5.10	1.92
	Halógena	20	0.75	1.50	0.00	3.00	0.00
	LFL	15	0.37	0.70	5.40	1.38	6.76
	CFL (BE) ^a	11	0.32	0.61	4.69	1.22	4.69
	LED ^b	3.5	0.65	1.30	0.00	1.92	1.54
15	Incandescente	60	0.75	1.50	0.00	3.00	0.00
	Halógena	20	0.30	0.60	0.00	1.20	0.00
	LFL	15	0.30	0.60	0.00	1.20	0.00
	CFL (BE) ^a	11	0.30	0.59	1.67	1.15	4.17
	LED ^b	3.5	0.40	0.82	2.50	1.24	3.33

^a Balasto Electrónico

^b Para el caso de la lámpara LED $k_2 = 3$.

Tabla 2.2. Resultados de linealidad obtenidos para dos de las frecuencias analizadas, $f_m = 5$ Hz y $f_m = 15$ Hz. Valores extraídos del estudio de Cai⁸.

relativa de la luminosidad es linealmente proporcional a la amplitud de la fluctuación de tensión.

Experimento 3

Con el objetivo de analizar la influencia que los reguladores de luz tienen en el flicker, la autora presenta los resultados obtenidos al aplicar distintos niveles de iluminación a través de tres reguladores de luz diferentes en una lámpara incandescente de 60 W.

Las pruebas se realizaron analizando la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión sin el regulador conectado, así como con cada uno de los reguladores configurados en tres posiciones distintas:

- Posición 1: Máxima tensión de salida del regulador (alta iluminación).
- Posición 2: Mitad de la tensión de salida del regulador (iluminación media).

- Posición 3: Mínima tensión de salida del regulador (baja iluminación).

La [Figura 2.6](#) muestra los valores de amplitud relativa de la fluctuación de luminosidad registrados para la lámpara incandescente con uno de los reguladores de luz en cada una de las diferentes situaciones de regulación descritas. Como se puede observar, la sensibilidad de la lámpara varía en función de la posición del regulador, siendo ésta más sensible para el caso en el que el regulador limita la luminosidad a su menor nivel (posición 3).

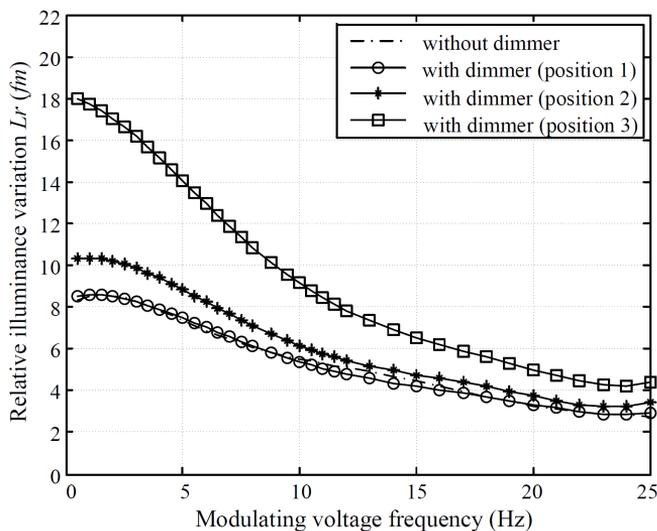


Figura 2.6. Amplitud relativa de la fluctuación de la luminosidad de una lámpara incandescente utilizando uno de los reguladores de luz analizados (A). Figura extraída del trabajo de [Cai](#)⁸.

Con el objetivo de resumir los resultados obtenidos con cada uno de los reguladores, la [Tabla 2.3](#) muestra los valores de amplitud relativa de la fluctuación de luminosidad, $\frac{\Delta L}{L}$ (%), de la lámpara incandescente obtenidos para tres de las frecuencias analizadas, 5, 15 y 25 Hz. Para el caso de dos de los reguladores utilizados (A y B), la variación de luminosidad es siempre mayor con el regulador de luz conectado, excepto cuando el regulador se ajusta en la posición 1. Además, la fluctuación de luminosidad se incrementa cuanto menor es el nivel de luminosidad aplicado, es decir, la conexión de estos reguladores

Regulador	Posición	f_m (Hz)		
		5	15	25
A	Sin regulador	7.5	4.5	3.5
	1	7.5	4.2	3.5
	2	9.0	4.9	3.8
	3	14.0	6.5	5.0
B	Sin regulador	7.5	4.4	3.4
	1	7.9	4.2	3.5
	2	10.0	5.0	4.0
	3	15.0	6.7	5.0
C	Sin regulador	7.5	4.5	3.1
	1	7.5	4.2	3.1
	2	7.5	4.2	3.1
	3	8.0	4.0	3.1

Tabla 2.3. Valores de amplitud relativa de la fluctuación de luminosidad obtenidos para una lámpara incandescente ante diferentes condiciones de regulación de luz utilizando tres reguladores de luz distintos. Valores extraídos del estudio de Cai⁸.

incrementa el nivel de flicker. Sin embargo, mediante el uso del regulador C las variaciones de luminosidad no muestran grandes diferencias, independientemente de la condición de regulación aplicada.

2.2.2 Propuesta de modificación del flickermetro IEC

Cai⁸ completa su trabajo con una propuesta de mejora del flickermetro IEC con el objetivo de convertirlo en una herramienta capaz de evaluar la molestia producida por el parpadeo de la luz de cualquiera de estas lámparas. Para ello, realiza las siguientes tareas:

1. En el análisis de sensibilidad la autora concluye que las lámparas analizadas presentan un comportamiento lineal en el rango de frecuencias analizado (0.5 Hz a 25 Hz). Partiendo de esta conclusión, se asume que las lámparas puedan ser tratadas como sistemas lineales de manera que se presenta un modelo de respuesta a las fluctuaciones de tensión para cada una de ellas que

se ajusta a los valores experimentales de las curvas de ganancia obtenidos en el análisis de sensibilidad.

2. Utilizando las curvas de ganancia calculadas en el punto anterior, se diseñan los filtros de ponderación que modelan el conjunto lámpara-ojo para cada una de las lámparas analizadas.
3. Se sustituye el filtro de ponderación del bloque 3 del flickermetro IEC por cada uno de los filtros diseñados de manera que se obtiene un medidor de flicker para cada una de las lámparas analizadas.
4. Se presenta una simulación del modelo del flickermetro diseñado para una de las lámparas analizadas (CFL 9 W). Los errores registrados entre los resultados esperados para esa lámpara y los obtenidos fueron menores del 5%.

2.3 BÚSQUEDA DE UNA NUEVA REFERENCIA PARA LA MEDIDA DE FLICKER

Los resultados de Cai⁸ mostraron la baja sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de las lámparas distintas a la incandescente. Esto sirvió como explicación para aquellas situaciones en donde se registraban niveles altos de flicker sin que hubiera quejas por parte de los usuarios. Ante esta hipótesis, se propuso la modificación del flickermetro IEC adaptándolo a una nueva lámpara de referencia.

Con el objetivo de encontrar aquella lámpara que sirviera como punto de partida de un nuevo modelo para la medida de flicker, era necesario un análisis más exhaustivo de la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de las nuevas tecnologías de iluminación. En este contexto, a continuación se exponen los resultados obtenidos de varios estudios realizados paralelamente al trabajo de tesis. Estos estudios serán comparados y discutidos con los resultados obtenidos en este trabajo de tesis en el [Capítulo 4](#).

Existen estudios en los que se incluyen un gran número de lámparas CFL y LED, tecnología actualmente consolidada en el mercado, analizando su

sensibilidad a las tradicionales fluctuaciones AM de tensión por medio del cálculo de su curva de ganancia. En concreto, los estudios realizados por Chmielowiec¹³ y Sharma et al.⁷² analizan una amplia variedad de lámparas correspondientes a diferentes tecnologías de iluminación, incluyendo lámparas halógenas, CFL y LED, sujetas a fluctuaciones de tensión sinusoidales y rectangulares. La [Tabla 2.4](#) resume algunos de los resultados obtenidos mostrando los valores de sensibilidad normalizados con los correspondientes a la lámpara incandescente. Las CFL mostraban en general un comportamiento menos sensible que la incandescente, sin embargo su sensibilidad se incrementaba con la frecuencia de la fluctuación de manera que para $f_m > 20$ Hz algunas lámparas alcanzaban o incluso superaban la sensibilidad de la incandescente (lámparas 1, 2 y 3 de la [Tabla 2.4](#)). Para el caso de las lámparas LED, debido a la diversidad en los resultados obtenidos en los estudios es difícil extraer una conclusión clara con la que caracterizar el comportamiento de estas lámparas. Algunas LED, lámparas 6 y 9 de la [Tabla 2.4](#), mostraban una sensibilidad claramente menor que la incandescente. Sin embargo las lámparas 7, 8 y 10 de la [Tabla 2.4](#) superaban la sensibilidad de la incandescente para $f_m > 20$ Hz, y las lámparas 11 y 12 mostraban también una sensibilidad por encima de la incandescente en todo el rango de frecuencias analizado.

Sharma et al.⁷² también incluye en su estudio algunas lámparas regulables, tanto CFL como LED, con el objetivo de analizar su sensibilidad ante fluctuaciones rectangulares de tensión en diferentes niveles de regulación de la luminosidad. La [Tabla 2.5](#) muestra los valores de sensibilidad obtenidos normalizados con respecto a la lámpara incandescente para dos niveles de regulación diferentes: al nivel nominal de luminosidad y cuando el regulador limita la luminosidad a menos del 50% de su valor nominal. Como se puede observar, para niveles de luminosidad bajos una de las CFL, la lámpara 1, mostraba una sensibilidad muy por encima de la incandescente para todo el rango de frecuencias analizado. Sin embargo, la sensibilidad de las dos lámparas LED regulables estudiadas no mostraba ningún incremento a niveles bajos de luminosidad, manteniéndose siempre por debajo de la lámpara incandescente.

Tecnología	Id.	Estudio	Tipo Fluct. ^a	f_m (Hz)		
				5	15	25
CFL	1	Chmielowiec ¹³	Sin.	0.45	0.76	1.14
	2	Chmielowiec ¹³	Sin.	0.42	0.50	1.00
	3	Chmielowiec ¹³	Rect.	0.46	0.79	1.05
	4	Chmielowiec ¹³	Rect.	0.40	0.63	0.84
	5	Sharma et al. ⁷²	Rect.	0.35	0.80	0.60
LED	6	Chmielowiec ¹³	Sin.	0.21	0.40	0.58
	7	Chmielowiec ¹³	Sin.	0.58	0.97	1.39
	8	Chmielowiec ¹³	Sin.	0.61	1.10	1.61
	9	Chmielowiec ¹³	Rect.	0.24	0.40	0.50
	10	Chmielowiec ¹³	Rect.	0.57	0.93	1.26
	11	Sharma et al. ⁷²	Rect.	1.06	2.5	2.75
	12	Sharma et al. ⁷²	Rect.	1.13	3.33	3.75

^a Fluctuación de tensión Sin.: sinusoidal / Rect.: rectangular

Tabla 2.4. Valores de sensibilidad normalizados para lámparas sujetas a modulaciones AM de tensión. Valores extraídos de los estudios de Chmielowiec¹³ y Sharma et al.⁷².

Tecnología	Id.	Nivel luminosidad	f_m (Hz)		
			5	15	25
CFL	1	Alto ^a	0.37	0.55	0.48
		Bajo ^b	1.95	2.10	2.45
	2	Alto	0.16	0.20	0.40
		Bajo	0.44	0.58	0.68
LED	3	Alto	0.05	0.17	0.17
		Bajo	0.18	0.16	0.21
	4	Alto	0.10	0.32	0.30
		Bajo	0.17	0.26	0.27

^a Nivel nominal de luminosidad

^b Menor del 50% del nivel nominal de luminosidad

Tabla 2.5. Valores de sensibilidad normalizados para lámparas regulables con distintos niveles de regulación aplicados. Valores extraídos del estudio de Sharma et al.⁷².

Por otro lado, otros estudios actuales tratan de analizar la respuesta de las lámparas ante fluctuaciones de tensión provocadas por interarmónicos^{12,28,79}. Estos estudios no se limitan sólo al análisis de las lámparas fluorescentes sino que incluyen ya lámparas LED al presentar éstas también comportamientos sensibles a este tipo de fluctuaciones de

tensión. En concreto, [Taekhyun et al.](#)⁷⁹ analiza de manera visual cuáles son las magnitudes máximas de los interarmónicos para los cuales se comienza a percibir parpadeo en la luminosidad de un conjunto de lámparas CFL y LED. Este trabajo comprobó que ambas tecnologías de iluminación presentaban una respuesta más sensible a interarmónicos cercanos al tercer y quinto armónico de la señal de tensión.

Con el objetivo de subsanar la deficiencia que presenta el flickermetro IEC a la hora de evaluar las fluctuaciones de tensión provocadas por interarmónicos⁸⁹, existen estudios orientados directamente a la modificación del flickermetro IEC. Los trabajos de [Drapela](#)²⁴, [Kim et al.](#)⁵⁸ y [Slezingr y Drapela](#)⁷⁶ sustituyen el demodulador del bloque 2 por un detector de picos, aunque se trata una solución parcial ya que no modifican el filtro de ponderación del bloque 3. La propuesta de [Hooshyar y El-Saadany](#)⁴⁷ incluye un bloque inyector de armónicos entre el bloque 1 y 2 del flickímetro IEC, y presenta una estrategia de diferentes filtros de ponderación en paralelo para caracterizar la respuesta frecuencial de varias lámparas. [Zargari et al.](#)⁹² propone incluir múltiples filtros paso banda después del bloque 1 y presenta un filtro de ponderación aproximado a partir de las curvas de ganancia de varias CFL. Finalmente, [Drapela et al.](#)²⁶ proponen un flickermetro ajustable a cualquier tipo de lámpara por medio de tres parámetros obtenidos a partir de modelos que caracterizan la respuesta de las lámparas⁷⁷.

2.4 PROPUESTA DE TESIS

El trabajo del grupo C4.108 del CIGRE concluyó con la presentación de dos posibles líneas de trabajo: la adaptación del medidor de flicker y la modificación de los niveles de compatibilidad en base a una nueva lámpara de referencia. El testigo lo recogieron los grupos de trabajo 77A-WG2 del IEC y C4.111 del CIGRE, que aunaron esfuerzos con el fin de analizar la validez de estas medidas. La presente tesis comenzó gracias a la estrecha colaboración con ambos grupos de trabajo en la búsqueda de resultados concluyentes sobre la sensibilidad de las nuevas tecnologías que permitieran arrojar luz sobre las medidas a tomar en el marco de la regulación del flicker.

El análisis bibliográfico realizado sobre los distintos estudios de sensibilidad existentes permitió la identificación de oportunidades y retos en el estudio de la medida del flicker ante la evolución de las nuevas tecnologías de iluminación. A continuación, se presentan las motivaciones más relevantes que lanzaron y estructuraron el presente trabajo de tesis.

Existen estudios que analizan la sensibilidad de un tipo concreto de tecnologías de iluminación y, en general, a partir de un tipo de perturbación concreta generadora de fluctuaciones de tensión. Sin embargo, la búsqueda de respuestas que permitan identificar de manera más concluyente y general la sensibilidad que presenta cada tecnología de iluminación implica un estudio más extenso. Es necesaria la comparación de un amplio número de lámparas representativas de las distintas tecnologías de iluminación existentes en el mercado, estudiando su respuesta ante distintos tipos de perturbación: señales moduladas AM y señales con contenido interarmónico.

En cuanto a las fluctuaciones de tensión utilizadas en los estudios del análisis bibliográfico presentado, en todos los casos se trata de fluctuaciones simuladas caracterizadas por la magnitud de la fluctuación y su frecuencia. Sin embargo, las fluctuaciones de tensión reales presentes en la red eléctrica presentan un contenido frecuencial mucho más complejo que no puede ser comparable al de las fluctuaciones simuladas de tensión. Es por ello necesario analizar si la respuesta de las lámparas obtenida en situaciones controladas de laboratorio puede llegar a ser representativa de su comportamiento en escenarios reales.

Además, la búsqueda de la eficiencia energética no viene únicamente asociada al uso de tecnologías de iluminación más eficientes sino también a la utilización de sistemas de control que permiten adaptar el nivel de luz a las necesidades reales de cada momento. A pesar de que el uso de lámparas regulables junto con sistemas de control de luz es cada vez más común, el número de estudios que analizan la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión en estos casos es muy limitado. Es necesario extender el estudio de sensibilidad de las lámparas usando reguladores de luz que permitan estudiar su respuesta en diferentes condiciones de regulación.

La linealidad en la sensibilidad de las lámparas es un aspecto importante pero muy poco analizado por parte de los estudios de sensibilidad existentes. En un escenario en el que la lámpara de referencia seleccionada presentase un comportamiento no lineal, su modelado dentro del flickermetro IEC sería un asunto complejo. Además, un posible comportamiento no lineal exigiría el estudio de la sensibilidad en distintos niveles de fluctuación y no únicamente en el umbral de molestia. En la tesis de Cai⁸ la linealidad se analiza únicamente para fluctuaciones sinusoidales de tensión. Es por tanto necesario ampliar el estudio utilizando diferentes tipos de perturbaciones, comprobando incluso si los resultados de linealidad obtenidos en condiciones controladas de laboratorio son representativos de su respuesta en situaciones reales.

Finalmente, la gran variedad de lámparas existentes y el rápido y continuo avance tecnológico en el sector de la iluminación resultan desalentadores para la búsqueda de una nueva tecnología de referencia que permita el diseño del flickermetro IEC en base al modelado de una nueva lámpara y la coherencia entre la medida y la verdadera percepción. En el marco de regulación del flicker es fundamental la búsqueda de soluciones alternativas, viables y efectivas que permitan garantizar que la medida de flicker sea significativa del flicker generado por las nuevas tecnologías de iluminación.

Esta tesis pretende aportar luz en los cinco temas indicados en los párrafos precedentes.

3 | MATERIALES Y HERRAMIENTAS

*An experiment is a question which science poses to Nature,
and a measurement is the recording of Nature's answer.*

— Max Planck

Para estudiar la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de las nuevas tecnologías de iluminación, se seleccionaron un conjunto de lámparas que tanto por su tecnología como por sus características eléctricas y de luminosidad representan el estado actual e, incluso, el futuro a corto plazo del sector de la iluminación. En este capítulo se presentan las principales propiedades de cada una de las lámparas seleccionadas y se analiza en profundidad su comportamiento eléctrico y lumínico.

Por otra parte, los estudios realizados tuvieron como base el análisis de las características de la fluctuación de la luminosidad de las lámparas seleccionadas. Para ello, se diseñó un completo sistema para la generación de la tensión y para la captación de la luz procedente de la lámpara bajo estudio. En este capítulo se describe cada una de las partes de las que se compone el sistema. Dependiendo del tipo de experimento realizado, el sistema permite la generación controlada en el laboratorio de fluctuaciones simuladas superpuestas a la tensión de alimentación de las lámparas, así como la reproducción de señales de tensión registradas en localizaciones reales. Además, tras la captación de las fluctuaciones de luminosidad de la lámpara, el sistema permite realizar el análisis de la sensibilidad mediante dos herramientas distintas, a partir del análisis directo de la señal de luz o en términos de la severidad flicker que genera. En este capítulo se presenta la descripción de ambas

herramientas, así como la implementación utilizada de cada una de ellas durante las pruebas de sensibilidad.

Finalmente, se presenta el procedimiento de verificación llevado a cabo para comprobar el correcto funcionamiento del sistema implementado. De este modo, se acota la precisión de las medidas realizadas durante el posterior análisis de sensibilidad de las lámparas.

3.1 CONJUNTO DE LÁMPARAS BAJO ESTUDIO

Las lámparas analizadas en este trabajo han sido seleccionadas respondiendo a las necesidades surgidas de la colaboración con los grupos de trabajo internacionales C4.111 del CIGRE, 77A-WG2 del IEC y MT1 TC34 del IEC. Los criterios de selección se establecieron con el objetivo de cubrir lámparas procedentes de diferentes fabricantes, basadas en distintas tecnologías y que presentaran diferentes eficiencias energéticas y consumos.

La [Tabla 3.1](#) muestra las principales características de cada una de las lámparas bajo estudio. Las lámparas seleccionadas comprenden fabricantes de alta y baja gama (Philips, General Electric, Osram, Lexman, Sylvania y Megaman), diferentes tecnologías de iluminación (lámparas incandescentes y halógenas, LFL, CFL y LED), así como un rango de valores de consumo (8–60 W) y flujo luminoso (420–1521 lm) que se encuentran entre los valores representativos de las lámparas de filamento. Las lámparas seleccionadas presentan además diferentes valores de eficiencia energética, representados mediante las clases definidas por la UE, que van desde la máxima eficiencia (A) hasta la menos eficiente (G).

Por otro lado, se seleccionaron varias lámparas regulables gracias a la aportación realizada por Philips^a en el seno del grupo de trabajo C4.111 del CIGRE, en la que se alertaba de que este tipo de lámparas podría presentar una sensibilidad mayor que la incandescente en condiciones

^a Philips Innovation Services, Q&R-EMC Center
High Tech Campus 26, 5656 AE Eindhoven, The Netherlands.

Id.	Tecnología	Fabricante	Modelo	Consumo (W) ^a	Lumen	Clase ^b	Regulable
I1	Incandescente	Philips	-	60	850	E	SI
I2	Incandescente	Philips	Frosted Rough service	60	515	E	SI
I3	Incandescente	Gamma	-	60	800	E	SI
H1	Halógena	Lexman	-	42	630	C	SI
F1	LFL ^d	Sylvania	F18W/54-765-T8	18	1050	B	NO
C1	CFL ^c	Philips	Genie	11	570	A	NO
C2	CFL ^c	Lexman	EU23W	23	1380	A	NO
C3	CFL ^d	General Electric	Biax F18DBX	18	1050	B	NO
C4	CFL ^c	Philips	Softone	12	600	A	SI
C5	CFL ^c	Megaman	GSU111d	11	570	A	SI
C6	CFL ^c	Philips	Genie	8	420	A	NO
C7	CFL ^c	Philips	Tornado Energy Saver	20	1220	A	NO
L1	LED	Ostram	Parathom Classic A60	12	650	A	NO
L2	LED	Philips	EnduraLED 409938	8	470	A	SI
L3	LED	Philips	Master LEDbulb MV	20	1521	A	NO

^a Tensión nominal de 230 V y frecuencia de red de 50 Hz.

^b Clase energética: etiquetado de la UE a través de 7 clases (Mayor eficiencia A - Menor eficiencia G).

^c Balasto electrónico.

^d Balasto electromagnético.

Tabla 3.1. Descripción de las lámparas bajo estudio.

de baja luminosidad. Este aspecto podría llegar a ser preocupante ya que cada vez se utilizan más sistemas de regulación y control del alumbrado bajo la premisa de un uso inteligente de la luz.

Algunas de las lámparas de la [Tabla 3.1](#) se utilizaron en el estudio de sensibilidad que se presenta en el [Capítulo 4](#) de esta tesis. Otras se emplearon en el estudio realizado junto con el grupo MT1 TC34 del IEC en la definición del protocolo de inmunidad a las fluctuaciones de tensión que se presenta en el [Capítulo 5](#).

A continuación, se presenta un breve análisis tanto de las características eléctricas como lumínicas de las diferentes tecnologías de iluminación. Por otro lado, se presenta el comportamiento de las lámparas regulables en condiciones de regulación de la luminosidad.

3.1.1 Características eléctricas de las lámparas bajo estudio

Se estudia el comportamiento eléctrico de 4 tecnologías de iluminación distintas. Por un lado, se analizan las señales de corriente que presenta cada una de las lámparas y, por otro, se obtienen sus factores de potencia^b.

La [Figura 3.1](#) representa las señales de corriente (líneas azules) registradas para la lámpara incandescente, una LFL, una CFL y una LED, en concreto las lámparas I1, F1, C1 y L2 de la [Tabla 3.1](#), cuando la tensión de alimentación (líneas rojas) es una señal sinusoidal de 50 Hz y 230 V_{ef} . Se observa que para la lámpara incandescente la señal de corriente es una señal sinusoidal en fase con la señal de tensión, característica propia de las cargas puramente resistivas. Sin embargo, las lámparas LFL (F1), CFL (C1) y LED (L2) presentan características de corriente bien distintas. Al tratarse de cargas no lineales, estas lámparas introducen armónicos en la corriente distorsionando su forma de onda^{70,84,87}. En concreto, la [Figura 3.2](#) muestra el valor de distorsión armónica total (THD^c) y la relación porcentual entre la amplitud de las componentes

^b El factor de potencia se define como el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente, describiendo la cantidad de energía eléctrica que se convierte en trabajo (para el caso de las lámparas en luz y calor disipado).

^c THD: Total Harmonic Distortion.

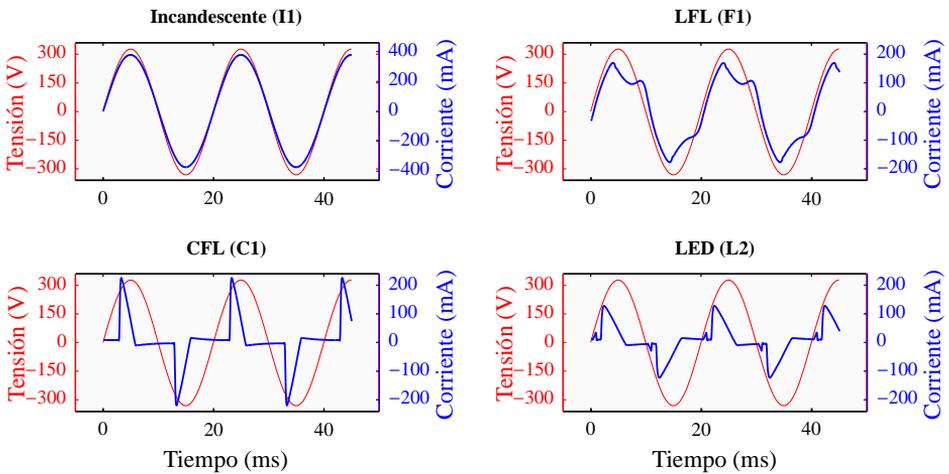


Figura 3.1. Señales de corriente y tensión registradas para cuatro tecnologías de iluminación diferentes.

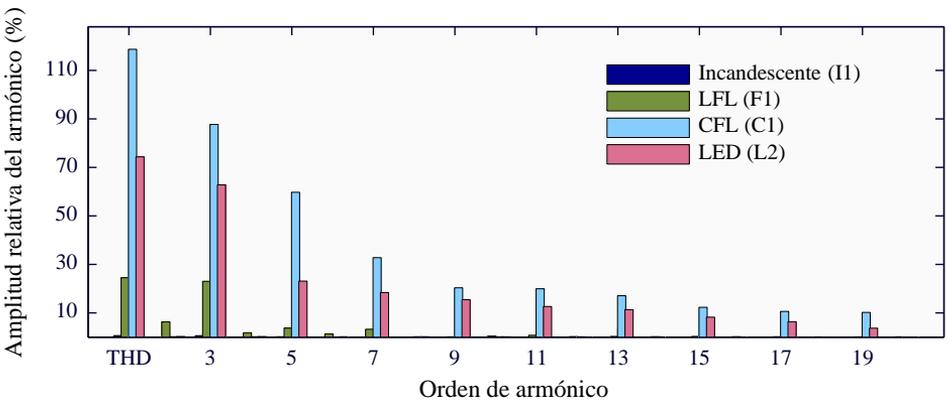


Figura 3.2. Contenido armónico de la corriente registrada para cuatro tecnologías de iluminación diferentes.

armónicas y la componente fundamental de la corriente de cada una de las lámparas. Se observa que la lámpara incandescente no presenta armónicos en la corriente, mientras que las demás lámparas generan principalmente armónicos impares de amplitud decreciente con el orden del armónico. En concreto, las lámparas CFL (C1) y LED (L2) presentan valores cercanos al 90% y 60%, respectivamente, para el caso del tercer armónico.

Por otro lado, la [Tabla 3.2](#) muestra los factores de potencia calculados para cada una de estas lámparas. Para el caso de cargas lineales, el factor de potencia (PF^d) se corresponde con el coseno del ángulo que forman los fasores de tensión y corriente de la componente fundamental de 50 Hz. En concreto, para cargas puramente resistivas como la lámpara incandescente, el PF se encuentra muy próximo a la unidad ($PF(I1) = 0.995$, ver [Tabla 3.2](#)). Las lámparas LFL (F1), CFL (C1) y LED (L2) son cargas inductivas que consumen energía reactiva, lo que se reflejaría en un PF menor. Calculando el PF como el coseno del ángulo que forman la componente fundamental de la tensión y corriente en estas lámparas, la [Tabla 3.2](#) refleja valores de PF del 0.842 y 0.686 para la CFL (C1) y LED (L2), respectivamente. El valor de PF tan cercano a la unidad que muestra la lámpara LFL (F1) indica que esta lámpara está diseñada para aplicar una corrección del PF.

	I1	F1	C1	L2
PF	0.995	0.999	0.842	0.686
TPF	0.995	0.971	0.542	0.550

Tabla 3.2. Valores de PF y TPF de cuatro tecnologías de iluminación diferentes.

El contenido armónico presente en la corriente de las lámparas LFL (F1), CFL (C1) y LED (L2) afecta también al cálculo del factor de potencia. Para el caso de cargas no lineales, el verdadero factor de potencia (TPF^e) se obtiene multiplicando al PF por un término llamado distorsión del factor de potencia (DPF^f) asociado a la distorsión armónica total de la corriente. En la [Tabla 3.2](#) se observa que los valores de PF y TPF coinciden para el caso de la lámpara incandescente al no presentar ésta contenido armónico alguno en su señal de corriente (valor de THD prácticamente nulo en la [Figura 3.2](#)). Sin embargo, los valores de TPF de las demás lámparas disminuyen con respecto a sus valores de PF, en mayor o menor medida dependiendo del factor de distorsión que

- d** El PF (del inglés Power Factor) se calcula como el $\cos \phi$ donde ϕ es el ángulo que forman los fasores de tensión y corriente de la componente fundamental.
- e** TPF (del inglés True Power Factor) incluye la influencia del contenido armónico en el cálculo del factor de potencia y se obtiene como $TPF = \cos \phi \cdot DPF$ donde DPF es la distorsión del factor de potencia .
- f** DPF (del inglés Distortion Power Factor) se calcula como $DPF = \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}}$ donde THD es la distorsión armónica total.

presentan. En concreto, para la CFL (C1) se obtiene un valor de TPF del 0.542, reflejando el elevado valor de THD que presenta esta lámpara (ver [Figura 3.2](#)).

3.1.2 Características de luminosidad de las lámparas bajo estudio

Ante una tensión alterna de 50 Hz, la señal de luminosidad presenta diferentes formas de onda en función de la tecnología de iluminación utilizada⁶¹. La [Figura 3.3](#) muestra las señales de luminosidad producidas por cuatro tipos de lámparas diferentes (incandescente, LFL, CFL y LED), en concreto las lámparas I1, F1, C1 y L2 de la [Tabla 3.1](#). Las dos componentes principales presentes en la señal de luminosidad son una componente continua responsable del nivel de luminosidad emitida y una componente de 100 Hz, como se puede observar en la luminosidad de la lámpara incandescente. Sin embargo, en las demás tecnologías de iluminación la forma de onda se encuentra distorsionada de forma importante, consecuencia de la mayor complejidad frecuencial que presentan sus señales de luminosidad.

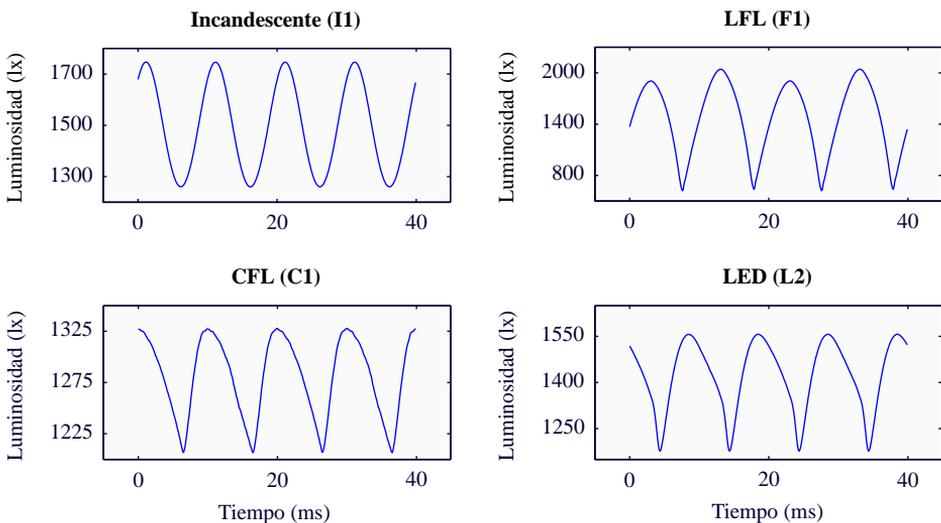


Figura 3.3. Señales de luminosidad registradas para cuatro tecnologías de iluminación diferentes.

Por otra parte, a diferencia de la lámpara incandescente, algunas tecnologías de iluminación necesitan de un periodo de tiempo previo para poder alcanzar su máximo nivel de emisión de luz. La [Figura 3.4](#) muestra la evolución temporal del valor eficaz de la luminosidad de las lámpara I1, F1, C1 y L2. Como se puede observar, tanto la lámpara incandescente (I1) como la LED (L2) alcanzan su nivel máximo de luminosidad prácticamente de manera instantánea tras la conexión de la alimentación. Sin embargo, la LFL (F1) y la CFL (C1) necesitan de un periodo de tiempo para alcanzar la estabilidad en el nivel máximo de su luminosidad. Tras analizar los tiempos de calentamiento de todas las lámparas incluidas en el estudio, se decidió añadir un tiempo de calentamiento previo de 900 s, antes de registrar las señales de luminosidad.

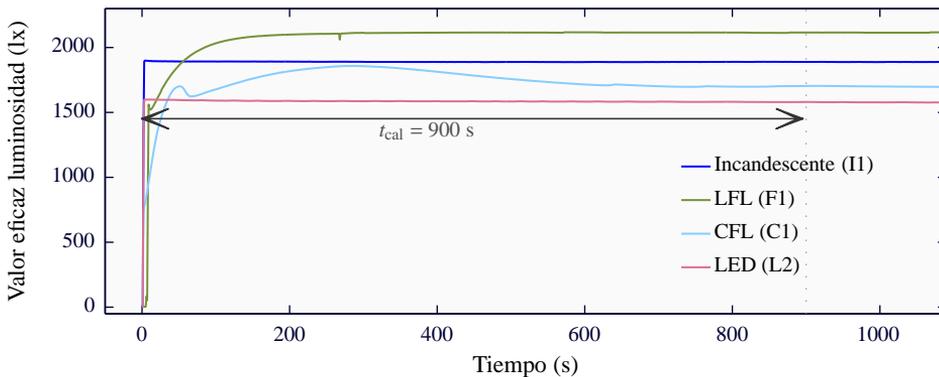


Figura 3.4. Evolución temporal del valor eficaz de la señal de luminosidad de cuatro tecnologías de iluminación diferentes.

3.1.3 Comportamiento de las lámparas en condiciones de regulación

La sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de las lámparas regulables puede variar en función del nivel de luminosidad principalmente por dos razones. Por un lado, el parpadeo de la luz es más visible a medida que bajamos el nivel de luminosidad ya que el ojo se encuentra menos saturado por la luz y es más sensible a las variaciones lumínicas. Por otro lado, la interacción entre los reguladores de luz y el propio sistema de control de luminosidad de las lámparas regulables aporta caminos

adicionales por los que la fluctuación de tensión influye sobre la lámpara. En el grupo de trabajo C4.111 del CIGRE, Philips presentó resultados en los que visualmente se había comprobado el parpadeo en varias lámparas regulables sujetas a bajos niveles de luminosidad. Por esta razón, Philips puso a disposición del estudio algunas de estas lámparas así como uno de los tipos de reguladores más comúnmente utilizados, el regulador de corte de fase ascendente (Regulador LE^g). En concreto, el regulador de luz utilizado en el estudio fue el LE Busch-Jaeger 2247U.

El regulador se coloca en serie entre la línea de alimentación y la propia fuente de luz. El funcionamiento de este regulador consiste en recortar parte de la onda sinusoidal en la tensión de alimentación, con el objetivo de obtener una regulación del nivel lumínico proporcionado por la lámpara⁷⁸. Al tratarse de un regulador de corte de fase ascendente, el recorte de la onda se realiza al comienzo de la onda sinusoidal, es decir, tras el paso por cero de la señal.

La [Figura 3.5a](#) muestra la forma de onda de la señal de tensión a la salida del regulador en dos posiciones distintas: sin regulación y al aplicar la regulación correspondiente al recorte del 50% de la señal de tensión. La [Figura 3.5b](#) representa la luminosidad que genera una lámpara incandescente en cada una de estas posiciones de regulación. Se observa que al recortar la señal de tensión de alimentación al 50%, el valor medio de la luminosidad de la lámpara disminuye también en torno a ese ratio, controlando así el nivel lumínico deseado. Por otro lado, se observa también que la distorsión producida con el recorte en la forma de onda de la tensión se traduce en una distorsión en la forma de onda de la luminosidad.

^g LE: Leading Edge.

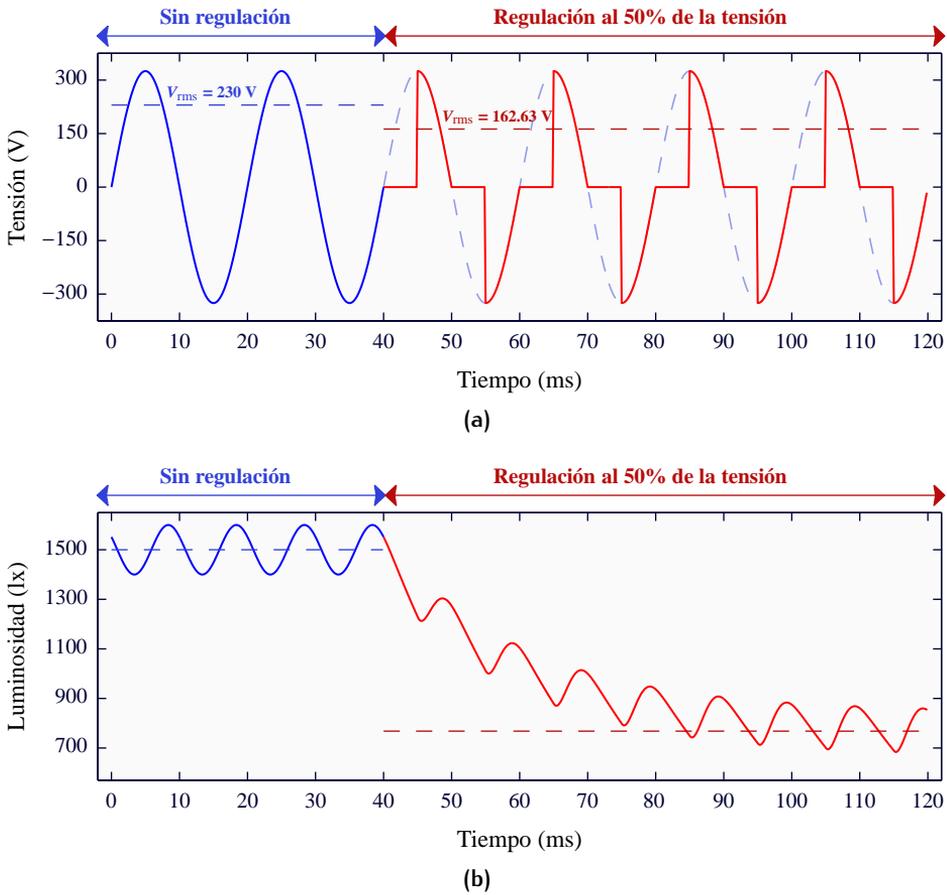


Figura 3.5. Ejemplo del funcionamiento de un regulador LE. (a) Señal de tensión recortada por el regulador; (b) Señal de luminosidad de una lámpara incandescente en condiciones de regulación.

3.2 SISTEMA PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS LÁMPARAS

Para analizar la sensibilidad de las lámparas a distintos tipos de fluctuaciones de tensión se implementó un sistema que realizara las siguientes funciones:

1. Generar la tensión de alimentación de la lámpara.
2. Adquirir y registrar la luminosidad de la lámpara.

3. Analizar la sensibilidad de la lámpara a través de herramientas que procesan las variaciones de luminosidad registradas.

La [Figura 3.6](#) muestra el esquema funcional del sistema de análisis así como una fotografía del mismo. A continuación se describe detalladamente cada una de las partes de las que se compone este sistema.

3.2.1 Generación de la señal de tensión y adquisición de la luz

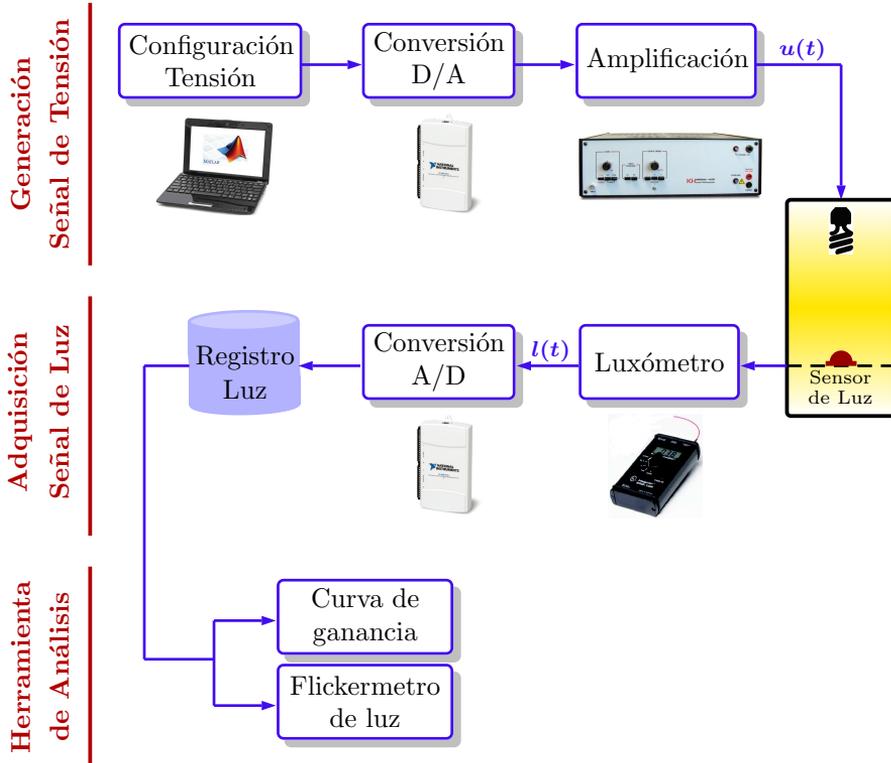
Tal y como se representa en la [Figura 3.6](#), la parte del sistema encargada de la generación de la tensión de alimentación de la lámpara y de la adquisición de la señal de luminosidad consta de los siguientes módulos:

Configuración de la señal de tensión

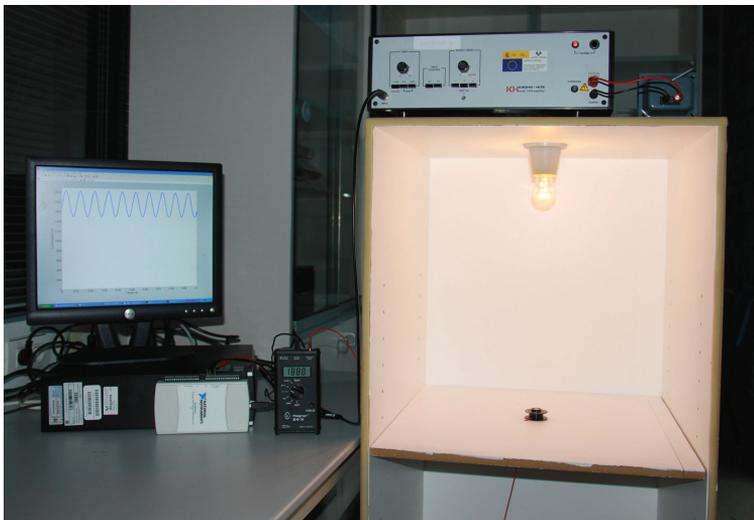
De acuerdo a las distintas pruebas a las que se somete a las lámparas, las fluctuaciones de tensión utilizadas provienen en unos casos de señales de tensión simuladas, y en otros de señales de tensión registradas en situaciones reales. La selección del tipo de prueba así como la configuración de las principales características de la señal de tensión se realiza a través de una herramienta software implementada en lenguaje de programación Matlab.

En el caso de las señales de tensión simuladas, las fluctuaciones pueden estar causadas por modulaciones AM (sinusoidales o rectangulares) o por frecuencias interarmónicas. En función del tipo de señal simulada, además de los parámetros comunes como la frecuencia de muestreo, f_s^{gen} , o la duración de la prueba, se deben configurar los siguientes parámetros específicos:

- Para las modulaciones AM es necesario especificar la frecuencia de la fluctuación, f_m (Hz), y su amplitud relativa de la fluctuación, $\frac{\Delta V}{V}$ (%).



(a)



(b)

Figura 3.6. Sistema para el análisis de sensibilidad de las lámparas. (a) Diagrama del sistema; (b) Fotografía del sistema.

- Para los interarmónicos es necesario especificar la frecuencia del interarmónico, f_{ih} (Hz), y su amplitud relativa con respecto a la componente fundamental, m (%).

Las señales de tensión reales fueron registradas en una campaña de medidas previa a la realización de esta tesis. Ésta se llevó a cabo en distintas localizaciones del norte de España utilizando el sistema de registro descrito por Gutiérrez⁴³. Las señales se registraron utilizando una frecuencia de muestreo común de 6400 m/s quedando almacenadas en archivos binarios. Éstos se identificaron con una cabecera única en donde se especifican parámetros como la duración del registro, los canales de tensión y corriente registrados, fecha y hora de inicio del registro y valor de frecuencia de muestreo, entre otros.

Conversión Digital/Analógico (D/A)

Una vez configurada la señal de tensión o seleccionado el registro de señal de tensión real, es necesario pasar del formato digital de ésta a una señal analógica válida para la alimentación de la lámpara. Esta conversión D/A se realiza a través de la tarjeta de adquisición de 16 bits USB 6211 de National Instruments. La comunicación con la tarjeta de adquisición así como la configuración de uno de sus canales analógicos de salida se realiza también a través de un software de configuración implementado en Matlab. La señal analógica de salida que proporciona la tarjeta tiene un rango de ± 10 V.

Etapas de amplificación

La señal de salida de la etapa de conversión D/A debe ser amplificada para conseguir un nivel de tensión de 230 V_{ef} adecuado para alimentar la fuente de luz. Para ello, la etapa de amplificación está formada por el amplificador Krohne Hite 7500, de ancho de banda de DC^h a 1 MHz y potencia 75 W cuya salida se conecta a un transformador de 120/230 V. La salida de esta etapa de amplificación se corresponde con la tensión de alimentación de la fuente de luz, $u(t)$.

^h DC: Direct Current.

Fuente de luz y adquisición de su luminosidad

La lámpara bajo estudio se encuentra dentro de una caja, con el objetivo de evitar cualquier perturbación lumínica externa al experimento (ver [Figura 3.7](#)). La caja tiene unas dimensiones de 65x65x122 cm de anchura, fondo y altura respectivamente. En su interior se dispone de una balda que se puede situar a 18 alturas diferentes. En la parte superior interna de la caja se conecta la lámpara.

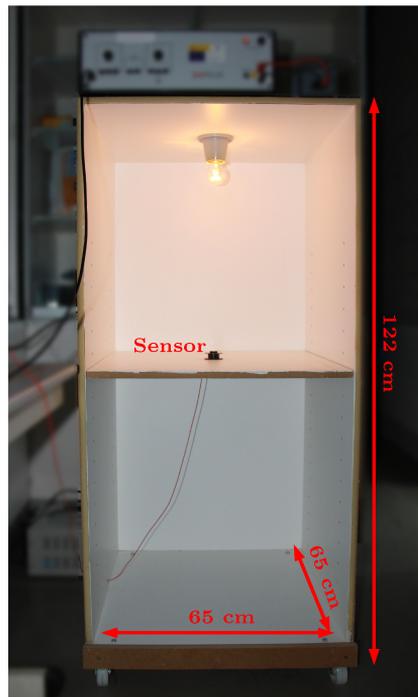


Figura 3.7. Fotografía de la caja utilizada para capturar la luminosidad de las lámparas bajo estudio.

La adquisición de la luminosidad se realiza por medio del luxómetro Hagner E4-X cuyo sensor de luz está fijado sobre la balda. Este luxómetro permite medir la luminosidad de una fuente de luz en un rango de 0.01 a 200 000 lx por medio de 6 escalas. La sensibilidad espectral del luxómetro se corresponde con la de la sensibilidad

luminosa espectral del observador estándar definido por CIEⁱ⁵⁵. El luxómetro proporciona una salida analógica en voltios con un rango entre 0-2 V.

Teniendo en cuenta el nivel de luminosidad proporcionado por cada lámpara, el ajuste de la distancia entre el sensor y la lámpara permite la selección adecuada de la escala del luxómetro, optimizando así la precisión y la resolución de la medida.

La salida del luxómetro se corresponde con la señal de luminosidad escalada, $l(t)$, de la lámpara a analizar.

Conversión Analógico/Digital (A/D)

Por medio de la misma tarjeta de adquisición (USB 6211 de National Instruments) que la utilizada en la etapa de conversión D/A, se realiza ahora el proceso de conversión de la señal luminosa analógica a formato digital. Para ello, se configura uno de los canales analógicos de entrada de la tarjeta a través de la misma herramienta software implementada en Matlab, indicando la frecuencia de muestreo deseada, f_s^{reg} , para la realización de la conversión.

Una vez se dispone de la señal de luminosidad digitalizada, esta información pasa a formar parte de la base de registros de luz a través de la cual se realizará el análisis de sensibilidad de las lámparas.

Base de registros de luz

Teniendo en cuenta las diferentes pruebas realizadas al conjunto de lámparas seleccionadas, se ha conseguido disponer de una extensa y completa base de registros de luminosidad para el análisis de la sensibilidad de las lámparas. La [Figura 3.8](#) muestra un esquema de la base de registros, especificando en cada caso las principales características de cada prueba realizada.

ⁱ CIE: Commission Internationale de l'Éclairage. Es la autoridad internacional en luz, iluminación, color y espacios de color.

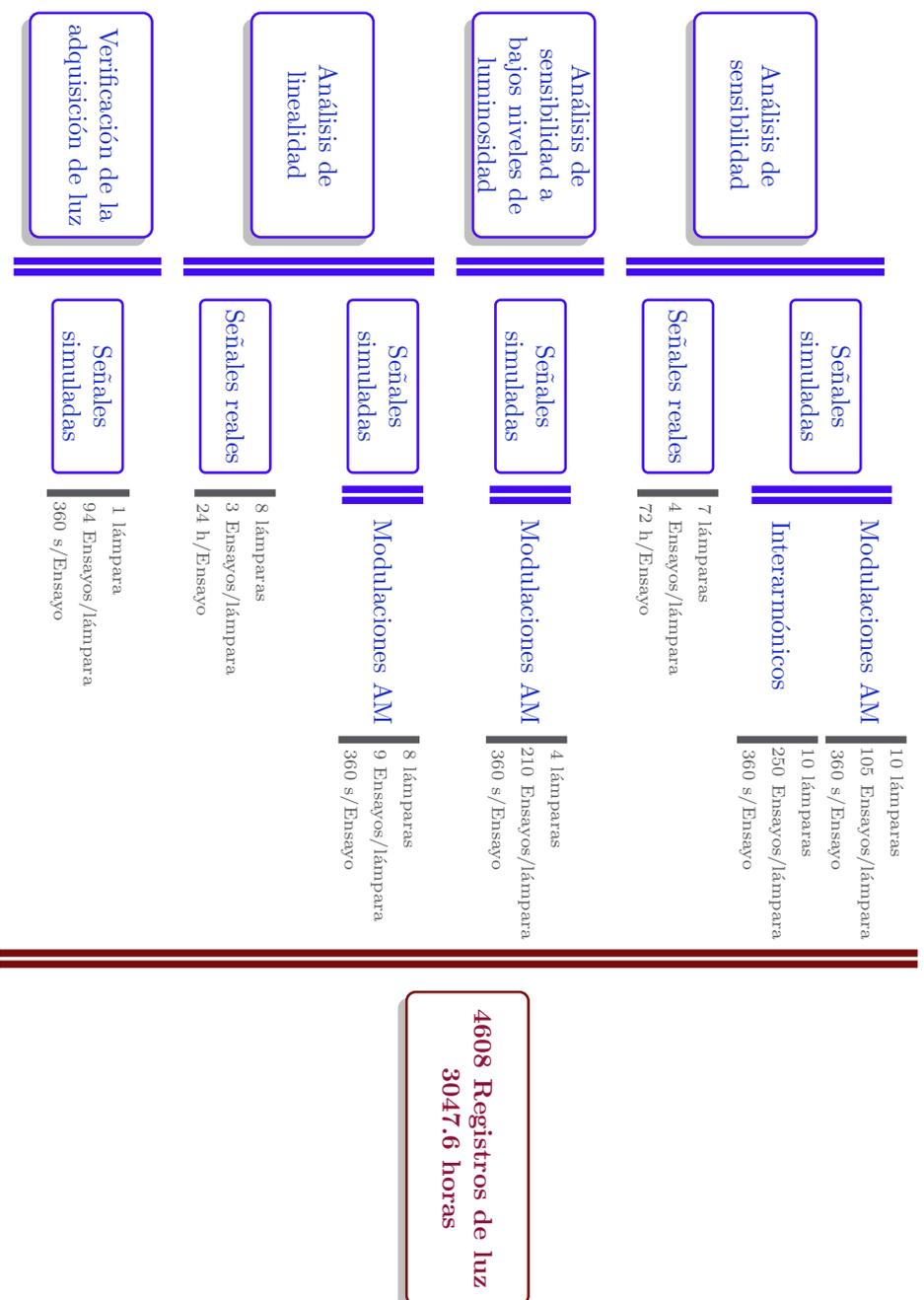


Figura 3.8. Diagrama de la base de registros de luz obtenida a través de la realización de los distintos experimentos.

Los registros de luz se han clasificado en función del experimento a realizar. De esta forma, se disponen de registros destinados a comparar la sensibilidad de las lámparas, otros obtenidos para el análisis de la sensibilidad de las lámparas regulables bajo distintos niveles de luminosidad y por último, registros de luz obtenidos para el estudio de la linealidad en la respuesta de las lámparas. En cada caso, dependiendo del tipo de fluctuación de tensión a generar, la duración de cada registro varía. Cuando se emplean señales de tensión simuladas, debido a la periodicidad de la propia señal y a que la frecuencia más baja utilizada es la de 1 Hz, se utilizan señales de 60 s para el análisis de la respuesta de las lámparas. Sin embargo, dependiendo de la herramienta de análisis del flicker utilizada, será necesario disponer de un periodo de señal previo que permita gestionar el régimen transitorio que presentan los filtros implementados en la propia herramienta. Se emplea un periodo para el transitorio de 300 s que junto con los 60 s de análisis hacen un total de 360 s de duración para los registros de luz obtenidos a partir de señales de tensión simuladas.

Por otro lado, las señales reales de tensión disponibles tienen una duración de 7 días. Teniendo en cuenta el número de lámparas analizadas y con el objetivo de acotar la duración de las pruebas se seleccionan tramos de 3 días en cada una de las 4 señales reales. Para el caso del análisis de la linealidad con señales de tensión reales, debido a que el número de pruebas realizadas por lámpara es mayor, la duración de cada registro de luminosidad se reduce a 1 día.

Además de los registros de luz utilizados para el análisis de sensibilidad de las lámparas, la base de registros también incluye los registros para la verificación de la adquisición de luz del sistema de test implementado para la realización del estudio.

En total se dispone de 4 608 registros de luz con una duración total de 3 047.6 h. Además, el tiempo empleado durante el proceso experimental ha sido mayor debido a los 15 min previos destinados al calentamiento de aquellas lámparas que lo necesiten, tiempo que no se incluye dentro de la base de registros.

3.2.2 Herramientas de análisis

La última etapa de todo el sistema de análisis consiste en la utilización de una herramienta que permita evaluar la sensibilidad de una lámpara a partir de los registros de luz obtenidos en los distintos experimentos realizados. Este análisis se puede llevar a cabo de dos maneras: estudiando directamente la amplitud relativa de las fluctuaciones de luminosidad por medio del cálculo del factor de ganancia o evaluando la molestia por medio de un flickermetro de luz.

Curva de ganancia

La herramienta utilizada tradicionalmente para el estudio de la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de las lámparas ha sido el factor de ganancia^{1,10,32,45}. Este factor se obtiene mediante la medida de la variación relativa de la amplitud de la luminosidad cuando la lámpara está sometida a cambios controlados de tensión, es decir, para valores determinados de amplitud relativa, $\frac{\Delta V}{V}$, y frecuencia, f_m , de la fluctuación de tensión (ver [Ecuación 1.1](#)). Calculando este factor para un determinado rango de f_m se obtiene la curva de ganancia de la lámpara ([Figura 1.3](#)). Esta herramienta es, por tanto, útil para el caso de analizar la respuesta de las lámparas ante fluctuaciones simuladas de tensión en condiciones controladas de laboratorio.

Para unos valores concretos de $\frac{\Delta V}{V}$ y f_m de la fluctuación de tensión, el factor de ganancia se obtiene mediante el cálculo de los valores de amplitud de la fluctuación de luminosidad, ΔL , y nivel medio de luminosidad, L . El método implementado en este estudio para el cálculo del factor de ganancia se basa en el análisis del contenido espectral de la señal de luz a través del cálculo de la Transformada Discreta de Fourier (DFT^j). Para el caso de una fluctuación sinusoidal de tensión, la señal de luminosidad de una lámpara incandescente estará compuesta principalmente por una variación en su amplitud de frecuencia f_m sobre una componente fundamental en $2 \cdot f_0$ ([Figura 1.2](#)). De esta forma, el valor de ΔL se corresponde con la amplitud de la componente

^j DFT: Discrete Fourier Transform.

frecuencial en f_m mientras que el valor de L se obtiene como el valor medio de la señal de luminosidad registrada.

Flickermetro de luz

El factor de ganancia es una herramienta válida en el caso de encontrarnos ante fluctuaciones de tensión controladas y periódicas. Sin embargo, con el objeto de poder analizar la sensibilidad de las lámparas ante señales de tensión más complejas, como pueden ser las que nos encontremos en escenarios reales, es necesaria la utilización de otra metodología distinta. En estos casos, el estudio de la sensibilidad se realizará en función de la molestia provocada por las fluctuaciones de luminosidad procedentes de las distintas lámparas. El flickermetro IEC no resulta válido para este propósito ya que su diseño está basado en el comportamiento de una lámpara concreta, la lámpara incandescente.

Ante el reto de poder evaluar la molestia producida por lámparas distintas a la incandescente, es necesario modificar el flickermetro IEC sustituyendo el modelo de la lámpara incandescente por las características reales de la lámpara a analizar. Para ello, el flickermetro de luz consiste en una adaptación del flickermetro IEC que proporciona un valor de severidad flicker a partir de la señal de luminosidad, en lugar de a partir de la señal de tensión.

El diseño del flickermetro de luz se basa, por tanto, en el propio diseño definido para el flickermetro IEC pero eliminando de todo este proceso la respuesta de la lámpara, al encontrarse ésta ya implícitamente representada en la señal de luminosidad de entrada. Basándonos en la representación por bloques del flickermetro IEC ([Subsección 1.1.2](#)) será necesario aplicarle las siguientes modificaciones:

- La señal de entrada al flickermetro será la señal de luminosidad de la lámpara a analizar.
- El bloque 1 del flickermetro IEC debe ser sustituido por un bloque que permita adaptar la señal de luz de entrada, para independizarse del nivel nominal de luminosidad de cada lámpara.

- Como el flickermetro de luz parte de la señal de luminosidad, tanto el bloque 2 como el 3, que se encargan de la obtención de la luminosidad de la lámpara, deben ser eliminados.

La primera implementación de un medidor de flicker a partir de la luminosidad fue presentada por Gallo et al.^{40,41}. En esta tesis se ha utilizado una implementación propia, evolucionada y de alta precisión⁴. A continuación se describen los principales bloques que componen el flickermetro de luz, representados en la Figura 3.9, y se presentan además las principales características de la implementación digital realizada.

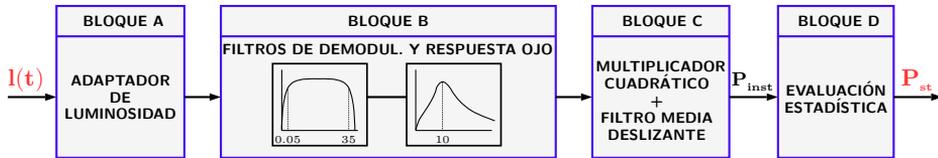


Figura 3.9. Diagrama de bloques del flickermetro de luz.

En el bloque A se escala la señal de luminosidad, $I(t)$, a un nivel de referencia interno con el objetivo de independizar la medida del nivel nominal de luminosidad de cada lámpara. Para ello, se procesan los valores promedios de la señal de entrada a través de un filtro resistivo-capacitivo paso-bajo de primer orden con una constante de tiempo de 27.3 segundos.

En el bloque B se elimina la componente continua y la de 100 Hz de la misma manera que lo hace el flickermetro IEC en su bloque 3, con el objetivo de obtener únicamente la fluctuación de luminosidad. El filtro de ponderación implementado en el flickermetro IEC, correspondiente a la respuesta del conjunto lámpara-ojo, debe ser sustituido por un filtro que caracterice únicamente la respuesta del ojo. La función de transferencia de este filtro se puede obtener mediante la combinación de las funciones de transferencia de la respuesta de la lámpara incandescente y del filtro de ponderación del flickermetro IEC de la siguiente manera:

$$H(s)_{\text{ojo}} = \frac{H(s)_{\text{lamp-ojo}}}{H(s)_{\text{lamp}}} \quad (3.1)$$

La función de transferencia de la lámpara incandescente se representa mediante un filtro paso-bajo de primer orden de la siguiente forma:

$$H(s)_{\text{lamp}} = \frac{a_0}{s + b_0} \quad (3.2)$$

Los valores de los coeficientes a_0 y b_0 se obtienen ajustando el valor del módulo de la respuesta en frecuencia de la lámpara, $|H(f)_{\text{lamp}}|$, en dos puntos, obtenidos experimentalmente, de la curva de ganancia de una lámpara incandescente normalizada respecto de su valor máximo. Tanto los factores de ganancia experimentales de la lámpara (representada con puntos azules) como la respuesta frecuencial obtenida para la lámpara (en línea azul continua) se muestran en la [Figura 3.10](#). De esta manera, se obtiene la función de transferencia que representa la lámpara incandescente:

$$H(s)_{\text{lamp}} = \frac{55.1465}{s + 54.7874} \quad (3.3)$$

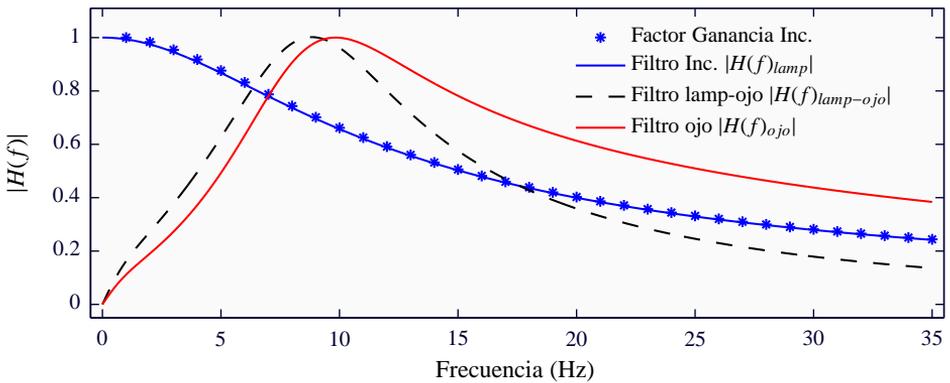


Figura 3.10. Respuesta en frecuencia de los distintos filtros utilizados en la obtención de la respuesta del ojo en el flickermetro de luz.

Finalmente, una vez obtenida la función de transferencia de la lámpara y utilizando la función de transferencia del filtro de ponderación del flickermetro IEC ([Ecuación 3.1](#)) se obtiene la función de transferencia del ojo ([Figura 3.10](#)):

$$H(s)_{\text{ojo}} = \frac{10^{-2}(0.0070s^3 + 0.4851s^2 + 5.5089s)}{(10^{-4}s^3 + 0.0061s^2 + 0.2766s + 1.8128)} \quad (3.4)$$

El bloque C es idéntico al bloque 4 del flickermetro IEC en el que se implementa la respuesta del conjunto ojo-cerebro mediante un multiplicador cuadrático y un filtro paso bajo con constante de tiempo de 300 ms. La salida de este bloque representará, al igual que en el flickermetro IEC, la percepción instantánea de flicker, P_{inst} . Se toma como valor de referencia unidad el valor máximo de la salida de este bloque obtenido mediante la señal de luminosidad que produce la lámpara incandescente cuando se le aplica en su tensión de alimentación una fluctuación sinusoidal de frecuencia 8.8 Hz y amplitud 0.25 %.

Finalmente, el bloque D es el mismo que el implementado como bloque 5 en el flickermetro IEC, en el cual se realiza una integración de la Curva de Probabilidad Acumulada (CPA) de la percepción instantánea de flicker durante un cierto periodo de tiempo con el objetivo de proporcionar un valor de severidad flicker. El funcionamiento online del flickermetro conlleva una pérdida de precisión al ser necesaria la selección previa del rango a clasificar para obtener la CPA. El flickermetro de luz implementado trabaja de manera offline, con lo que el procedimiento estadístico se realiza sobre la señal completa, calculando los percentiles de P_{inst} con la precisión máxima que proporciona el lenguaje de programación Matlab.

Para el diseño de los distintos filtros de los que se compone esta herramienta se han utilizado sistemas de respuesta impulsional infinita (IIR^k) empleando la técnica de transformación bilineal para su implementación en el dominio discreto.

3.2.3 Verificación del sistema de análisis

El sistema de análisis es la herramienta a partir de la cual se sustentan todos los posteriores estudios. Es por ello importante verificar su correcto funcionamiento con el objetivo de definir el rango con el que la medida se realiza de manera precisa. El procedimiento de verificación llevado a cabo evalúa la precisión en dos puntos diferentes del sistema, como se muestra en la [Figura 3.11](#). Por un lado, se verifica la correcta generación de la señal de tensión y, por otro, se evalúa conjuntamente

^k IIR: Infinite Impulse Response.

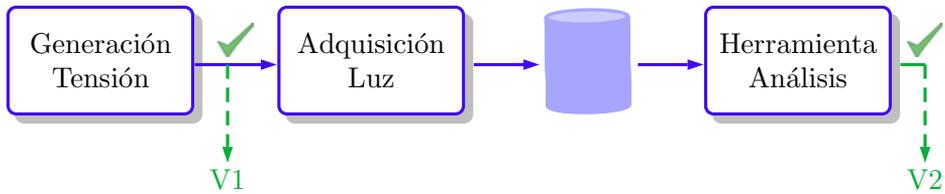


Figura 3.11. Puntos de verificación del sistema de análisis implementado

la correcta adquisición de la señal de luminosidad y la implementación del flickermetro de luz. Para la verificación se han empleado los ensayos recogidos en el estándar IEC 61000-4-15 y descritos en el [Apéndice A](#), utilizados para la validación de una determinada implementación del medidor de flicker.

Verificación de la generación de la tensión (V1)

Para verificar la correcta generación de la señal de tensión se realizan dos pruebas diferentes. En ambas pruebas la lámpara conectada al sistema es la lámpara incandescente. Primero, para una señal de tensión sin fluctuación se verifica el valor nominal de la tensión, así como su frecuencia fundamental a la salida de la etapa de amplificación del sistema de análisis. Después se verifica el nivel de la fluctuación de tensión cuando la tensión de alimentación se encuentra afectada por una modulación AM.

Señal de tensión sin fluctuación. Se genera una señal sinusoidal configurada a $230 V_{ef}$ y 50 Hz. Mediante un multímetro (Tenma 72-7732) se comprueba que a la salida de la etapa de amplificación el valor eficaz de la tensión es de $229.97 V_{ef}$ presentando únicamente un 0.013 % de desviación con respecto a $230 V_{ef}$. Además, la frecuencia de la señal medida es de 49.996 Hz, desviándose un 0.004 % con respecto a 50 Hz.

Señal de tensión con fluctuación. Se generan una serie de fluctuaciones AM en la tensión con valores de amplitud y frecuencia que proporcionan un valor de severidad flicker determinado. A la salida de la etapa de amplificación se comprueba el valor de severidad flicker producido por esa fluctuación mediante el flickermetro IEC. Para ello se utiliza una implementación digital del flickermetro IEC de gran precisión,

clasificada como flickermetro F1 al cumplir con los requerimientos de todos los ensayos que el estándar IEC 61000-4-15 establece para su verificación (los resultados de la verificación del flickermetro IEC se recogen en el [Apéndice A](#) en la [Sección A.2](#)).

Las fluctuaciones de tensión generadas se corresponden con las 7 fluctuaciones rectangulares especificadas en el ensayo 2 del estándar IEC 61000-4-15 (ver [Tabla A.4](#)), de manera que la severidad flicker medida debe ser la unidad con un error máximo del 5%, es decir $P_{st} = 1 \pm 5\%$. La [Tabla 3.3](#) muestra los valores de P_{st} obtenidos y la desviación que presentan con respecto al valor de referencia. En todos los casos esta desviación resultó ser mínima, $Desv \leq 1.2\%$.

f_m (cpm)	$\frac{\Delta V}{V}$ (%)	P_{st}	Desv (%)
1	2.715	1.012	1.2
2	2.191	1.009	0.9
7	1.450	1.007	0.7
39	0.894	1.004	0.4
110	0.722	1.003	0.3
1620	0.407	1.000	0.0
4000	2.343	0.994	0.6

Tabla 3.3. Resultados de la verificación de la señal de tensión de acuerdo a las especificaciones del ensayo 2 del protocolo de verificación del estándar IEC 61000-4-15.

Verificación de la adquisición de luz (V2)

En este punto se realiza la verificación tanto de la etapa de adquisición de la luminosidad del sistema de análisis como de la implementación digital del flickermetro de luz. Durante el proceso de verificación se ha utilizado una lámpara incandescente de 230 V/50 Hz.

El correcto funcionamiento del sistema completo ha sido verificado mediante los ensayos de los que se compone el protocolo de verificación del estándar IEC 61000-4-15 ([Sección A.2](#)), cumpliendo con los requerimientos establecidos por todos ellos. A continuación se muestran los resultados obtenidos para el ensayo 2, mientras que los

resultados del resto de los ensayos se recogen en el [Apéndice A](#) en la [Sección A.3](#).

Se generan las 7 fluctuaciones rectangulares de tensión correspondientes al ensayo 2 cuyas especificaciones se detallan en la [Tabla A.4](#). Se registran las señales de luminosidad de la lámpara incandescente y se evalúa la severidad flicker mediante el flickermetro de luz. En la [Tabla 3.4](#) se muestran los valores de P_{st} obtenidos para cada una de las fluctuaciones rectangulares de tensión y la desviación que presentan respecto al valor de referencia $P_{st} = 1$. Se observa que para todos los puntos de prueba la desviación obtenida es inferior al 1 %, claramente por debajo del límite establecido por el estándar del $\pm 5\%$.

f_m (cpm)	$\frac{\Delta V}{V}$ (%)	P_{st}	Desv (%)
1	2.715	0.991	0.9
2	2.191	0.992	0.8
7	1.450	0.993	0.7
39	0.894	0.994	0.6
110	0.722	0.993	0.7
1620	0.407	1.003	0.3
4000	2.343	1.002	0.2

Tabla 3.4. Resultados de la verificación del sistema completo de acuerdo a las especificaciones del ensayo 2 del protocolo de verificación del estándar IEC 61000-4-15.

4

RESPUESTA DE LAS TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN A LAS FLUCTUACIONES DE TENSIÓN

*Solo el que ensaya lo absurdo es capaz de conquistar
lo imposible.*

— Miguel de Unamuno

El grupo de trabajo C4.108 del CIGRE concluyó que la ausencia de quejas en lugares en los que se registraban niveles altos de flicker era principalmente debida al uso cada vez más frecuente de tecnologías de iluminación distintas de la incandescente. Este grupo de trabajo mostraba los resultados de C_{ai}^8 donde las lámparas eficientes presentaban una menor sensibilidad que la lámpara incandescente a las fluctuaciones de tensión. Sin embargo, la medida de flicker sigue fundamentando su análisis en la respuesta de la lámpara incandescente. En base a estas conclusiones, se asumió que la evolución de las tecnologías de iluminación llevaba implícita una menor sensibilidad a las fluctuaciones de tensión, proponiendo valorar como posible solución la adaptación del medidor de flicker a este nuevo escenario.

El trabajo de seleccionar una nueva lámpara de referencia para la medida del flicker fue impulsado por el grupo de trabajo 77A-WG2 del IEC con la colaboración del grupo C4.111 del CIGRE. El trabajo se estructuró en dos fases diferentes. Por un lado, era necesario caracterizar

la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de un conjunto de lámparas representativo de las tecnologías de iluminación existentes hoy en día en el mercado. Por otro lado, en base al estudio de sensibilidad realizado, se debía escoger la nueva lámpara de referencia y obtener su respuesta frecuencial a las fluctuaciones de tensión. El estudio debía valorar también la linealidad de la respuesta de la lámpara para que se pudiera realizar la adaptación del flickermetro mediante la sustitución de la respuesta en frecuencia del bloque 3.

En este capítulo se detalla el conjunto de experimentos realizados y los resultados aportados al mencionado trabajo. En un primer punto se selecciona la herramienta de análisis a utilizar durante todo el estudio. Se demuestra la deficiencia de la curva de ganancia a la hora de valorar fluctuaciones de luminosidad complejas recomendando, por ello, la utilización del flickermetro de luz como herramienta para el análisis de sensibilidad.

A continuación, se caracteriza la sensibilidad del conjunto de lámparas bajo estudio en relación a la sensibilidad que muestra la lámpara incandescente ante las mismas fluctuaciones de tensión. El análisis se realiza tanto a niveles nominales de iluminación como aplicando distintas condiciones de regulación de la luminosidad en aquellas lámparas que lo permitan. Cabe destacar que por primera vez se lleva a cabo la caracterización de la sensibilidad de las lámparas en condiciones reales, es decir, analizando su respuesta a señales de tensión registradas en distintas localizaciones de la red de suministro. El estudio finaliza con el análisis del comportamiento de las lámparas para distintos niveles de severidad flicker, con el objetivo de estudiar la linealidad del modelo de la lámpara de referencia.

Para cerrar el capítulo se recogen y se resumen las principales conclusiones extraídas de todo el análisis de sensibilidad realizado.

4.1 PROBLEMÁTICA DEL FACTOR DE GANANCIA COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS

El factor de ganancia ha sido la herramienta utilizada tradicionalmente para el análisis de la sensibilidad de las lámparas a las fluctuaciones de tensión. Este factor relaciona las amplitudes relativas de la fluctuación de luminosidad y de tensión para una frecuencia de la fluctuación de tensión, f_m :

$$G(f_m) = \frac{\Delta L/L}{\Delta V/V} . \quad (4.1)$$

El estudio de referencia sobre la sensibilidad de las nuevas tecnologías de iluminación elaborado por Cai⁸ fundamenta su análisis en el cálculo de las curvas de ganancia de las lámparas analizadas.

El primer estudio del trabajo de tesis consistió en el análisis de la sensibilidad de las lámparas mediante la obtención de sus curvas de ganancia. A continuación, se muestran los resultados obtenidos, así como las limitaciones encontradas en la utilización de esta herramienta.

4.1.1 Curvas de ganancia de las lámparas bajo estudio

El objetivo de esta prueba era doble. Por un lado, caracterizar la sensibilidad de cada lámpara en relación a la incandescente, como criterio de selección de una nueva lámpara de referencia. Por otro lado, la obtención de la respuesta frecuencial de la lámpara seleccionada.

De acuerdo a las lámparas descritas en la [Tabla 3.1](#) el conjunto de lámparas utilizado en esta prueba se detalla en la [Tabla 4.1](#). Se sometió cada una de esas lámparas a fluctuaciones simuladas de tensión en base a modulaciones AM sinusoidales con la siguiente forma:

$$u(t) = A_0 \sqrt{2} [1 + g_m(t)] \sin(\omega_0 t) , \quad (4.2)$$

donde $g_m(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot \sin(\omega_m t)$, $A_0 = 230$ V, $\omega_0 = 2\pi \cdot 50$ rad/s y $\omega_m = 2\pi \cdot f_m$ rad/s. Se generaron fluctuaciones de tensión de amplitud relativa $\frac{\Delta V}{V} = 1\%$ y frecuencias, f_m , desde 1 Hz hasta 35 Hz con una resolución de 1 Hz.

Id.	Descripción	Id.	Descripción
I1	Incandescente 60 W (Philips)	C3	CFL 18 W (General Electric)
H1	Halógena 42 W (Lexman)	C4	CFL 12 W (Philips)
F1	LFL 18 W (Sylvania)	C5	CFL 11 W (Megaman)
C1	CFL 11 W (Philips)	L1	LED 12 W (Osram)
C2	CFL 23 W (Lexman)	L2	LED 8 W (Philips)

Tabla 4.1. Conjunto de lámparas sujetas a fluctuaciones simuladas de tensión.

La [Figura 4.1](#) muestra las curvas de ganancia obtenidas para cada una de las lámparas bajo estudio, G_{LBE} , así como las curvas normalizadas con respecto a la curva de ganancia de la lámpara incandescente:

$$G_{LBE}^N = \frac{G_{LBE}}{G_{I1}} . \quad (4.3)$$

De esta manera, valores de ganancia normalizados G_{LBE}^N superiores a la unidad indican una respuesta más sensible que la lámpara incandescente.

De los resultados obtenidos se pueden deducir tres tipos de comportamientos distintos. En primer lugar, la lámpara halógena (H1) presenta una sensibilidad a las fluctuaciones sinusoidales de tensión muy similar a la de la incandescente, lo cual resulta lógico al presentar ambas lámparas principios de funcionamiento muy similares. Por otro lado, se pueden distinguir lámparas CFL y LED (C1, C2, C5, L1 y L2) que muestran un comportamiento claramente menos sensible que la lámpara incandescente en todo el rango frecuencial analizado. Por último, otras lámparas (C3, C4 y F1) presentan un comportamiento más sensible que la incandescente para determinadas frecuencias de la fluctuación de la tensión. La sensibilidad de C3 y F1 crece con respecto a la incandescente a medida que aumenta la frecuencia f_m , llegando a ser claramente más sensibles para $f_m > 25$ Hz. Por el contrario, la lámpara C4 es más sensible que la incandescente para fluctuaciones de baja frecuencia, $f_m < 5$ Hz.

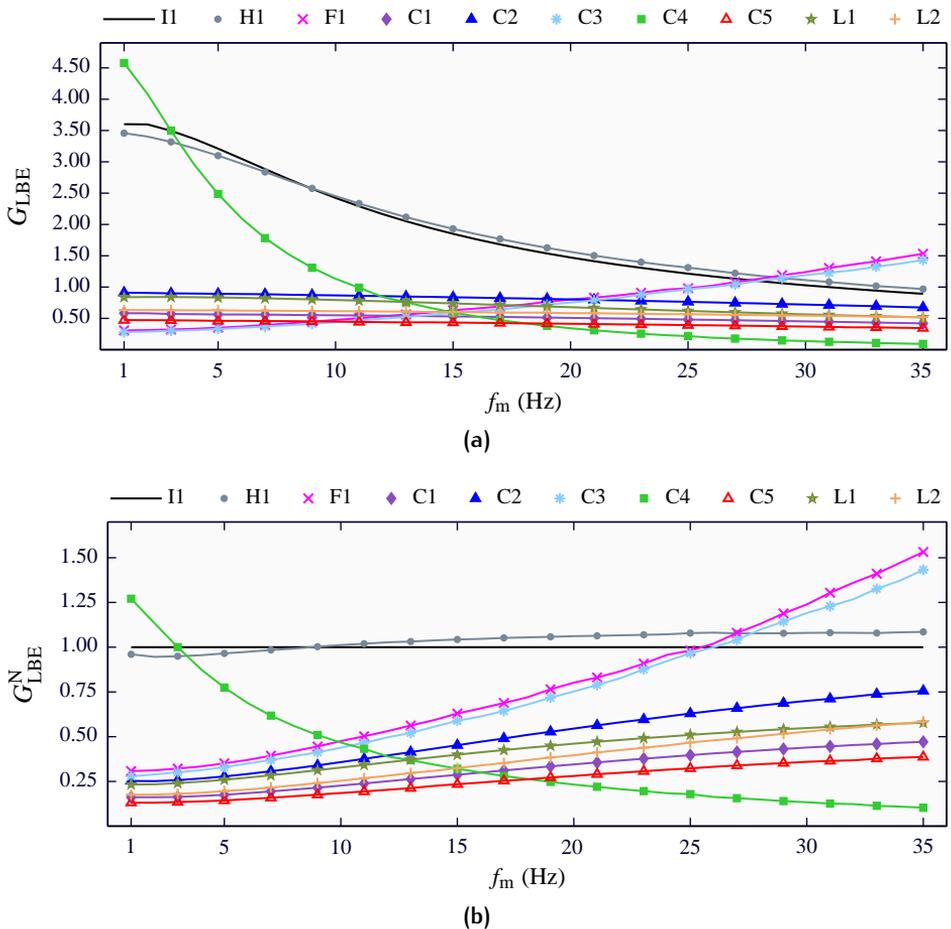


Figura 4.1. (a) Curvas de ganancia de las lámparas bajo estudio; (b) Curvas de ganancia de las lámparas bajo estudio normalizadas con respecto a la curva de ganancia de la incandescente.

4.1.2 Limitaciones del factor de ganancia

El cálculo del factor de ganancia asume que la fluctuación de luminosidad de la lámpara se concentra en torno a la frecuencia de la fluctuación de tensión, f_m . Es decir, mediante el análisis espectral de la luminosidad, la amplitud de la fluctuación de luminosidad queda definida por la amplitud de la componente frecuencial f_m . Esto es así para el caso de la lámpara incandescente o lámparas con principios de funcionamiento similares a ésta. Sin embargo, las características

constructivas de otras tecnologías de iluminación pueden dar lugar a componentes frecuenciales dentro del rango de percepción del flicker (0-35 Hz) que pasan inadvertidas para el factor de ganancia.

Como ejemplo representativo, la [Figura 4.2](#) muestra el espectro obtenido mediante el cálculo de la DFT de la envolvente de luminosidad de algunas de las lámparas analizadas, sujetas a una fluctuación sinusoidal de tensión con $f_m = 27$ Hz según la [Ecuación 4.2](#). Se representan los valores de $\frac{\Delta L}{L}$ obtenidos para las lámparas incandescente (I1) y CFL (C4), normalizados respecto al valor de la componente de la fluctuación f_m . Se puede observar que la luminosidad en la lámpara incandescente (I1) se encuentra concentrada alrededor de la componente de 27 Hz, mientras que el espectro de la luminosidad de la lámpara CFL (C4) se dispersa alrededor de otras bandas de frecuencia. En este caso el factor de ganancia no refleja todas las variaciones de luminosidad que presenta la lámpara CFL (C4) en la banda que afecta al flicker.

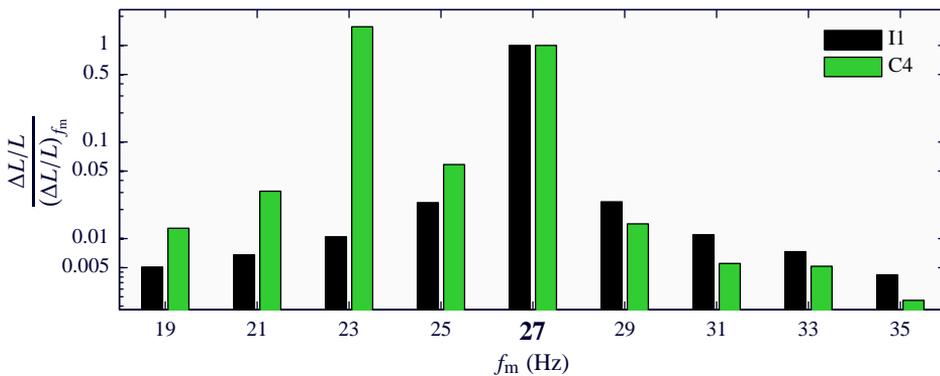


Figura 4.2. Espectro de la luminosidad (en escala logarítmica) de las lámpara I1 y C4 sujetas a una fluctuación AM sinusoidal de tensión con $f_m = 27$ Hz.

Más aún, las características frecuenciales de estas lámparas pueden dificultar la identificación de la amplitud de la fluctuación de luminosidad, $\frac{\Delta L}{L}$, en el cálculo del factor de ganancia ante fluctuaciones de tensión más complejas como pueden ser las fluctuaciones rectangulares, idealmente no acotadas en banda. Tomando como ejemplo una fluctuación rectangular de tensión de frecuencia $f_m = 27$ Hz, la [Figura 4.3](#) representa las formas de onda de la fluctuación de luminosidad de las lámparas incandescente (I1) y CFL (C4). Para el caso de la lámpara incandescente

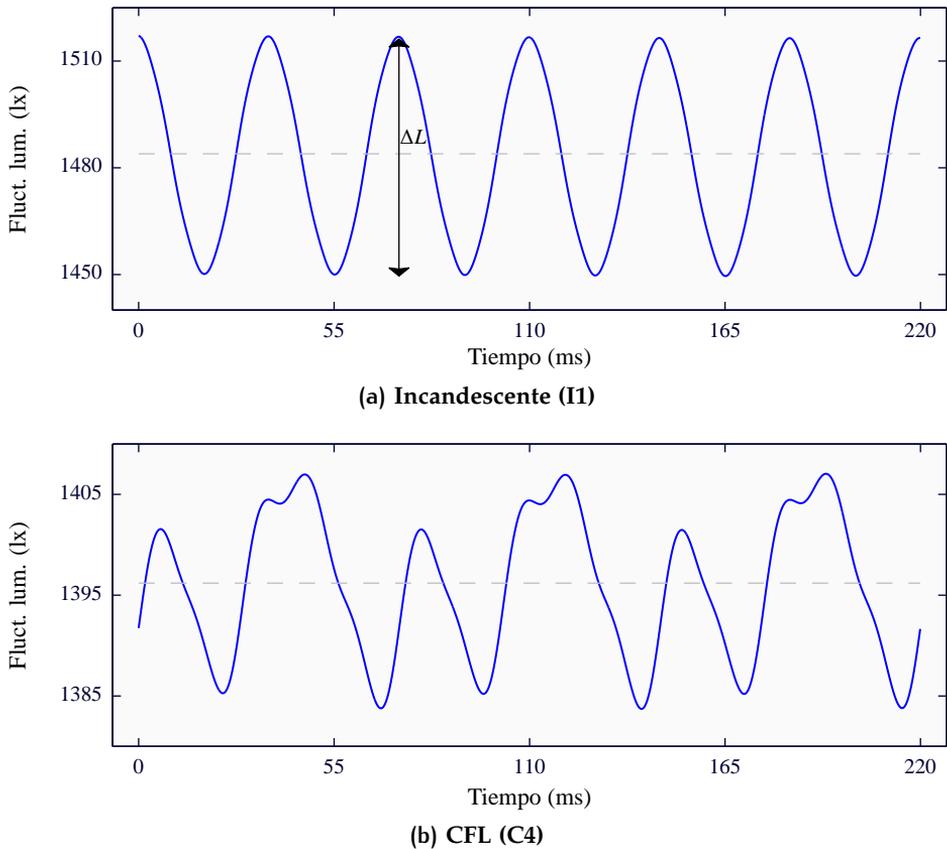


Figura 4.3. Fluctuación de luminosidad producida por una fluctuación rectangular de $f_m = 27$ Hz en la tensión de alimentación de las lámparas I1 y C4.

(Figura 4.3a), la fluctuación de luminosidad consiste principalmente en una componente frecuencial, f_m , facilitando la detección de la amplitud relativa ΔL . Sin embargo, se observa que la forma de onda de la fluctuación de luminosidad que presenta la CFL (C4) proviene de la combinación de varias componentes frecuenciales (Figura 4.3b). El cálculo del factor de ganancia se centra únicamente en la componente f_m y, por tanto, no refleja la verdadera variación relativa de la fluctuación de luminosidad.

Ante esta limitación, resulta conveniente analizar la sensibilidad de las lámparas considerando todas aquellas componentes frecuenciales de la señal de luminosidad en la banda de 0–35 Hz. Para ello, en lugar de

utilizar el factor de ganancia se ha empleado el flickermetro de luz, que considera en su procesado un ancho de banda de 35 Hz, incluyendo de forma ponderada todas las componentes espectrales pertenecientes a ese rango.

4.2 SENSIBILIDAD EN RELACIÓN A LA INCANDESCENTE

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la comparación entre la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de las lámparas bajo estudio y de la incandescente. La respuesta de las lámparas se analiza en un entorno controlado, utilizando fluctuaciones simuladas de tensión producidas tanto por modulaciones AM como por componentes interarmónicas. Para aquellas lámparas con posibilidad de regulación, el análisis de su sensibilidad se realiza también bajo distintos niveles de luminosidad. Con el objetivo de contrastar los resultados de sensibilidad obtenidos, el estudio se completa mediante una serie de pruebas subjetivas realizadas para valorar la percepción de molestia producida por las distintas lámparas analizadas. Los resultados del estudio se presentan en términos de severidad flicker al utilizar como herramienta de análisis la implementación digital del flickermetro de luz descrita en la [Subsección 3.2.2](#).

4.2.1 Fluctuaciones de tensión provocadas por modulaciones AM

Para esta prueba se han generado fluctuaciones simuladas de tensión de acuerdo a la [Ecuación 4.2](#), provocadas tanto por modulaciones AM sinusoidales, $g_m(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot \sin(w_m t)$, como por modulaciones AM rectangulares, $g_m(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot \text{signum}(\sin(w_m t))$. Se utilizaron frecuencias f_m desde 1 Hz hasta 35 Hz con una resolución de 1 Hz, con amplitudes relativas de la fluctuación de tensión que generan un valor de $P_{st} = 1$ en una lámpara incandescente, $\frac{\Delta V}{V} \Big|_{P_{st}^{IEC}=1}$. Estos valores se obtuvieron mediante la implementación digital del flickermetro IEC cuya verificación se recoge en el [Apéndice A](#) en la [Sección A.2](#). La

Figura 4.4 representa los valores de $\frac{\Delta V}{V} \Big|_{P_{st}^{IEC}=1}$ obtenidos tanto con fluctuaciones de tensión sinusoidales como rectangulares.

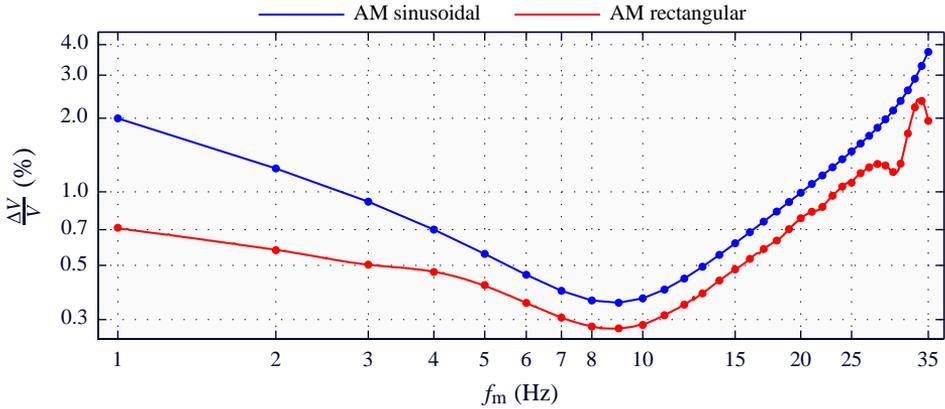


Figura 4.4. Curva $P_{st} = 1$ para fluctuaciones de tensión sinusoidales y rectangulares obtenida mediante el flickermetro IEC implementado según la descripción de la [Subsección 1.1.2](#).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tanto en condiciones nominales de iluminación como aplicando distintas condiciones de regulación de la luminosidad.

Estudio a niveles nominales de iluminación

El conjunto de lámparas analizadas en esta prueba es el representado en la [Tabla 4.1](#). A dichas lámparas se les han aplicado tanto fluctuaciones sinusoidales como rectangulares de tensión de amplitudes relativas representadas en la [Figura 4.4](#). La [Figura 4.5](#) muestra los valores de P_{st} obtenidos mediante el flickermetro de luz para cada una de las lámparas bajo estudio, P_{st}^{LBE} , normalizados respecto a los valores obtenidos con la lámpara incandescente, P_{st}^{II} :

$$P_{st}^N = \frac{P_{st}^{LBE}}{P_{st}^{II}} \quad (4.4)$$

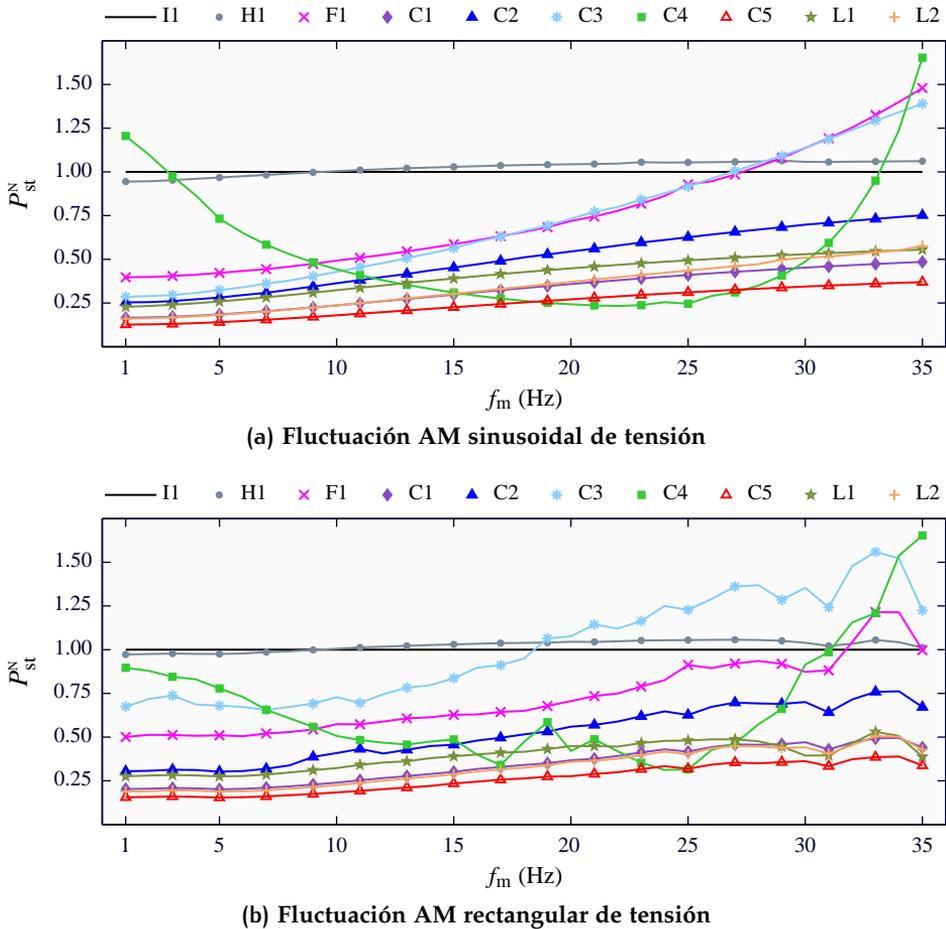


Figura 4.5. Valores de P_{st} de las lámparas bajo estudio normalizados respecto a los valores de la lámpara incandescente para fluctuaciones de tensión provocadas por modulaciones AM sinusoidales y rectangulares.

Del análisis de estos resultados se pueden deducir diferentes comportamientos. Por un lado, si se comparan los resultados obtenidos mediante el factor de ganancia (Figura 4.1b) y el flickermetro de luz (Figura 4.5a) ante fluctuaciones sinusoidales de tensión, se observan diferencias en el comportamiento de la lámpara C4. Precisamente esta lámpara es la que, en la sección anterior, presentaba componentes adicionales a la componente f_m en el espectro de su luminosidad. Comparando ambas gráficas se puede observar que para $f_m > 25$ Hz su sensibilidad se incrementa significativamente con respecto a lo obtenido

mediante su curva de ganancia, superando incluso la sensibilidad de la incandescente. Estos resultados corroboran el uso del flickermetro de luz, y no el cálculo del factor de ganancia, para el estudio de sensibilidad de aquellas lámparas cuya respuesta genera componentes frecuenciales en su luminosidad diferentes a la frecuencia de fluctuación f_m .

Por otro lado, en la [Figura 4.5](#) se observa que tanto para fluctuaciones sinusoidales como para rectangulares, la lámpara halógena (H1) presenta una respuesta muy similar a la lámpara incandescente (I1). Las lámparas C1, C2, C5, L1 y L2 presentan una sensibilidad inferior a la incandescente en todo el rango de frecuencias mientras que las lámparas F1, C3 y C4 se comportan claramente de manera más sensible que la incandescente para determinados rangos frecuenciales. Sin embargo, los rangos frecuenciales de mayor sensibilidad de estas tres últimas lámparas difieren en cuanto al tipo de fluctuación de tensión aplicado, sinusoidal o rectangular. En concreto, la lámpara C3 muestra una sensibilidad mayor que la incandescente para $f_m > 27$ Hz para el caso de fluctuaciones sinusoidales y $f_m > 17$ Hz con rectangulares. La lámpara C4, que con fluctuaciones sinusoidales presenta una sensibilidad mayor que la incandescente a frecuencias bajas ($f_m < 2$ Hz), muestra una sensibilidad menor con fluctuaciones rectangulares en el mismo rango frecuencial, y supera a la incandescente para $f_m > 32$ Hz tanto con fluctuaciones sinusoidales como rectangulares. La sensibilidad de la lámpara F1 se incrementa con f_m superando a la incandescente a partir de 27 Hz con fluctuaciones sinusoidales mientras que a estas altas frecuencias pierde sensibilidad para el caso de las rectangulares.

De los resultados obtenidos en esta primera prueba se puede concluir que no es evidente la menor sensibilidad de las nuevas tecnologías de iluminación a las fluctuaciones de tensión con respecto a la incandescente. Dependiendo de la frecuencia y la complejidad de la fluctuación de tensión, la sensibilidad de algunas lámparas llega a superar los niveles establecidos para la lámpara incandescente.

Estudio con regulación de la luminosidad

Dentro del conjunto de lámparas especificado en la [Tabla 3.1](#) existen algunas con una característica añadida: la posibilidad de regular el nivel

de luminosidad. Para ello es necesaria la utilización de un elemento adicional, el regulador de luz. Tal y como se ha detallado en el [Capítulo 3](#), se ha utilizado un regulador de corte de fase ascendente (LE) para las pruebas destinadas a caracterizar la sensibilidad de las lámparas regulables en diferentes condiciones de luminosidad.

El conjunto de lámparas analizadas en esta prueba se detalla en la [Tabla 4.2](#). El análisis se ha realizado comparando la sensibilidad de las lámparas en distintas condiciones de regulación de la luminosidad con la sensibilidad de la lámpara incandescente para su nivel nominal de luminosidad.

Id.	Descripción
I1	Incandescente 60 W (Philips)
C4	CFL 12 W (Philips)
C5	CFL 11 W (Megaman)
L2	LED 8 W (Philips)

Tabla 4.2. Conjunto de lámparas sujetas a fluctuaciones simuladas de tensión en condiciones de regulación de luminosidad.

Para la realización de esta prueba se definieron tres niveles de regulación distintos en términos del porcentaje de luminosidad deseado. Para ello, una vez las lámparas alcanzaban su nivel máximo de luminosidad, el regulador de luz se configuraba para establecer las siguientes condiciones de luminosidad en cada una de las lámparas; al 75 %, 50 % y 15 % de la luminosidad.

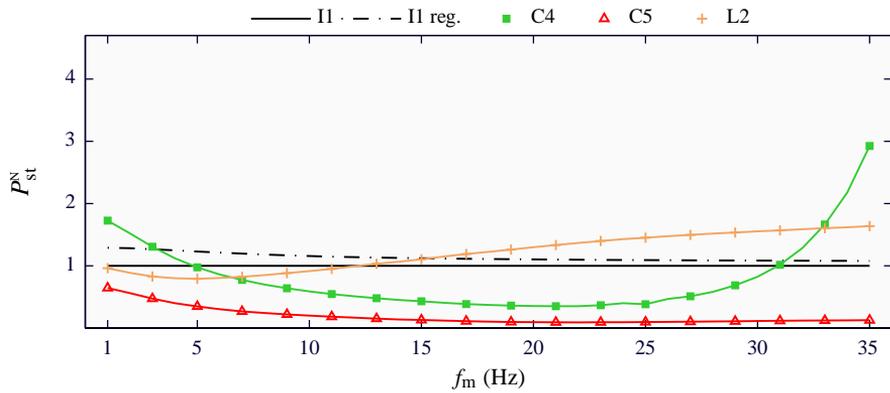
Se ha analizado la sensibilidad de las lámparas a fluctuaciones simuladas de tensión, tanto sinusoidales como rectangulares, según la [Ecuación 4.2](#), para frecuencias desde 1 Hz hasta 35 Hz con una resolución de 1 Hz y amplitudes que producen un nivel de $P_{st} = 1$ en una lámpara incandescente, $\frac{\Delta V}{V} \Big|_{P_{st}=1}$ ([Figura 4.4](#)).

La [Figura 4.6](#) y la [Figura 4.7](#) muestran, para el caso de fluctuaciones de tensión sinusoidales y rectangulares respectivamente, los valores de P_{st}^N obtenidos para las lámparas regulables en cada una de las condiciones de regulación aplicadas. Se trata de valores de severidad flicker normalizados con respecto a los valores de P_{st} de la lámpara

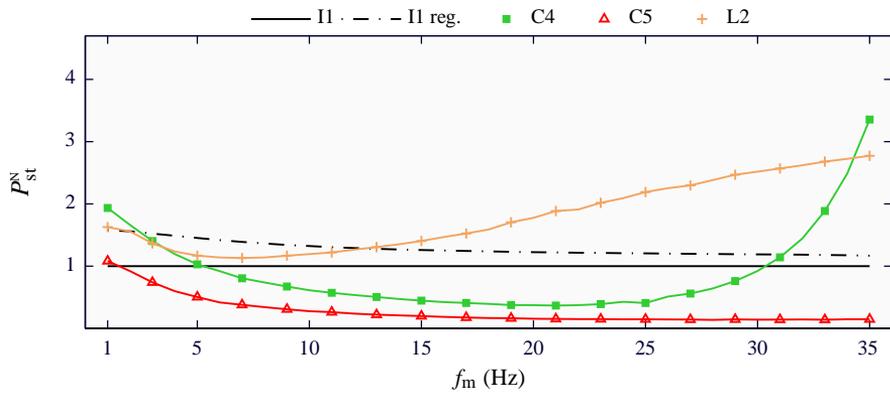
incandescente en su nivel nominal de luminosidad según la [Ecuación 4.4](#). Se puede observar que en función del nivel de luminosidad obtenido mediante el regulador de luz, la sensibilidad que presentan las lámparas regulables varía.

En concreto, la lámpara L2 que al utilizarla sin aplicar ningún tipo de regulación ([Figura 4.5](#)) presentaba una sensibilidad claramente inferior a la lámpara incandescente en todo el rango de frecuencias, ve incrementada su sensibilidad en todos los niveles de luminosidad aplicados, tanto para fluctuaciones sinusoidales como rectangulares. Esta lámpara iguala e incluso supera la sensibilidad de la incandescente en niveles de luminosidad altos (regulación al 75%), para $f_m > 13$ Hz en el caso de fluctuaciones sinusoidales ([Figura 4.6a](#)) y para $f_m > 15$ Hz para rectangulares ([Figura 4.7a](#)). Su sensibilidad se va incrementando a medida que la luminosidad decrece, presentando para una regulación del 15%, una sensibilidad claramente superior a la incandescente tanto en condiciones nominales de luminosidad como bajo regulación, en todo el rango de frecuencias ([Figuras 4.6c](#) y [4.7c](#)). La lámpara C5 también incrementa su sensibilidad a medida que el nivel de luminosidad es menor. En el nivel más bajo (regulación al 15%), la sensibilidad de C5 iguala e incluso supera a la incandescente para $f_m < 15$ Hz y $f_m > 27$ Hz en el caso de sinusoidales ([Figura 4.6c](#)) y en todo el rango de frecuencias para el caso de rectangulares ([Figura 4.7c](#)). Por otro lado, la lámpara C4 muestra un comportamiento distinto. Al utilizarla en niveles de luminosidad alto y medio (regulación al 75% y al 50%), esta lámpara presenta un ligero incremento de su sensibilidad con respecto a la incandescente para $f_m < 5$ Hz y $f_m > 30$ Hz, respecto de su respuesta obtenida sin aplicar ninguna regulación ([Figura 4.5](#)). Sin embargo, a bajos niveles de luminosidad (regulación al 15%) su sensibilidad decrece significativamente, presentando un comportamiento mucho menos sensible que la lámpara incandescente independientemente del tipo de fluctuación de tensión aplicado.

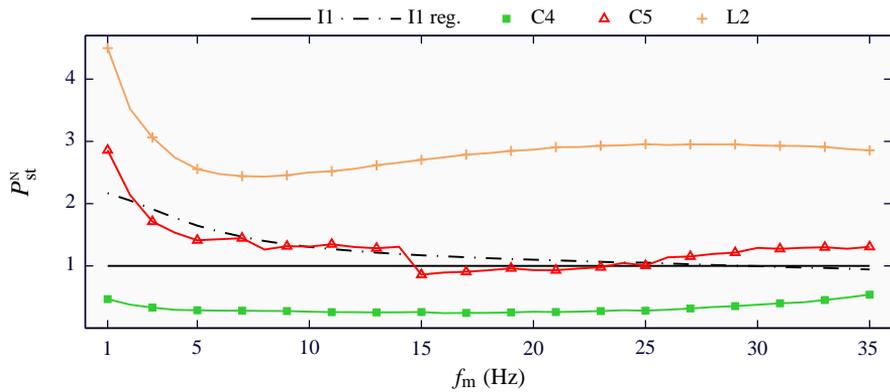
Se ha podido comprobar que en condiciones de regulación, y principalmente para niveles de luminosidad bajos, la sensibilidad de algunas lámparas regulables puede incrementarse notablemente, llegando a superar ampliamente los niveles de la lámpara incandescente sin regulación.



(a) Regulación al 75 %

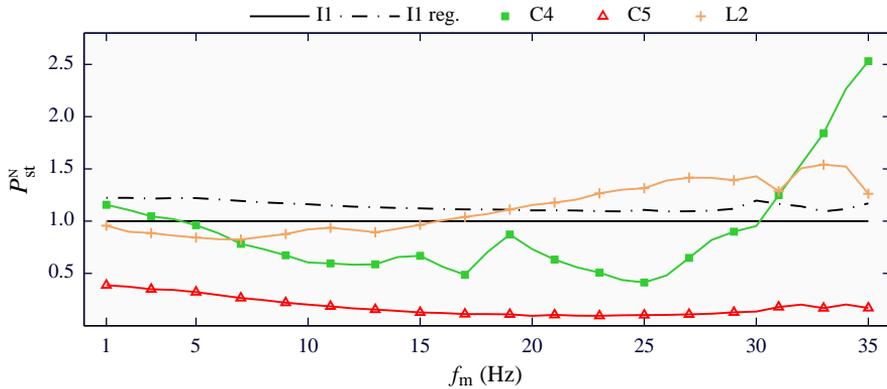


(b) Regulación al 50 %

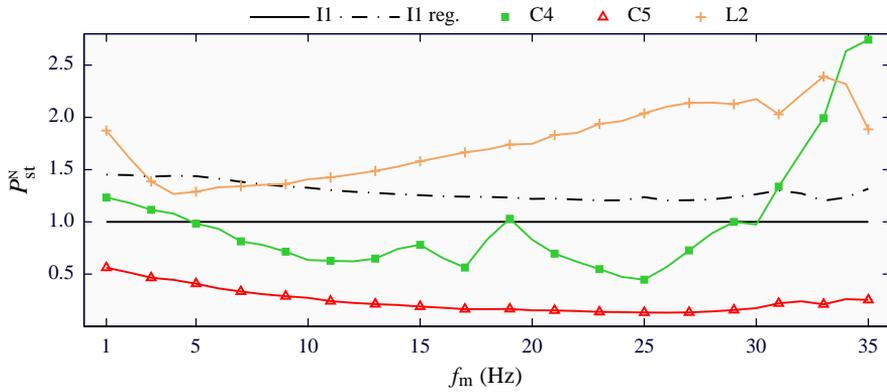


(c) Regulación al 15 %

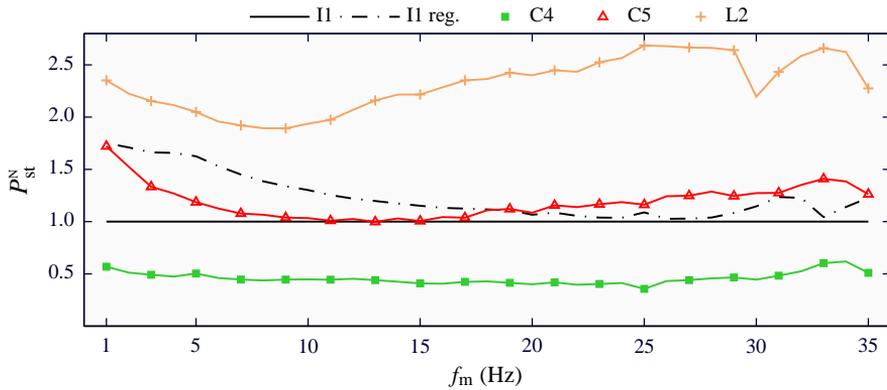
Figura 4.6. Valores de P_{st} de las lámparas para fluctuaciones de tensión sinusoidales en diferentes condiciones de regulación de la luminosidad, normalizados respecto a los valores de la lámpara incandescente en su nivel nominal de luminosidad.



(a) Regulación al 75 %



(b) Regulación al 50 %



(c) Regulación al 15 %

Figura 4.7. Valores de P_{st} de las lámparas para fluctuaciones de tensión rectangulares en diferentes condiciones de regulación de la luminosidad, normalizados respecto a los valores de la lámpara incandescente en su nivel nominal de luminosidad.

4.2.2 Fluctuaciones de tensión provocadas por interarmónicos

La lámpara incandescente es inmune a las fluctuaciones de tensión provocadas por interarmónicos superiores a $2 \cdot f_0$. Sin embargo, otras tecnologías de iluminación tienen principios de funcionamiento que las hacen sensibles a este tipo de perturbaciones. En este ensayo se analizó la sensibilidad de las lámparas a las fluctuaciones de tensión provocadas por interarmónicos en su tensión de alimentación. En concreto, cuando la señal de tensión se ve afectada por un único interarmónico se puede expresar de la siguiente manera:

$$u(t) = A_0 \sqrt{2} [\sin(\omega_0 t) + m \cdot \sin(\omega_{ih} t)] , \quad (4.5)$$

donde $A_0 = 230$ V, $\omega_0 = 2\pi \cdot 50$ rad/s, $\omega_{ih} = 2\pi \cdot f_{ih}$ rad/s, siendo f_{ih} la frecuencia del interarmónico y m es la amplitud relativa del interarmónico.

La presencia de una única componente interarmónica en la señal de tensión provoca una fluctuación en su amplitud de la siguiente frecuencia:

$$f_{\text{fluct.}} = |f_{ih} - f_h| , \quad (4.6)$$

donde f_h es la frecuencia armónica más cercana al interarmónico f_{ih} .

La [Figura 4.8a](#) muestra las formas de onda de la tensión cuando ésta se encuentra afectada por una modulación sinusoidal AM de $f_m = 10$ Hz, por un interarmónico $f_{ih} = 110$ Hz, cercano al armónico par $f_h = 100$ Hz, y por un interarmónico $f_{ih} = 160$ Hz, cercano al armónico impar $f_h = 150$ Hz. La amplitud relativa de la señal moduladora y de ambos interarmónicos es del 10%. Se puede observar que la amplitud de la tensión en los tres casos fluctúa a una frecuencia de 10 Hz. Para el caso de los interarmónicos, se pueden apreciar diferencias en la forma de onda dependiendo de si el interarmónico se encuentra cerca de un armónico par o de uno impar. En concreto, si f_{ih} se encuentra cercano a un f_h par ($f_{ih} = 110$ Hz, $f_h = 100$ Hz), la envolvente de la señal crece o decrece simultáneamente en los máximos relativos positivos y negativos. En el caso de encontrarse cercano a un f_h impar ($f_{ih} = 160$ Hz, $f_h = 150$ Hz), la envolvente fluctúa de manera similar a una fluctuación AM sinusoidal, aunque con cierta asimetría en el ciclo de trabajo de la fluctuación⁸¹.

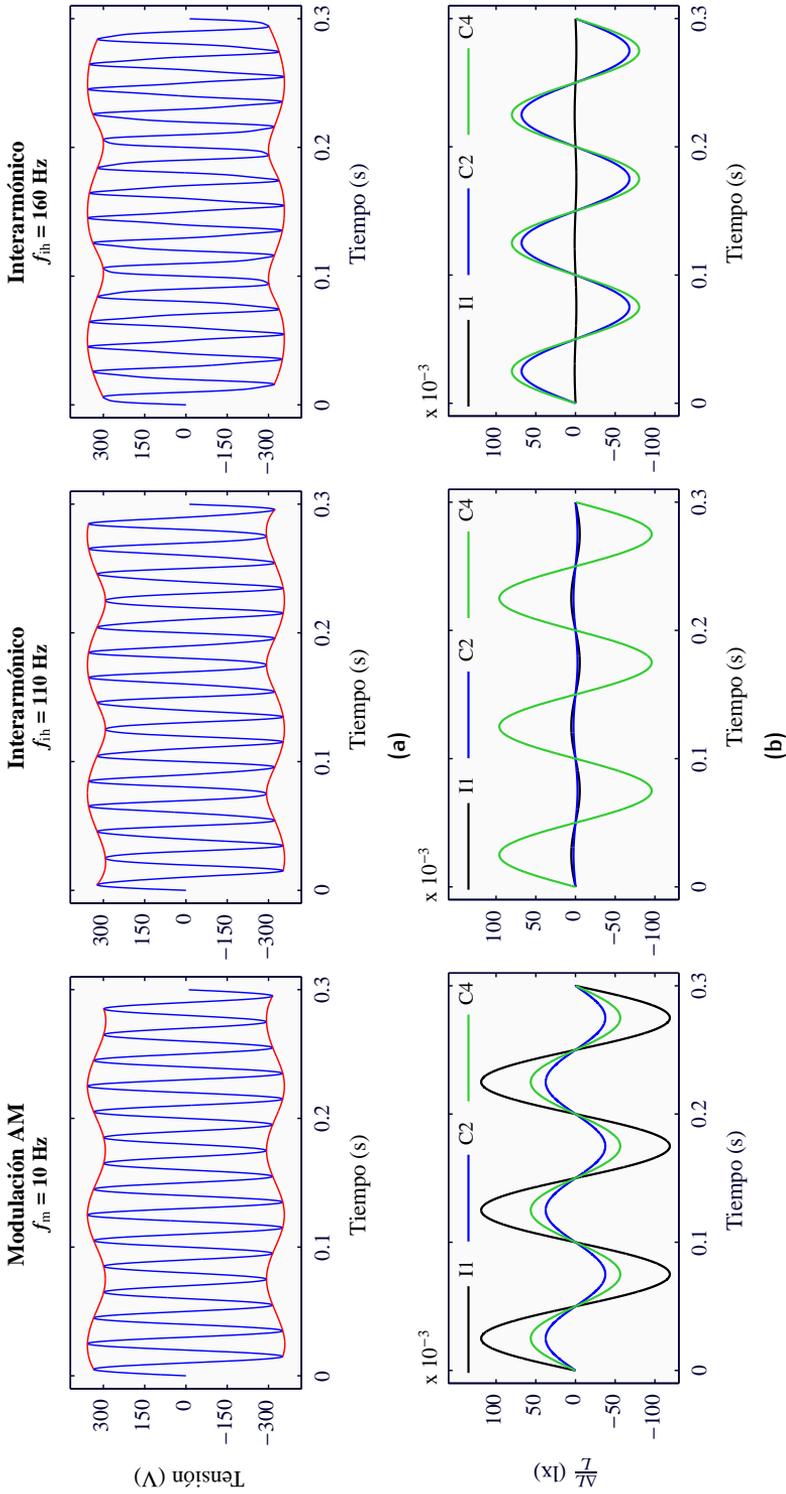


Figura 4.8. Comparativa en el comportamiento de 3 lámparas ante una señal de tensión afectada por una modulación sinusoidal, un interarmónico cercano a un armónico par y un interarmónico cercano a un armónico impar. (a) Formas de onda de la tensión; (b) Fluctuación de la luminosidad de 3 lámparas.

A pesar de la aparente similitud entre las formas de onda de los tres tipos de fluctuaciones de tensión, la fluctuación de luminosidad producida por las distintas tecnologías de iluminación puede presentar grandes diferencias. La [Figura 4.8b](#) presenta la variación relativa de la luminosidad, $\frac{\Delta L}{L}$, detectada en la lámpara incandescente (I1), y dos CFL (C2 y C4) ante los tres tipos de fluctuación de tensión. Por un lado, se observa que efectivamente en aquellos casos en los que la luminosidad de las lámparas fluctúa de manera apreciable, ésta lo hace a una frecuencia igual a 10 Hz en todos los casos. Por otro lado, se comprueba que la fluctuación de luminosidad para I1 es prácticamente nula cuando la fluctuación de la tensión está provocada por la presencia de interarmónicos, tanto para el caso de $f_{ih} = 110$ Hz como para $f_{ih} = 160$ Hz. Por último, se observa que las CFL pueden responder de diferente manera dependiendo de la frecuencia del interarmónico. En concreto, la lámpara C2 presenta fluctuaciones en su luminosidad cuando el interarmónico se encuentra cercano a un armónico impar, $f_{ih} = 160$ Hz, mientras que su luminosidad prácticamente no fluctúa en caso de que el interarmónico se encuentre cercano a un armónico par, $f_{ih} = 110$ Hz. En cambio, la lámpara C4 es sensible tanto a interarmónicos cercanos a armónicos pares como impares.

Para estudiar la respuesta de las lámparas a las fluctuaciones de tensión provocadas por interarmónicos se generó una señal de tensión siguiendo la [Ecuación 4.5](#). La frecuencia del interarmónico, f_{ih} , variaba desde 1 Hz hasta 250 Hz con una resolución de 1 Hz y con una amplitud relativa $m = 1\%$ para todas las frecuencias.

La [Figura 4.9](#) muestra los valores de P_{st} obtenidos para cada frecuencia f_{ih} en cada una de las lámparas bajo estudio especificadas en la [Tabla 4.1](#). Para facilitar la lectura de los resultados, la representación de los valores de P_{st} de las diez lámparas se divide en las tres gráficas de las que se compone la [Figura 4.9](#). En este caso, a la hora de mostrar los resultados, no se representan los valores de severidad flicker de las lámparas normalizados con respecto a la respuesta de la lámpara incandescente debido a la propia inmunidad que presenta ésta a frecuencias interarmónicas superiores a $2 \cdot f_0$. Se observa que para frecuencias interarmónicas menores a 100 Hz, es la lámpara incandescente (I1) la que muestra una sensibilidad mayor sobre el resto de las lámparas, para prácticamente todo el rango de frecuencias,

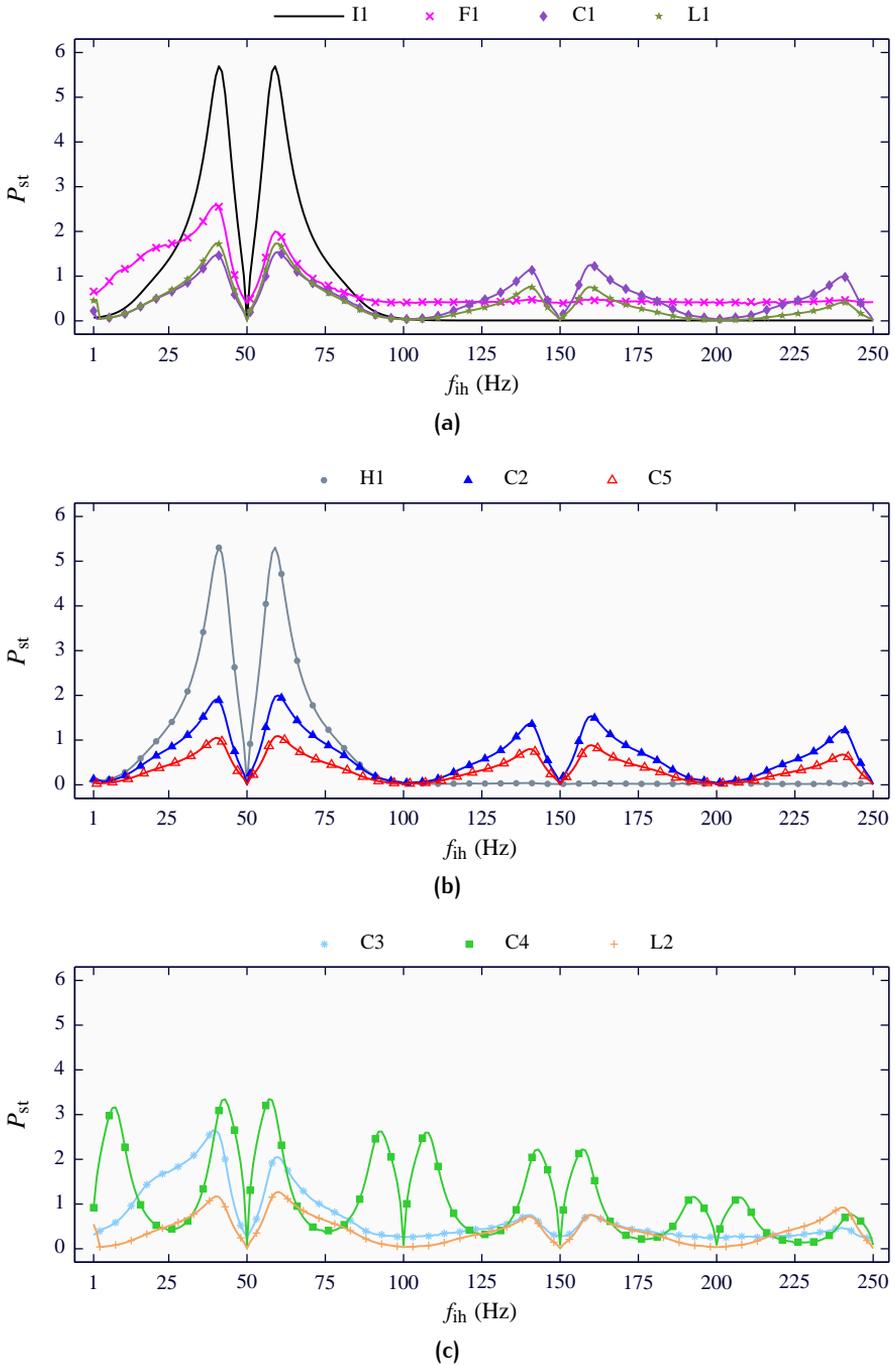


Figura 4.9. Valores de P_{st} de las lámparas bajo estudio para fluctuaciones de tensión provocadas por la presencia de un interarmónico de frecuencia f_{ih} .

excepto para $f_{ih} < 25$ Hz donde las lámparas F1, C3 y C4 superan a la sensibilidad de I1. Este comportamiento es comparable con el obtenido para una modulación sinusoidal AM (Figura 4.5a) en la que la frecuencia de la fluctuación se corresponde con $f_m = 50 - f_{ih}$. Es decir, para una $f_m > 25$ Hz en la Figura 4.5a y para una $f_{ih} < 25$ Hz en la Figura 4.9, las lámparas F1, C3 y C4 incrementan su sensibilidad a niveles superiores a los de I1. Sin embargo, para frecuencias interarmónicas superiores a 100 Hz, tanto la lámpara incandescente (I1) como la halógena (H1) presentan valores de P_{st} nulos, a diferencia de las demás lámparas, que sí se ven afectadas en mayor o menor medida por la fluctuación de tensión que introducen las componentes interarmónicas. En particular, la lámpara F1 presenta una sensibilidad prácticamente constante independientemente de la frecuencia del interarmónico. En cambio, las lámparas C1, C2, C3, C5, L1 y L2 presentan una mayor sensibilidad para interarmónicos cercanos a armónicos impares de la componente fundamental, mientras que la lámpara C4 destaca por ser la más sensible entre todas las lámparas analizadas, con máximos de sensibilidad en los interarmónicos cercanos tanto a armónicos pares como impares.

Los resultados obtenidos en esta prueba confirman que, a diferencia de las lámparas de filamento como la incandescente o halógena, otras tecnologías de iluminación pueden ser sensibles a fluctuaciones de tensión provocadas por la presencia de interarmónicos superiores a 100 Hz. Además, se ha podido observar que dicha sensibilidad depende de si el valor del interarmónico se encuentra cercano a un armónico par o impar. Este hecho afecta de manera diferente a unas lámparas que a otras.

4.2.3 Valoración subjetiva de la sensibilidad

Además de analizar la sensibilidad de las lámparas por medio de herramientas que proporcionen una medida objetiva, parece acertado contrastar estos resultados con la verdadera molestia que experimentarían las personas expuestas a la luminosidad de las lámparas. Con este objetivo, se realizó una valoración subjetiva de la fluctuación de luminosidad producida por algunas de las lámparas bajo

estudio ante fluctuaciones sinusoidales de tensión. El procedimiento de la prueba consistía en la comparación visual simultánea de la fluctuación de luminosidad producida por la lámpara incandescente (I1) y por una de las lámparas bajo estudio. En concreto las lámparas analizadas se especifican en la [Tabla 4.3](#).

Id.	Descripción	Id.	Descripción
I1	Incandescente 60 W (Philips)	C3	CFL 18 W (General Electric)
H1	Halógena 42 W (Lexman)	C4	CFL 12 W (Philips)
F1	LFL 18 W (Sylvania)	L1	LED 12 W (Osram)
C1	CFL 11 W (Philips)	L2	LED 8 W (Philips)

Tabla 4.3. Conjunto de lámparas utilizadas durante las pruebas subjetivas.

Para llevar a cabo estas pruebas se diseñó un espacio físico que permitía a un observador comparar de forma ágil la luminosidad de dos lámparas simultáneamente. Para ello, el entorno habilitado consistió en dos ambientes similares asignados a cada una de las lámparas y separados por una cortina opaca de manera que la luz procedente de uno de ellos no interfiriese en la percepción experimentada en el otro ([Figura 4.10](#)). En uno de los ambientes se encontraba permanentemente conectada la lámpara incandescente y en el otro la lámpara bajo estudio.

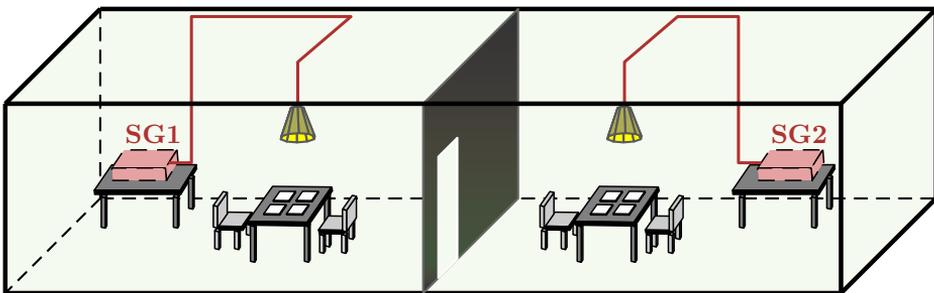


Figura 4.10. Esquema del entorno habilitado para las pruebas subjetivas.

Las características generales del entorno y del procedimiento llevado a cabo durante las pruebas son las siguientes:

1. Se emplearon dos sistemas de generación de la tensión de alimentación de las dos lámparas. Estos sistemas son iguales al

utilizado para la generación de la tensión en el sistema descrito en la [Subsección 3.2.1](#) (ver [Figura 3.6](#)).

- El sistema de generación de tensión que alimentaba a la lámpara bajo estudio se conectaba a un conmutador de manera que cuando la lámpara no estaba siendo sometida a ninguna prueba, ésta seguía estando alimentada a través de la tensión de red. De esta forma no hacía falta emplear tiempo de calentamiento en aquellas lámparas que lo necesitaran para poder alcanzar su nivel máximo de luminosidad.
 - Se generaban fluctuaciones de tensión correspondientes a modulaciones sinusoidales con valores de frecuencia y amplitud relativa de la fluctuación para producir una determinada variación en la luminosidad de la lámpara.
2. Las lámparas se situaban sobre un difusor de manera que produjeran una iluminación promedio de unos 125 lx sobre la mesa en la que se situaban los participantes mientras desarrollaban una actividad de lectura. Estas condiciones de luminosidad eran las mismas que se emplearon en la caracterización de la curva de umbral de molestia $P_{st} = 1$, definida en el estándar IEC-555-3^{19,48}.
 3. En el estudio participaron 10 personas. Como el objetivo de esta prueba no era obtener una base estadística de la percepción visual de las personas ante estas lámparas sino contrastar la percepción subjetiva con los resultados obtenidos experimentalmente en los estudios objetivos anteriores, no era necesario un número elevado de personas.
 4. Las pruebas se realizaron en grupos de tres y cuatro personas. Cada prueba duraba 1 min, tiempo en el cual los participantes podían moverse libremente entre ambos ambientes con el fin de comparar simultáneamente la fluctuación de luminosidad en ambas lámparas.
 5. Durante cada prueba, en una estancia estaba conectada la lámpara incandescente y en la otra la lámpara bajo estudio. Las personas participantes en la prueba debían valorar si la fluctuación de luminosidad procedente de la lámpara bajo estudio

resultaba mayor, menor o igual que la procedente de la lámpara incandescente.

Para esta prueba se generaron las fluctuaciones sinusoidales de tensión que producen el mismo nivel de P_{st} en cada una de las lámparas a comparar, atendiendo a las curvas de sensibilidad obtenidas en el estudio previo (Figura 4.5a). Se seleccionaron las siguientes 6 frecuencias: $f_m = 1, 10, 15, 20, 30$ y 35 Hz. Para cada una de las lámparas utilizadas en esta prueba se obtuvo el valor de la amplitud relativa de la fluctuación de tensión, $\frac{\Delta V}{V}$, que proporcionaba un determinado nivel de P_{st} para cada una de las frecuencias seleccionadas. Dado que se comprobó que para el nivel de referencia de $P_{st} = 1$ en algunas frecuencias el parpadeo de la luz en la lámpara incandescente era difícilmente perceptible, se decidió generar aquellas fluctuaciones de tensión asociadas a un valor de molestia de $P_{st} = 2$, de manera que el parpadeo de la luz fuese claramente distinguible, facilitando así la comparación.

Durante la realización de las pruebas cada sujeto disponía de un formulario en el que debía ir anotando para cada frecuencia si la fluctuación de luminosidad percibida en la lámpara analizada era superior, inferior o igual que la que presentaba la incandescente. Esta valoración se realizó según la escala de percepción mostrada en la Tabla 4.4.

Escala de percepción		Código
$P_{LBE}^1 \gg P_{II}^2$	(Superior)	++
$P_{LBE} > P_{II}$	(Ligeramente Superior)	+
$P_{LBE} = P_{II}$	(Igual)	=
$P_{LBE} < P_{II}$	(Ligeramente Inferior)	-
$P_{LBE} \ll P_{II}$	(Inferior)	--

¹ Percepción de la lámpara a comparar.

² Percepción de la lámpara incandescente.

Tabla 4.4. Escala de valoración de la percepción para las pruebas subjetivas.

La Tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos para cada una de las lámparas en las diferentes frecuencias analizadas, basados en la valoración proporcionada por al menos el 50% de los sujetos. Para la mayoría de los puntos de prueba, al aplicar tanto a la lámpara incandescente como a la lámpara bajo estudio las fluctuaciones de

tensión correspondientes a un valor de $P_{st} = 2$, la percepción subjetiva fue de $P_{LBE} = P_{II}$. Es decir, se demuestra que los valores de sensibilidad obtenidos durante los experimentos objetivos se relacionan con la percepción subjetiva. En general, las pocas desviaciones detectadas en algunas de las frecuencias se corresponden con una percepción ligeramente superior al valor de P_{st} esperado (+).

Id.	f_m (Hz)					
	1	10	15	20	30	35
H1	=	=	=	=	=	=
F1	=	-	=	=	-	=
C1	+	=	+	+	+	=
C3	=	=	=	+	+	+
C4	=	=	+	+	+	=
L1	=	=	=	=	=	=
L2	+	+	=	=	=	+

Tabla 4.5. Valoración de las pruebas subjetivas tomando como referencia un valor de $P_{st} = 2$ tanto en la lámpara incandescente como en la lámpara a comparar.

Además, durante el transcurso del experimento se intercalaron pruebas en las que el nivel de severidad flicker aplicado a la lámpara a evaluar era distinto al nivel de referencia $P_{st} = 2$ aplicado en la lámpara incandescente. En concreto, se generaron las fluctuaciones de tensión necesarias para obtener los niveles de $P_{st}^{LBE} = 2.5$ y $P_{st}^{LBE} = 1.5$ en las lámparas bajo estudio. La [Tabla 4.6](#) muestra las percepciones subjetivas recogidas en estos casos. Para un nivel de severidad flicker $P_{st}^{LBE} = 2.5$ ([Tabla 4.6a](#)), al compararlo con la referencia $P_{st} = 2$ en la lámpara incandescente, la percepción esperada debe situarse mayoritariamente en la valoración codificada como +. Se observa que, efectivamente, la valoración general se orientó hacia la percepción de una fluctuación de luminosidad mayor que la de la lámpara incandescente. En ciertas frecuencias, los observadores detectaron que la diferencia entre las fluctuaciones de luminosidad entre ambas lámparas se incrementaba de manera más significativa (++). Comparando estos resultados con los obtenidos al observar el mismo nivel de severidad flicker, $P_{st}^{LBE} = 2$, en ambas lámparas ([Tabla 4.5](#)), se comprueba que varias de esas frecuencias coinciden con aquellas en las que la percepción se desviaba

Id.	f_m (Hz)					
	1	10	15	20	30	35
H1	+	+	+	+	+	+
F1	=	=	+	+	+	+
C1	++	+	+	++	++	++
C3	+	+	+	++	++	++
C4	++	+	++	++	++	++
L1	+	+	+	+	+	++
L2	++	+	+	+	+	++

(a) $P_{st}^{LBE} = 2.5$

Id.	f_m (Hz)					
	1	10	15	20	30	35
H1	-	-	-	-	-	-
F1	-	-	-	-	--	--
C1	=	-	-	-	-	=
C3	=	-	-	=	-	-
C4	=	=	=	=	=	=
L1	=	-	-	-	-	-
L2	=	=	-	-	-	-

(b) $P_{st}^{LBE} = 1.5$

Tabla 4.6. Valoración de las pruebas subjetivas tomando como referencia un valor de $P_{st}^{II} = 2$ en la lámpara incandescente y generando un valor de (a) $P_{st}^{LBE} = 2.5$ y (b) $P_{st}^{LBE} = 1.5$ en las lámparas bajo estudio.

hacia niveles ligeramente superiores (+) al nivel de referencia (=). Para el caso del nivel de severidad flicker $P_{st}^{LBE} = 1.5$ (Tabla 4.6b) la codificación esperada de la valoración subjetiva debía orientarse hacia el signo -. Los resultados recogidos muestran que la percepción general indica que las fluctuaciones de luminosidad de las lámparas bajo estudio eran ligeramente inferiores, con excepción de la CFL C4 cuyas fluctuaciones de luminosidad fueron evaluadas como iguales a la lámpara incandescente en todos los puntos de prueba.

A través de estos experimentos subjetivos se pudo comprobar que los resultados objetivos recogidos en el análisis de sensibilidad de las lámparas se aproximaban a la percepción real de la luminosidad de estas lámparas ante este tipo de fluctuaciones sinusoidales de tensión. Los

resultados combinados de estas pruebas subjetivas junto con el estudio de sensibilidad realizado muestran una sensibilidad promedio menor para las nuevas tecnologías, aunque no de forma generalizada debido a la existencia de rangos frecuenciales en los que algunas lámparas superan la sensibilidad de la incandescente.

4.3 COMPORTAMIENTO EN ESCENARIOS REALES

El análisis de sensibilidad presentado en la sección anterior se ha realizado utilizando fluctuaciones simuladas de tensión, generando de manera controlada los valores de amplitud relativa, frecuencia y tipo de la fluctuación de tensión. Sin embargo, las señales reales de tensión presentes en la red eléctrica se caracterizan por evoluciones de la forma de onda poco uniformes y características frecuenciales más complejas que las fluctuaciones simuladas de tensión, utilizadas tradicionalmente en el análisis de la sensibilidad de las lámparas. A continuación se presenta un estudio en el que, por primera vez, se analiza de manera extensa la sensibilidad que presentan un conjunto de nuevas tecnologías de iluminación a fluctuaciones de tensión registradas en escenarios reales.

4.3.1 Descripción de las localizaciones

Los registros de tensión utilizados para la prueba pertenecen a una campaña de medidas llevada a cabo en la red de baja tensión (230 V/50 Hz) de varias localizaciones del norte de España. De entre todas las señales reales de las que se disponía se seleccionaron cuatro registros, tanto por los niveles de severidad flicker que presentan como por el tipo de cargas generadoras de flicker. La [Figura 4.11](#) muestra la evolución temporal de los valores de P_{st} y P_{lt} en cada una de las localizaciones, obtenidos mediante el flickermetro IEC, indicando además el valor del percentil 99 de cada uno de ellos ($P_{st,99}$ y $P_{lt,99}$). Por otro lado, se indica también el porcentaje de tiempo, T_U , durante el

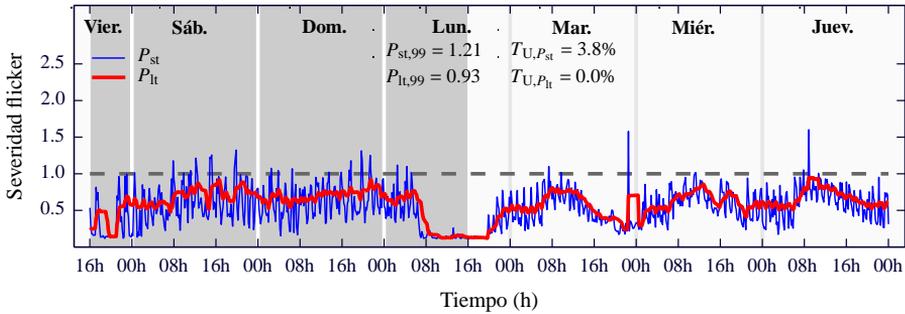
cual cada uno de los dos valores de severidad flicker excede el umbral de molestia.

La primera localización (Loc1) se corresponde con un área metropolitana de unos 900 000 habitantes con una actividad industrial importante con plantas siderúrgicas cercanas trabajando con hornos de arco. Esta localización no presenta un valor de severidad flicker importante, $P_{st,99} = 1.21$ y $P_{lt,99} = 0.93$, con un nivel de P_{st} por encima del umbral durante únicamente el 3.8 % del tiempo y con todos los valores de P_{lt} por debajo del umbral durante todo el periodo de registro (Figura 4.11a).

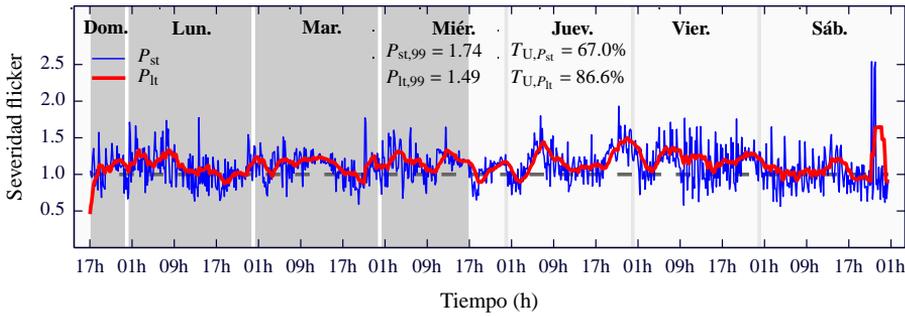
La segunda localización (Loc2) está situada en un núcleo turístico que presenta 100 000 habitantes durante el periodo vacacional. A pesar de que esta localización se encuentra alejada de la influencia de grandes cargas industriales, presenta valores de $P_{st,99} = 1.74$ y $P_{lt,99} = 1.49$ por encima del umbral de molestia. En concreto, los valores de P_{st} superan el umbral de molestia durante el 67 % del tiempo y los valores de P_{lt} durante el 86.6 % (Figura 4.11b).

La tercera localización (Loc3) se corresponde con una localidad de unos 15 000 habitantes situada en las cercanías de una instalación de horno de arco. En la evolución de los valores de P_{st} y P_{lt} de la Figura 4.11c se puede apreciar la influencia de los ciclos de trabajo de este horno. Los valores de severidad flicker se encuentran claramente por encima del umbral de molestia, $P_{st,99} = 2.06$ y $P_{lt,99} = 1.63$. A pesar de los periodos de inactividad del horno de arco, los valores de P_{st} y P_{lt} superan el umbral de molestia el 50.5 % y 68.8 % del tiempo, respectivamente. (Figura 4.11c).

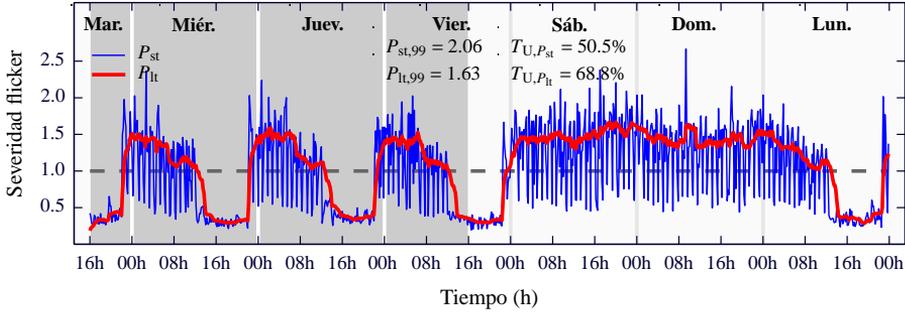
La cuarta localización (Loc4) se trata de un área rural aislada que se encuentra cerca de una fundición con hornos de arco funcionando durante el registro con prácticamente un ciclo de trabajo continuo. Los valores de severidad flicker se encuentran claramente por encima del umbral de molestia ($P_{st,99} = 2.29$ y $P_{lt,99} = 1.92$), y superan el umbral durante casi la totalidad de la duración del registro ($T_{U,P_{st}} = 77.2\%$ y $T_{U,P_{lt}} = 95.3\%$) (Figura 4.11d).



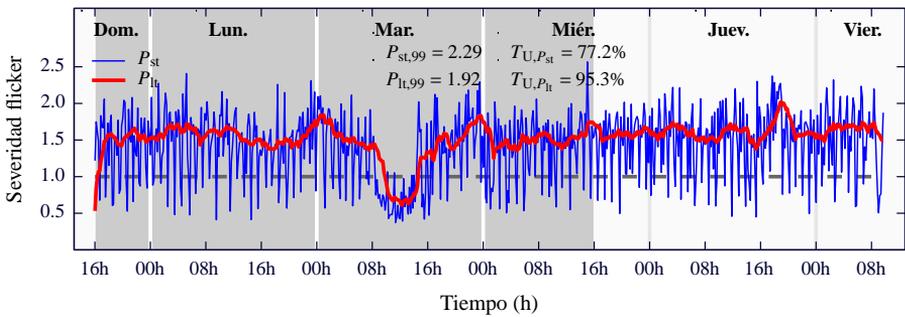
(a) Localización 1



(b) Localización 2



(c) Localización 3



(d) Localización 4

Figura 4.11. Evolución temporal de los valores de P_{st} y P_{lt} en cada localización.

Complejidad espectral y variabilidad temporal de las fluctuaciones reales de tensión

Históricamente los estudios orientados al análisis de la sensibilidad de las lámparas se han realizado utilizando fluctuaciones simuladas de tensión. Sin embargo, la variabilidad temporal y complejidad espectral que éstas presentan no es comparable a la de las fluctuaciones reales de tensión existentes en la red de suministro eléctrico. La [Figura 4.12](#) trata de ilustrar la variabilidad temporal y la complejidad espectral de las señales reales de tensión tomando como ejemplo un tramo de 72 h representativo de la localización Loc4 (tramo señalado mediante el área gris en la [Figura 4.11d](#)). Por un lado, la [Figura 4.12a](#) muestra la evolución temporal del valor eficaz de medio ciclo de la tensión de dicho tramo de señal, mientras que la [Figura 4.12b](#) representa su Densidad Espectral de Potencia (DEP) calculada mediante un estimador Welch con una ventana Hanning de 10 s y un solapamiento del 90%. Los valores de DEP se representan normalizados con respecto a la amplitud de la componente de 50 Hz. En la evolución temporal de los valores eficaces de tensión únicamente es posible identificar patrones irregulares, alcanzando en ciertos tramos los 240 V y acercándose a los 210 V en otros, a diferencia de la uniformidad que presentan las fluctuaciones simuladas de tensión. Además, en la representación del espectro se puede apreciar la existencia de un número importante de componentes tanto armónicas como interarmónicas.

Para profundizar más en este aspecto, se presenta un estudio numérico sobre la complejidad del conjunto completo de señales reales utilizadas, utilizando para ello la Entropía Espectral (EE)^{56,69} que proporciona una estimación de la uniformidad en el tiempo de una distribución frecuencial, de manera que a mayor uniformidad menor es el valor de EE. El cálculo de la EE se basa en la estimación de la DEP durante un intervalo de tiempo de duración t_w . La DEP se normaliza obteniendo así una distribución de probabilidad, P_i , asociada al intervalo de tiempo i correspondiente. La estimación de la entropía se obtiene aplicando la teoría de la información a la función de probabilidad discreta⁷¹:

$$EE = \sum_i P_i \cdot \log_2 \left(\frac{1}{P_i} \right) . \quad (4.7)$$

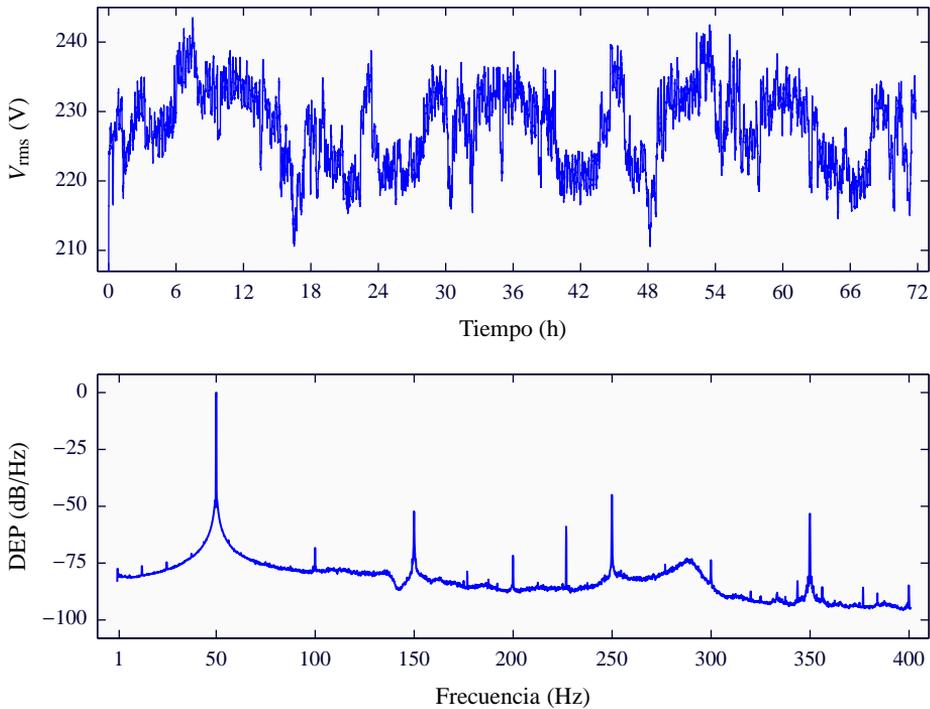


Figura 4.12. Tramo de 72 h de la señal real de tensión Loc4; (a) Evolución temporal del valor eficaz de la tensión; (b) DEP calculada con un estimador Welch.

Según este método, una función sinusoidal cuya distribución espectral se concentra alrededor de una única componente se corresponde con el límite más bajo de EE, mientras que el ruido blanco se corresponde con el límite superior de EE.

Se ha calculado la EE de la fluctuación de cada uno de los 4 registros de tensión en localizaciones reales sobre diferentes tramos, cada uno con una duración de $t_w = 60$ s, a lo largo de la duración total de cada registro. Se ha obtenido así una secuencia discreta de valores de EE por señal de tensión. La fluctuación de las señales de tensión se ha calculado como se especifica en los bloques 2 y 3 del flickermetro IEC, es decir, la señal se demodula mediante un multiplicador cuadrático y el posterior filtrado paso alto ($f_c = 0.05$ Hz) y paso bajo ($f_c = 35$ Hz).

La [Tabla 4.7](#) muestra el valor medio y la desviación estándar de la secuencia de valores EE obtenidos para cada localización, así como el

valor de estos mismos parámetros para sendas fluctuaciones sinusoidal y rectangular de $\frac{\Delta V}{V} = 1\%$ y $f_m = 10$ Hz y también para una secuencia de ruido blanco. Se observa que la fluctuación sinusoidal produce valores de EE insignificantes mientras que los mayores valores de EE obtenidos son para el caso del ruido blanco. Los valores de EE de la fluctuación rectangular se acercan más al límite menor fijado por la fluctuación sinusoidal. Sin embargo, el valor medio de EE obtenido en todas las localizaciones reales es significativamente mayor que el de una fluctuación rectangular. Por otro lado, todas las localizaciones presentan valores altos de desviación estándar de los valores de EE, lo que indica una dispersión significativa tanto en la evolución temporal como en el contenido espectral de cada fluctuación. Estos resultados revelan la considerablemente mayor complejidad de las señales reales de tensión frente a las fluctuaciones simuladas de tensión, confirmando la necesidad de estudiar el comportamiento de las lámparas ante fluctuaciones reales de tensión.

Sin.	Rect.	Ruido Blanco	Loc1	Loc2	Loc3	Loc4
0.03 ^a	0.41	7.34 ± 0.01 ^b	4.67 ± 1.21	4.18 ± 1.02	4.83 ± 0.89	4.85 ± 1.04

^a Valor medio de la secuencia de valores de EE.

^b Desviación estándar de la secuencia de valores de EE.

Tabla 4.7. Entropía espectral de las señales de tensión analizadas.

4.3.2 Sensibilidad ante señales reales de tensión

Mediante el sistema de análisis descrito en el [Capítulo 3](#) se han obtenido los valores de severidad flicker, por medio del flickermetro de luz, generados por cada una de las lámparas bajo estudio cuando están alimentadas con los cuatro registros reales de tensión descritos en la sección anterior. Con el objetivo de reducir la duración total de la prueba, se seleccionó un periodo de 3 días de cada registro. Los tramos de señal seleccionados por cada localización se encuentran señalizados mediante áreas grises en la [Figura 4.11](#). El conjunto de lámparas utilizadas en esta prueba se detalla en la [Tabla 4.8](#).

Id.	Descripción	Id.	Descripción
I1	Incandescente 60 W (Philips)	C3	CFL 18 W (General Electric)
H1	Halógena 42 W (Lexman)	C4	CFL 12 W (Philips)
F1	LFL 18 W (Sylvania)	L1	LED 12 W (Osram)
C2	CFL 23 W (Lexman)		

Tabla 4.8. Conjunto de lámparas sujetas a fluctuaciones reales de tensión.

Para analizar los resultados obtenidos se han utilizado diferentes representaciones. Por un lado, la [Figura 4.13](#) muestra la evolución temporal de los valores de P_{lt} obtenidos para cada lámpara en cada localización. Por otra parte, la [Figura 4.14](#) muestra, por cada localización y para cada lámpara, los *box-plot*^a obtenidos a partir de la función de probabilidad acumulada de los valores de severidad flicker de tiempo largo, P_{lt}^{LBE} , de cada lámpara, así como de los valores de P_{lt} normalizados con respecto a la lámpara incandescente:

$$P_{lt}^N = \frac{P_{lt}^{LBE}}{P_{lt}^{I1}} \quad (4.8)$$

En cada *box-plot* la línea horizontal representa la mediana de la distribución, mientras que los límites inferior y superior del rectángulo se corresponden con el percentil 25 y 75 respectivamente, indicando la dispersión de los valores que representan. Los círculos en los extremos representan el valor mínimo y el percentil 99 de la distribución.

Finalmente, la [Tabla 4.9](#) muestra el porcentaje de tiempo T_s , por cada localización, durante el cual el valor de P_{lt}^{LBE} supera el umbral de molestia ($P_{lt} = 1$) a la vez que se aproxima o incluso supera la sensibilidad de la lámpara incandescente, $P_{lt}^N \geq 0.9$.

Para el caso de la lámpara incandescente (I1) los valores de $P_{lt,99}$ obtenidos mediante el flickermetro de luz ([Figura 4.14](#)) son idénticos a los obtenidos mediante el flickermetro IEC para los tramos de 3 días seleccionados de las tensiones reales : $P_{lt,99}(\text{Loc1}) = 0.9$, $P_{lt,99}(\text{Loc2}) = 1.3$, $P_{lt,99}(\text{Loc3}) = 1.5$ y $P_{lt,99}(\text{Loc1}) = 1.8$. Por otro lado, los tramos de 3 días seleccionados en cada localización recogen situaciones reales con largos periodos de tiempo en los que se registra un nivel alto de severidad flicker. Este hecho queda reflejado en los *box-plot*

^a Box-plot: gráfico basado en cuartiles mediante el cual se visualiza un conjunto de datos.

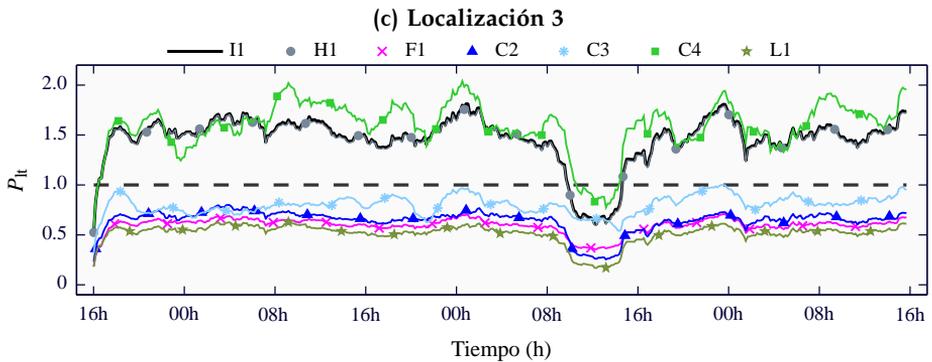
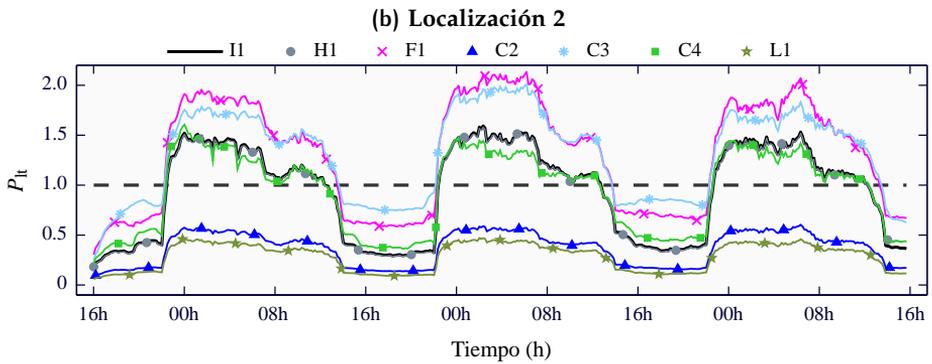
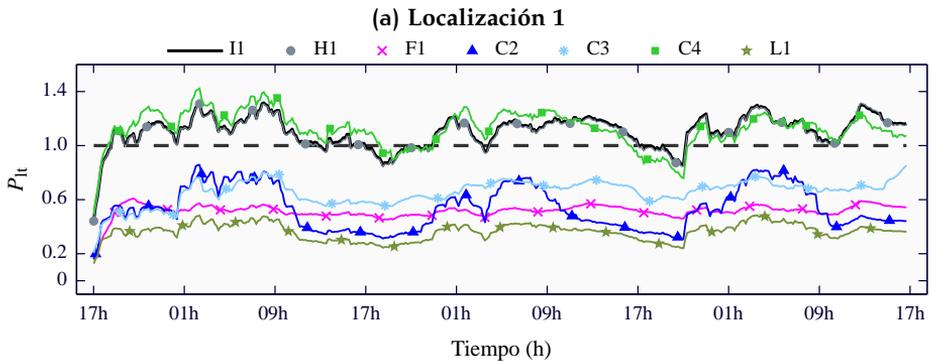
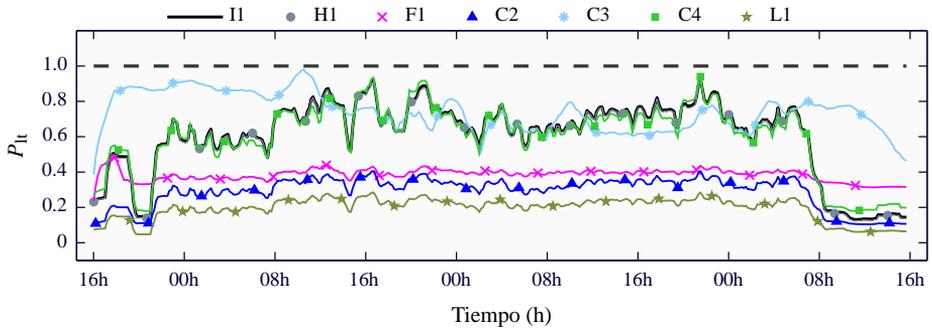


Figura 4.13. Evolución temporal de los valores de P_{lt} de las lámparas bajo estudio en cada localización.

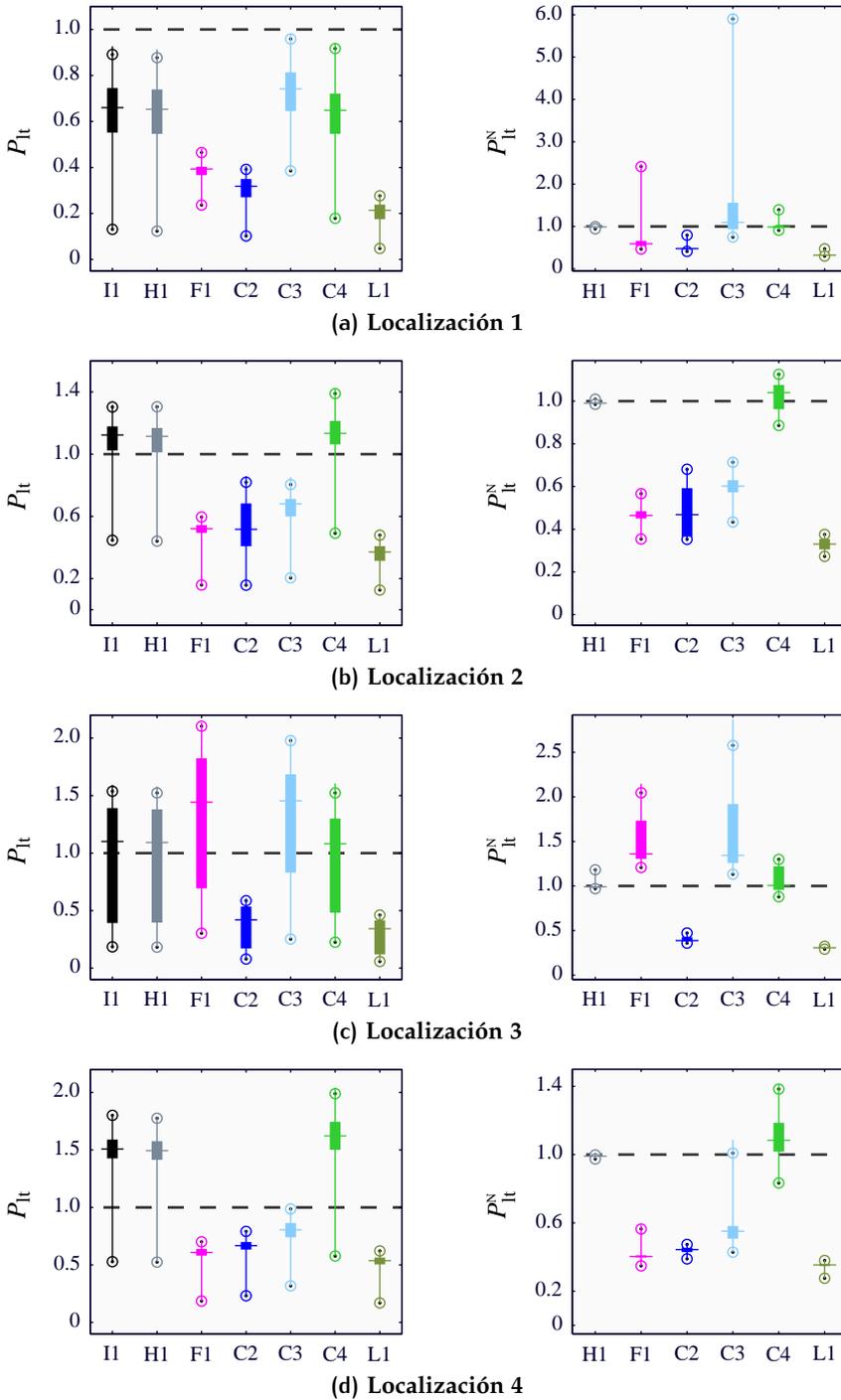


Figura 4.14. Box-plot de los valores de P_{lt} absolutos (columna izquierda) y normalizados con respecto a I1 (columna derecha), de las lámparas bajo estudio en cada localización.

	H1	F1	C2	C3	C4	L1
Loc1	0	0	0	0	0	0
Loc2	79.1	0	0	0	84.5	0
Loc3	58.2	63.6	0	64.3	51.3	0
Loc4	92.6	0	0	0	92.3	0

Tabla 4.9. T_s : porcentaje de tiempo en el que P_{lt}^{LBE} supera simultáneamente el valor unidad y el 90% del valor de la incandescente, $P_{lt}^N \geq 0.9$.

de la lámpara I1 en Loc1, Loc2 y Loc4, los cuales se encuentran sesgados hacia los percentiles más altos. En Loc3 los periodos de inactividad de los hornos de arco producen una distribución más dispersa.

Observando el comportamiento de las demás lámparas bajo estudio, se pueden distinguir tres tipos de comportamientos. En primer lugar, las lámparas C2 y L1 presentan una sensibilidad baja, significativamente inferior a la de I1, en todas las localizaciones. La lámpara C2 presenta su sensibilidad más alta en Loc2, donde $P_{lt,99}(C2, Loc2) = 0.8$, mientras que $P_{lt,99}(I1, Loc2) = 1.3$. El comportamiento más sensible de la lámpara L1 se da en Loc4 donde $P_{lt,99}(L1, Loc4) = 0.6$, mientras que $P_{lt,99}(I1, Loc4) = 1.8$. Con ninguna de estas dos lámparas se obtiene ningún valor de P_{lt} que simultáneamente se encuentre por encima del umbral de molestia y de la lámpara incandescente. Es decir, en todas las localizaciones $T_s(C2) = T_s(L1) = 0\%$ y el valor de la mediana de los *box-plot* correspondientes a los valores normalizados P_{lt}^N se encuentra en todos los casos por debajo de la unidad, $P_{lt,50}^N(C2) < 1$ y $P_{lt,50}^N(L1) < 1$. Este comportamiento es compatible con los resultados de sensibilidad obtenidos para estas lámparas con fluctuaciones simuladas de tensión, según la [Figura 4.5](#).

La sensibilidad de las lámparas H1 y C4 es similar o incluso supera a la sensibilidad que presenta la lámpara incandescente. En todas las localizaciones, H1 e I1 presentan distribuciones prácticamente idénticas de P_{lt} . Este comportamiento es consistente con los resultados obtenidos para la lámpara H1 con fluctuaciones simuladas de tensión ([Figura 4.5](#)). La respuesta de la lámpara C4 es prácticamente idéntica a la de I1 en Loc1, y presenta una sensibilidad ligeramente superior a I1 en las demás localizaciones, como muestran los *box-plot* de los valores de P_{lt}^N al encontrarse éstos sesgados hacia valores levemente superiores a la

unidad. En concreto en Loc4 esta lámpara se encuentra prácticamente la totalidad del registro por encima de la incandescente con valores de P_{lt} superando ampliamente el umbral de molestia: $P_{lt,99}(C4, Loc4) = 2.0$, $P_{lt,50}^N(C4, Loc4) = 1.1$ y $T_s(C4, Loc4) = 92.3\%$. Es necesario destacar que este comportamiento no es coherente con la respuesta registrada para esta lámpara con fluctuaciones simuladas de tensión (Figura 4.5), en donde, para un rango amplio de frecuencias, la sensibilidad de C4 se encontraba claramente por debajo de I1.

Por último, las lámparas F1 y C3 muestran comportamientos contradictorios para las diferentes localizaciones. F1 presenta una sensibilidad menor que I1 durante prácticamente la duración total de los registros en Loc1, Loc2 y Loc4. Sin embargo, en Loc3 la lámpara F1 muestra un comportamiento claramente más sensible que I1, $P_{lt,99}(F1, Loc3) = 2.1$, mientras que $P_{lt,99}(I1, Loc3) = 1.5$ y $P_{lt,50}^N(F1, Loc3) = 1.3$. Como se indica en la Tabla 4.9, la lámpara F1 presenta un porcentaje de tiempo T_s en Loc3 superior al 60%, comportamiento incoherente con la respuesta de esta lámpara con fluctuaciones simuladas de tensión (Figura 4.5) en donde su sensibilidad era menor que la lámpara incandescente para un rango amplio de frecuencias. La lámpara C3 presenta una sensibilidad menor que la incandescente en Loc2 y Loc4. Por el contrario, en Loc1 y Loc3 la sensibilidad de C3 es similar o incluso mayor que la I1, $P_{lt,50}^N(C3, Loc1) = 1.1$ y $P_{lt,50}^N(C3, Loc3) = 1.3$. En concreto en Loc3, la lámpara C3 presenta un valor de $P_{lt,99}(C3, Loc3) = 2.0$, mientras que la incandescente $P_{lt,99}(I1, Loc3) = 1.5$. Como en el caso de F1, la lámpara C3 en estas dos últimas localizaciones muestra un comportamiento distinto a su respuesta ante fluctuaciones simuladas (Figura 4.5), en donde su sensibilidad era menor que la de la incandescente en la mayor parte del rango de frecuencias analizado.

El análisis del comportamiento de las lámparas ante señales reales de tensión ha permitido extraer diferentes conclusiones. Por un lado, se ha comprobado que algunas de las lámparas bajo estudio pueden mostrar un comportamiento distinto ante señales reales que ante fluctuaciones simuladas de tensión. Es posible encontrar lámparas que en localizaciones reales se muestren más sensibles que la incandescente, aunque su comportamiento con señales simuladas fuera menos sensible. Este hecho dificulta la predicción de la respuesta de estas lámparas a partir del análisis de su sensibilidad ante señales de tensión

simuladas en el laboratorio. Además, algunas lámparas muestran un comportamiento dependiente de la localización real utilizada. Es decir, la composición frecuencial y las características temporales no uniformes de la propia fluctuación de tensión influyen de manera determinante en la respuesta de estas lámparas. Ante todos estos hechos, parece imposible afirmar que la evolución de las tecnologías de iluminación hacia lámparas más eficientes lleve consigo una mejora implícita en su comportamiento ante fluctuaciones en su tensión de alimentación.

4.4 SENSIBILIDAD EN DISTINTOS NIVELES DE SEVERIDAD FLICKER

El estudio del comportamiento de las lámparas ante fluctuaciones simuladas de tensión se ha llevado a cabo para un único nivel de severidad flicker. Sin embargo, a priori ese comportamiento no tiene por qué repetirse ante cualquier nivel de severidad flicker. Esto sólo ocurriría en el caso de que una lámpara presentara un comportamiento lineal ante diferentes amplitudes de la fluctuación de tensión.

Para la lámpara incandescente, el hecho de escoger uno u otro nivel de severidad flicker con el que realizar el análisis no es relevante de cara a los resultados obtenidos. Como se demuestra a continuación, las características de la lámpara incandescente y del sistema ojo-cerebro proporcionan una relación lineal entre la amplitud de la fluctuación de tensión y el valor de severidad flicker.

Por un lado, la lámpara incandescente presenta un comportamiento lineal para pequeñas variaciones de tensión:

$$\frac{\Delta L}{L} = \gamma \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad 3.4 < \gamma < 3.8, \quad (4.9)$$

de manera que un incremento en la amplitud relativa de la fluctuación de tensión provoca un incremento proporcional en la amplitud relativa de la fluctuación de su luminosidad¹.

Por otro lado, el modelo del conjunto ojo-cerebro presenta una relación lineal entre la fluctuación de luminosidad y el nivel de severidad

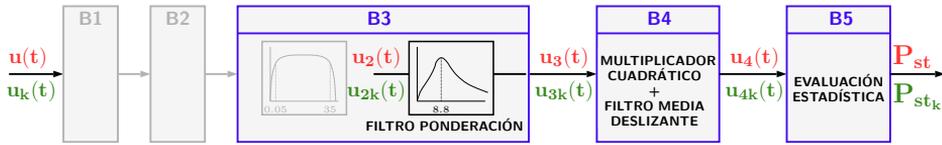


Figura 4.15. Análisis de la respuesta lineal del procedimiento de medida de flicker a partir del diagrama de bloques del flickermetro IEC.

flicker. Para comprobar esta afirmación, la Figura 4.15 representa el diagrama de bloques del flickermetro IEC resaltando aquellos bloques correspondientes exclusivamente al modelo ojo-cerebro. Para una señal de tensión, $u(t)$, afectada por una fluctuación de tensión sinusoidal (Ecuación 4.2), a la salida de los filtros de modulación del bloque 3 se obtiene:

$$u_2(t) \simeq C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot \sin(w_m t + \phi_2) , \quad (4.10)$$

donde C_2 y ϕ_2 son el módulo y la fase de la respuesta frecuencial de los filtros de demodulación en f_m . A través del filtro de ponderación del bloque 3, se pondera esta señal obteniéndose la fluctuación de luminosidad, $u_3(t)$, que contiene una componente fundamental relacionada linealmente con la amplitud de la tensión de la siguiente forma:

$$u_3(t) \simeq C_3 \cdot C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot \sin(w_m t + \phi_2 + \phi_3) , \quad (4.11)$$

donde C_3 y ϕ_3 son el módulo y la fase de la respuesta frecuencial del filtro de ponderación en f_m . El término $C_3 \cdot C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V}{V}$ representa la amplitud relativa de la fluctuación de luminosidad.

El bloque 4 modela la respuesta del cerebro a las fluctuaciones de luminosidad presentando también un comportamiento lineal. Este bloque procesa linealmente, mediante un filtro de media deslizante, la elevación al cuadrado de la salida del bloque 3, obteniendo la percepción instantánea de flicker como una combinación lineal de dos componentes frecuenciales, DC y $2f_m$:

$$u_4(t) \simeq \frac{C_3^2 \cdot C_2^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V}{V}\right)^2 \cdot (C_4 - C_5 \cdot \cos(2w_m t + 2\phi_2 + 2\phi_3 + \phi_5)), \quad (4.12)$$

donde C_4 y C_5 son los módulos de la respuesta frecuencial del filtro en DC y $2f_m$, respectivamente, y ϕ_5 se corresponde con la fase del filtro en $2f_m$.

Finalmente, el bloque 5 calcula los estadísticos necesarios de P_{inst} y mediante la raíz cuadrada de una combinación lineal de los mismos (Ecuación 1.5), se obtiene el valor de severidad flicker P_{st} .

Con el objetivo de demostrar el comportamiento lineal del sistema ojo-cerebro, se aplica ahora una amplitud de tensión k veces superior a la utilizada previamente:

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)' = k \cdot \frac{\Delta V}{V} . \quad (4.13)$$

La salida del bloque 3, $u_{3k}(t)$, presentará una única componente en f_m con una amplitud k veces superior a la de $u_3(t)$:

$$u_{3k}(t) \simeq k \cdot C_3 \cdot C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot \sin(w_m t + \phi_2 + \phi_3) = k \cdot u_3(t) . \quad (4.14)$$

De la misma forma, la salida del bloque 4 se puede expresar como:

$$u_{4k}(t) = u_{3k}(t)^2 = k^2 \cdot u_3^2(t) = k^2 \cdot u_4(t) , \quad (4.15)$$

donde $u_{4k}(t)$ presenta una amplitud k^2 veces superior que $u_4(t)$. Como el bloque 5 calcula el valor de P_{st} a partir de la raíz cuadrada de los estadísticos obtenidos de la salida del bloque 4, el correspondiente valor de P_{st} se encuentra linealmente relacionado con el obtenido anteriormente de la siguiente manera:

$$P_{\text{st}_k} = k \cdot P_{\text{st}} . \quad (4.16)$$

Teniendo en cuenta la Ecuación 1.6, el valor de P_{lt} obtenido también se encuentra linealmente relacionado con el que se obtendría anteriormente:

$$P_{\text{lt}_k} = k \cdot P_{\text{lt}} . \quad (4.17)$$

Gracias a la respuesta lineal de la lámpara incandescente y del sistema visual humano, existe una relación lineal entre las variaciones de la tensión y la severidad flicker. Ante tecnologías de iluminación distintas a la incandescente, esta relación lineal únicamente se sustentaría en el caso de presentar aquéllas un comportamiento lineal.

No existen evidencias ni estudios extensos que aborden el análisis de la respuesta lineal de las nuevas tecnologías de iluminación. Este estudio resulta relevante por dos motivos. Por un lado, en el caso de detectar un comportamiento no lineal en las nuevas lámparas, sería necesaria la

valoración de la sensibilidad de éstas tomando como referencia distintos niveles de severidad flicker. Por otro lado, la no linealidad dificultaría el proceso de adaptación de la medida de flicker a una nueva lámpara de referencia. Es decir, un comportamiento no lineal impediría modelar un nuevo flickermetro IEC empleando como estrategia únicamente la sustitución del filtro de la lámpara en el bloque 3 y el mantenimiento del bloque 2, como se recomendaba en las conclusiones del informe final del grupo de trabajo C4.108 del CIGRE¹⁵.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis de la respuesta de las lámparas bajo estudio a distintas amplitudes de la fluctuación de tensión, utilizando por un lado fluctuaciones simuladas de tensión, y por otro, señales reales de tensión. El conjunto de lámparas utilizado en el estudio es el que se detalla en la [Tabla 4.10](#).

Id.	Descripción	Id.	Descripción
F1	LFL 18 W (Sylvania)	C4	CFL 12 W (Philips)
C1	CFL 11 W (Philips)	C5	CFL 11 W (Megaman)
C2	CFL 23 W (Lexman)	L1	LED 12 W (Osram)
C3	CFL 18 W (General Electric)	L2	LED 8 W (Philips)

Tabla 4.10. Conjunto de lámparas utilizadas en el estudio de sensibilidad de las lámparas en función del nivel de severidad flicker.

4.4.1 Fluctuaciones simuladas de tensión

En esta prueba el estudio de linealidad de las lámparas se realizó analizando su respuesta a niveles proporcionales de una fluctuación de tensión rectangular, tomando como referencia aquellas que producen un valor de $P_{st} = 1$ en la incandescente (línea roja de la [Figura 4.4](#)):

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)' = k \cdot \frac{\Delta V}{V} \Big|_{P_{st}^{IEC}=1}, \quad (4.18)$$

donde k representa el factor de proporcionalidad aplicado. Para cada amplitud de la fluctuación de tensión generada se obtenía, a través del flickermetro de luz, el valor de severidad flicker asociado $P_{st,k}$ para cada lámpara analizada. A continuación, se calculó la desviación existente

entre los valores obtenidos y los valores ideales que representarían el comportamiento lineal en cada lámpara. Es decir, tomando como referencia el valor de severidad flicker, $P_{st,ref}$ obtenido en cada lámpara al aplicar la fluctuación rectangular de $\frac{\Delta V}{V}$ $\Big|_{P_{st}^{IEC}=1}$ la desviación se calcula como:

$$\Delta P_{st} = \left| \frac{P_{stk} - k \cdot P_{st,ref}}{k \cdot P_{st,ref}} \right| \cdot 100 . \quad (4.19)$$

La [Tabla 4.11](#) muestra los valores de desviación obtenidos para los factores de proporcionalidad $k = 2, 3,$ y 4 y las frecuencias de la fluctuación $f_m = 1, 10$ y 20 Hz. Además de los valores obtenidos para las lámparas analizadas, se muestra el valor de severidad flicker obtenido mediante el flickermetro IEC. Se observa que la lámpara L1 muestra una respuesta muy lineal a las fluctuaciones de tensión, con valores de desviación muy próximos a los obtenidos para el modelo de lámpara incandescente del flickermetro IEC en todas las f_m e independientemente del factor k aplicado. Para el resto de las lámparas su respuesta lineal queda comprometida al presentar valores de desviación distintos dependiendo tanto de la frecuencia f_m como del factor k aplicado. En concreto, los mayores valores de desviación se registraron para la lámpara C3. Esta lámpara presenta un incremento en los valores de desviación a medida que el factor k aumenta, llegando a niveles próximos del 12 % para $f_m = 10$ Hz.

f_m (Hz)	k	IEC	F1	C1	C2	C3	C4	C5	L1	L2
1	2	0.0	1.1	0.7	0.4	5.7	0.3	0.2	0.1	0.7
	3	0.0	1.1	0.4	0.5	5.5	0.5	0.3	0.2	0.8
	4	0.1	1.1	0.3	0.5	7.4	0.1	0.2	0.1	1.1
10	2	0.1	0.6	0.3	0.5	7.9	0.4	0.6	0.4	1.1
	3	0.1	0.8	0.8	0.4	11.0	0.0	0.7	0.4	1.8
	4	0.1	0.9	1.1	0.5	11.8	0.1	0.7	0.5	2.4
20	2	0.2	0.5	2.5	0.4	2.5	1.4	2.4	0.2	0.1
	3	0.1	3.0	5.0	1.9	3.5	1.9	2.9	0.2	0.2
	4	0.1	2.5	5.6	3.8	3.4	2.8	2.9	0.2	0.3

Tabla 4.11. Valores de desviación en la linealidad $\Delta P_{st}(\%)$ obtenidos con fluctuaciones de tensión rectangulares.

Debido a las diferencias encontradas en los valores de desviación dependiendo de la frecuencia y el nivel de severidad flicker aplicado, resultaba necesario analizar la linealidad en la respuesta de las lámparas ante señales de tensión caracterizadas por una complejidad espectral mayor.

4.4.2 Señales reales de tensión

El análisis de linealidad se ha completado estudiando el comportamiento de las lámparas ante señales reales de tensión. En estas señales se pueden distinguir, a lo largo de un periodo de tiempo, distintos niveles de severidad flicker (Figura 4.11). Teniendo en cuenta el comportamiento lineal de la lámpara incandescente, una respuesta lineal por parte de las lámparas bajo estudio implicaría que la relación existente entre las sensibilidades de estas lámparas y la incandescente, P_{st}^N , debería mantenerse constante para los distintos niveles de P_{st} registrados.

Con el objetivo de ilustrar este hecho, se ha calculado la relación existente entre los valores de severidad flicker de las lámparas bajo estudio y la lámpara incandescente, P_{st}^N , obtenidos en el análisis de sensibilidad llevado a cabo en la Sección 4.3 para la localización Loc2. La Figura 4.16 representa la correlación existente entre P_{st}^N y los niveles de severidad flicker de la incandescente P_{st}^{II} para tres de las lámparas bajo estudio. Si una lámpara presenta un comportamiento lineal los valores de P_{st}^N deben mantenerse prácticamente constantes independientemente del nivel de severidad flicker, P_{st}^{II} , registrado. Se puede identificar el comportamiento lineal de la lámpara halógena (H1) al observar que la relación entre esta lámpara y la incandescente (I1) se mantiene claramente constante para todo el rango de valores de severidad flicker registrados en esa localización. La respuesta de la lámpara LED (L1) también puede considerarse lineal, mostrando una relación constante con valores ligeramente más dispersos que para el caso de la H1. Sin embargo, la lámpara CFL (C3) presenta una dispersión relevante en la correlación de los resultados obtenidos. Si el estudio se realiza para un único nivel de severidad flicker, la relación existente entre esta lámpara y la incandescente muestra valores muy dispersos. Este comportamiento no lineal se extiende al analizar la

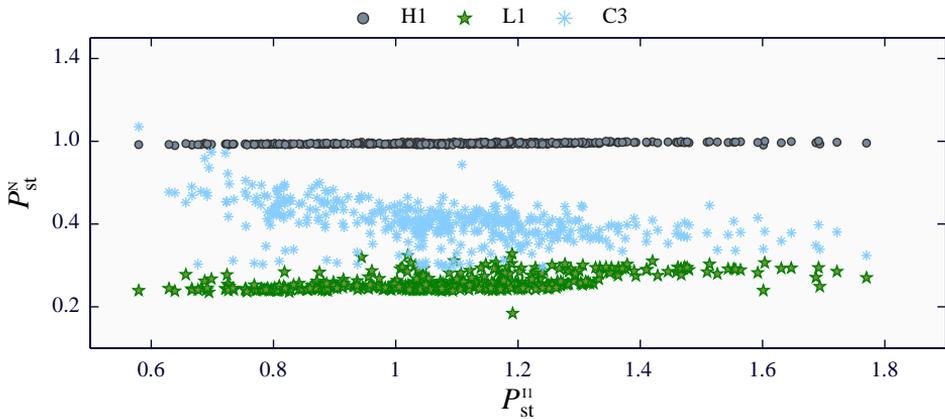


Figura 4.16. Valores de P_{st} de tres de las lámparas bajo estudio normalizados con respecto a los valores de la incandescente en función de los valores de P_{st} de la incandescente en la localización Loc2.

relación no constante que presenta esta lámpara con respecto a los diferentes niveles de severidad flicker encontrados. Para valorar con más precisión el comportamiento lineal de las lámparas ante señales reales de tensión, se siguió un procedimiento similar al empleado con fluctuaciones simuladas de tensión. Se pretendía analizar si incrementos lineales en la fluctuación de tensión real, responsable de la fluctuación de luminosidad, provocan igualmente incrementos lineales en los valores de severidad flicker.

A la hora de configurar esta prueba, el mayor problema era obtener una señal real caracterizada por una fluctuación proporcional a la fluctuación de tensión de la señal real original. La [Figura 4.17](#) esquematiza el procedimiento seguido en esta prueba para la generación de una nueva señal real, $u_{R_k}[n]$, que presenta una fluctuación de tensión proporcional a la de la señal real original, $u_R[n]$. El procedimiento consistió, en primer lugar, en obtener la fluctuación de tensión responsable de la fluctuación de luminosidad. Teniendo en cuenta que las fluctuaciones de luminosidad pueden deberse a componentes espectrales de la tensión en las proximidades de la componente fundamental de 50 Hz, así como a componentes interarmónicas alrededor de los armónicos, se empleó un filtro notch centrado en 50 Hz con ancho de banda de 0.5 Hz. De esta forma, se seleccionaba toda componente espectral distinta de 50 Hz susceptible de generar variaciones en la luminosidad. La [Figura 4.18](#)

representa la respuesta frecuencial del filtro notch implementado. A la salida del filtro se obtenía la fluctuación de tensión, $du[n]$, la cual se multiplicaba por la constante de proporcionalidad seleccionada, k , obteniendo la fluctuación de tensión proporcional $du_k[n]$. Por otro lado, restando $du[n]$ a $u_R[n]$, se extraía la componente de 50 Hz de la señal real original, $u_{50}[n]$. Mediante la combinación de $u_{50}[n]$ y $du_k[n]$, se generaba la nueva señal real de tensión, $u_{R_k}[n]$, cuya fluctuación de tensión es proporcional en un factor k a la fluctuación de tensión de la señal real original.

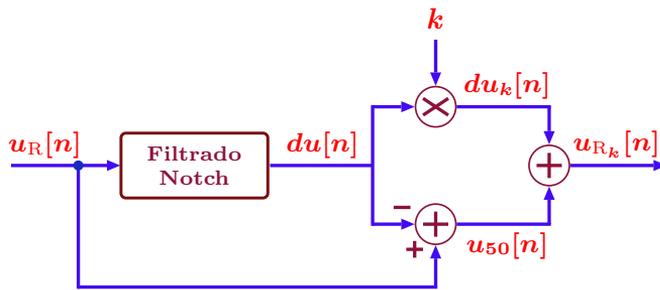


Figura 4.17. Diagrama del procedimiento seguido para la generación de las fluctuaciones de tensión proporcionales en una señal real de tensión.

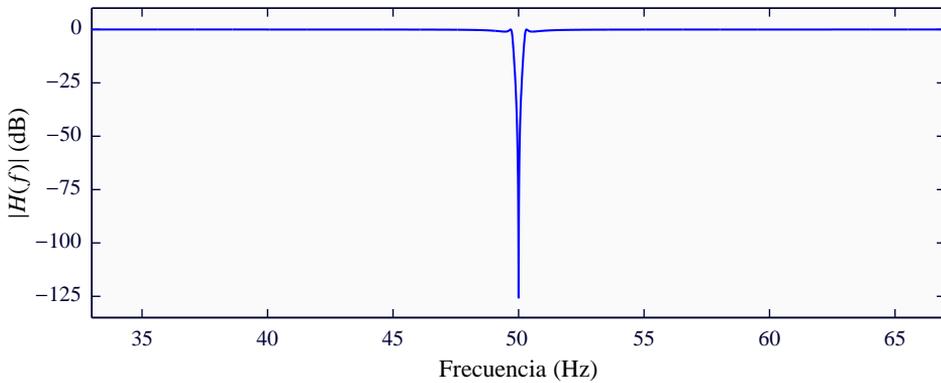


Figura 4.18. Respuesta frecuencial del filtro notch implementado para la generación de fluctuaciones de tensión proporcionales en una señal de tensión real.

En primer lugar, y con el objetivo de valorar la precisión del método, se aplicó el procedimiento a señales simuladas, tomando como referencia las fluctuaciones de tensión rectangulares que caracterizan el umbral de molestia $P_{st} = 1$ para una lámpara incandescente (línea roja de la [Figura 4.4](#)). Para factores de proporcionalidad desde $k = 1.5$ hasta $k = 5$ con una resolución de 0.5, se generaron mediante el esquema de la [Figura 4.17](#) las fluctuaciones de tensión proporcionales a las de referencia. Por medio del flickermetro IEC se obtuvieron los valores de P_{st} para cada fluctuación de tensión, para finalmente calcular la desviación entre estos valores y aquellos que caracterizan la relación ideal de linealidad como se indicaba en la [Ecuación 4.19](#). La [Tabla 4.12](#) muestra las desviaciones obtenidas para ocho frecuencias dentro del rango de 1 a 35 Hz. Se puede observar que las mayores desviaciones que se registran para la frecuencia más baja, $f_m = 1$ Hz, no superan el 3% en ningún caso, dando por válido el correcto funcionamiento del procedimiento implementado.

k	f_m (Hz)							
	1	5	10	15	20	25	30	35
1.5	1.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
2.0	1.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
2.5	2.1	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
3.0	2.3	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.3
3.5	2.5	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.3
4.0	2.6	0.5	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.3
4.5	2.7	0.5	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.4
5.0	2.8	0.5	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.4

Tabla 4.12. Valores de $\Delta P_{st}(\%)$ obtenidos en la valoración de la precisión del método descrito en la [Figura 4.17](#), tomando como referencia las fluctuaciones de tensión rectangulares que producen un valor de $P_{st} = 1$ en la incandescente.

Para el análisis de linealidad mediante señales reales de tensión se empleó un corte de 24 horas del registro real de tensión de la localización Loc2, en el cual el valor de P_{It} se mantuviera cercano al valor unidad durante todo el intervalo de análisis. La [Figura 4.19](#) representa la evolución temporal del valor eficaz de la tensión, así como la evolución de los valores de severidad flicker de dicho tramo ($P_{st_{ref}}$, $P_{It_{ref}}$).

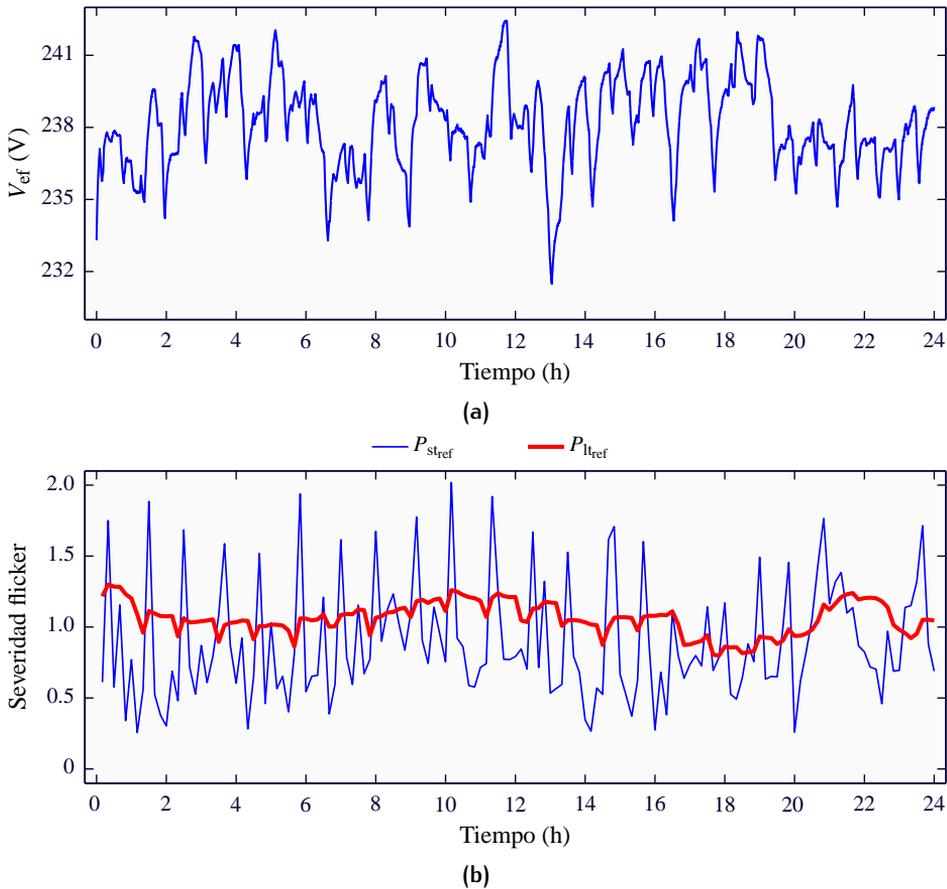


Figura 4.19. Tramo de 24 horas del registro real de tensión Loc2; (a) Evolución temporal del valor eficaz de la tensión; (b) Valores de severidad flicker obtenidos para ese tramo.

A partir del corte seleccionado $u_R[n]$, se generaron las señales proporcionales, $u_{R_k}[n]$, con $k = 2, 3$, y 4 . Mediante el flickermetro IEC se obtuvieron los valores de severidad flicker, P_{lt_k} , correspondientes a las señales de tensión $u_{R_k}[n]$. La [Figura 4.20](#) representa la evolución temporal de la relación entre los valores de P_{lt_k} y los obtenidos para la señal original real, $P_{lt_{ref}}$. Los factores k se encuentran representados en la figura mediante líneas discontinuas. Se observa que el modelo de lámpara incandescente implementado en el flickermetro IEC presenta una respuesta lineal ante fluctuaciones de tensión proporcionales a la señal real original, ya que la relación entre los valores de P_{lt} se mantiene constante y muy próxima a los valores k aplicados. Se observa

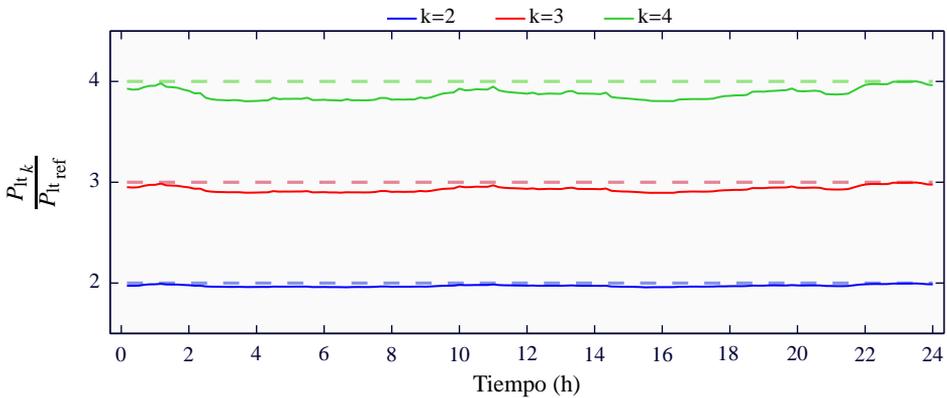


Figura 4.20. Evolución temporal de la relación entre los valores de P_{lt_k} y $P_{lt_{ref}}$ obtenidos mediante el flickermetro IEC.

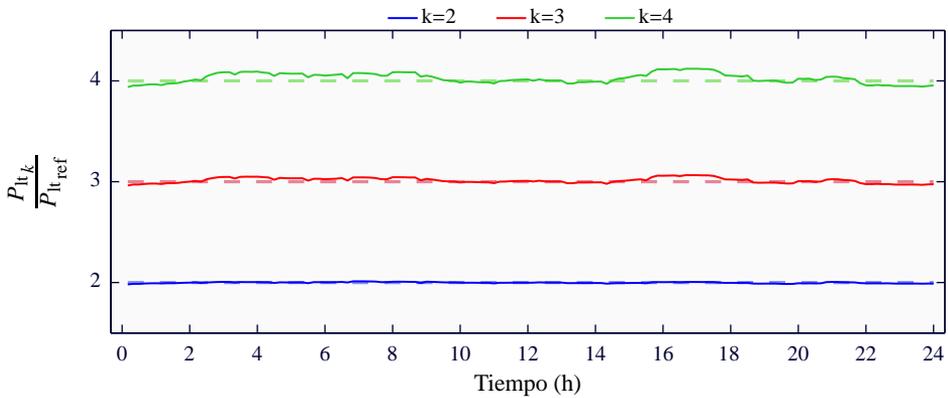
igualmente que a niveles altos de severidad flicker la linealidad va siendo menor. La linealidad en la respuesta de la lámpara incandescente se definió para pequeñas variaciones de tensión (Ecuación 4.9). Sin embargo, las elevadas amplitudes de la fluctuación de tensión asociadas a los factores k más altos pueden comprometer la linealidad en la respuesta de esta lámpara.

Para cada una de las lámparas bajo estudio se obtuvieron los valores de severidad flicker correspondientes a cada factor k aplicado, P_{lt_k} , utilizando para ello el flickermetro de luz. A la hora de analizar la linealidad, se tomaron como referencia los valores de severidad flicker que se obtuvieron ante la señal real original, $P_{lt_{ref}}$, para cada una de las lámparas. Las figuras 4.21, 4.22 y 4.23 representan la evolución temporal de la relación entre los valores de P_{lt_k} y $P_{lt_{ref}}$ para cada una de las lámparas bajo estudio. Por otro lado, la Tabla 4.13 muestra el valor medio de los valores de desviación $\Delta P_{lt}(t)$, los cuales se obtuvieron a lo largo del intervalo de análisis como:

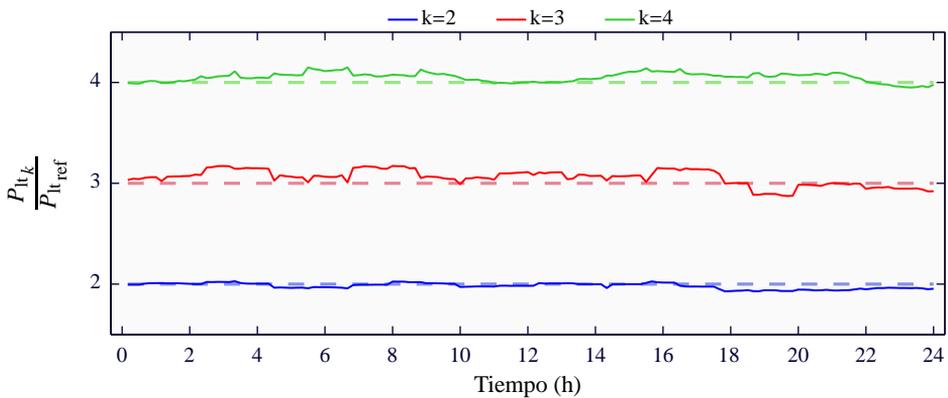
$$\Delta P_{lt}(t) = \frac{P_{lt_k}(t) - k \cdot P_{lt_{ref}}(t)}{k \cdot P_{lt_{ref}}(t)} \cdot 100 \quad . \quad (4.20)$$

k	IEC	F1	C1	C2	C3	C4	C5	L1	L2
2	-1.4	-1.2	19.2	16.2	-4.6	-3.0	33.3	-0.2	-2.8
3	-2.3	1.4	22.0	19.7	-3.5	-6.7	38.2	0.3	-12.3
4	-3.1	1.1	21.6	19.0	-3.1	-14.1	33.7	0.4	-21.8

Tabla 4.13. Valores medios de los valores de desviación en la linealidad ΔP_{lt} (%) obtenidos con señales reales de tensión.

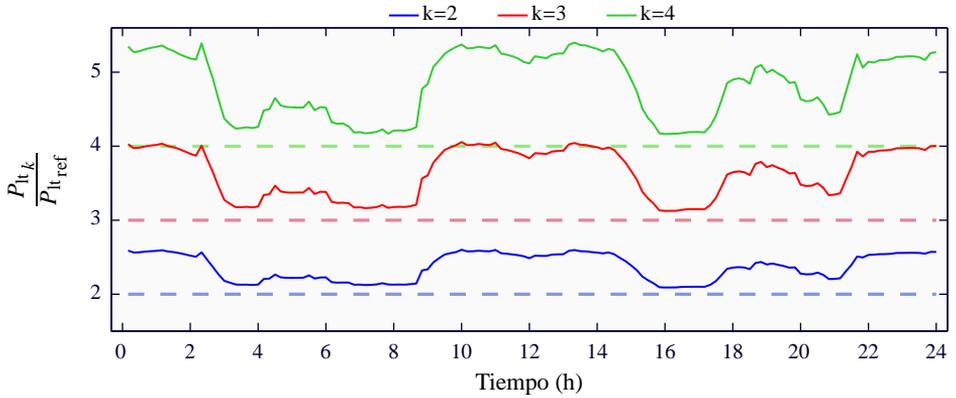


(a) LED 12 W (L1)

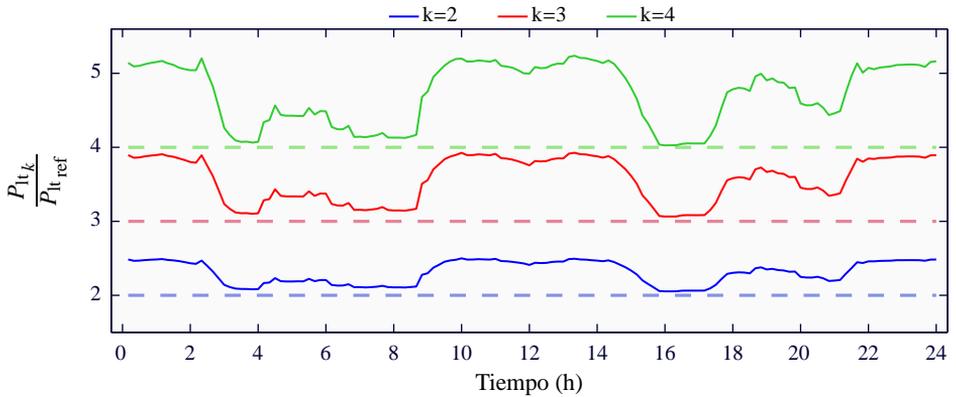


(b) LFL 18 W (F1)

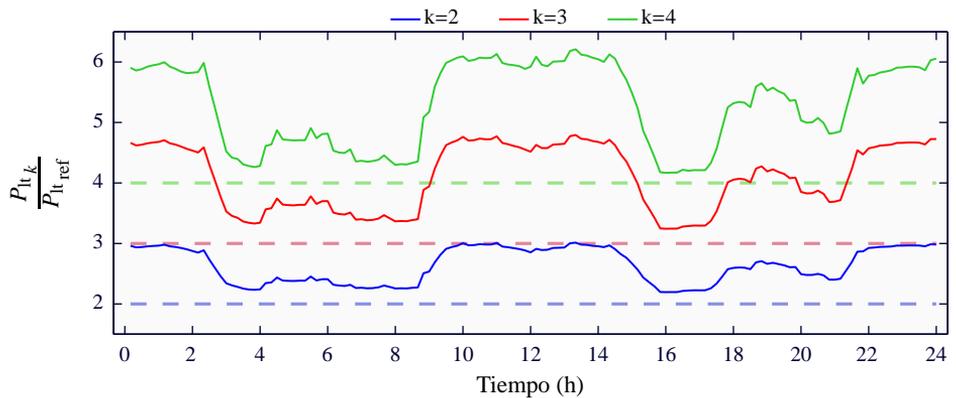
Figura 4.21. Relación entre los valores de $P_{lt,k}$ y $P_{lt,ref}$ obtenidos para las siguientes lámparas bajo estudio: (a) L1; (b) F1.



(a) CFL 11 W (C1)

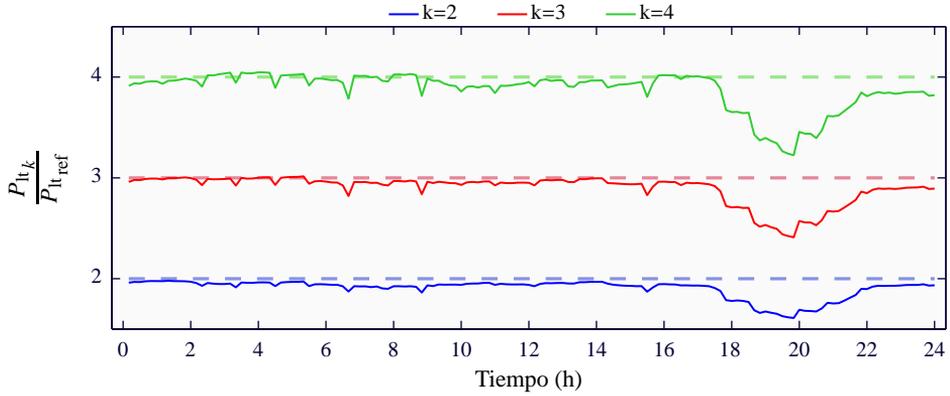


(b) CFL 23 W (C2)

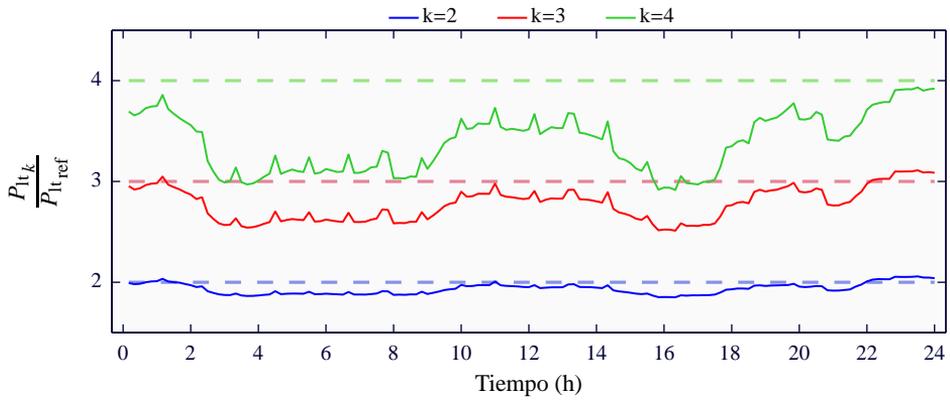


(c) CFL 11 W (C5)

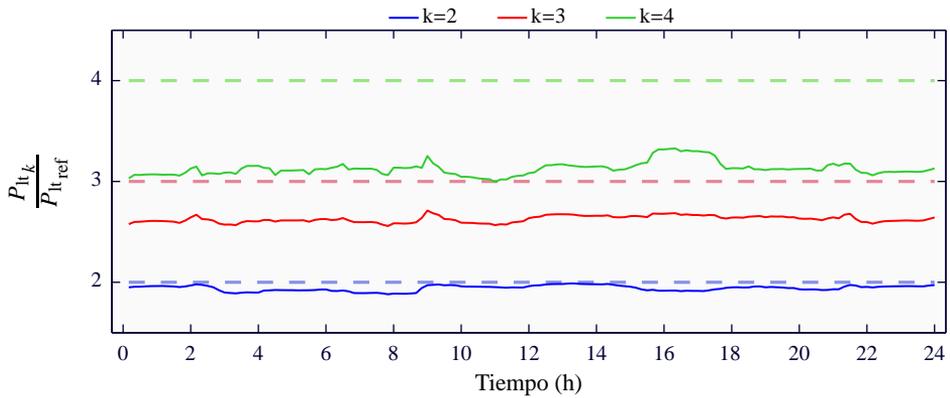
Figura 4.22. Relación entre los valores de P_{t_k} y $P_{t_{ref}}$ obtenidos para las siguientes lámparas bajo estudio: (a) C1; (b) C2; (c) C5.



(a) CFL 18 W (C3)



(b) CFL 12 W (C4)



(c) LED 8 W (L2)

Figura 4.23. Relación entre los valores de P_{t_k} y $P_{t_{ref}}$ obtenidos para las siguientes lámparas bajo estudio: (a) C3; (b) C4; (c) L2.

De los resultados se observa que algunas lámparas presentan una respuesta lineal a niveles proporcionales de la fluctuación real de tensión. Es el caso de las lámparas L1 y F1 (Figura 4.21), las cuales se comportan de manera claramente lineal, con valores medios de desviación por debajo de 0.5% para L1 y 1.4% para F1. Por otro lado, el resto de lámparas bajo estudio presentan comportamientos no lineales. Las lámparas C1, C2, y C5 muestran tramos con respuestas completamente no lineales en donde los valores de P_{lt_k} superan ampliamente los valores proporcionales esperados (Figura 4.22). En concreto, la lámpara C5 llega a presentar valores 6 veces por encima de los valores de referencia cuando esta relación debería estar centrada en torno al factor 4. Este comportamiento puede identificarse claramente en la Tabla 4.13 con valores medios de desviación por encima del 15% en todos los niveles de severidad flicker aplicados. Finalmente las lámparas C3, C4 y L2 muestran también una respuesta no lineal, aunque en este caso con valores de P_{lt_k} inferiores a los valores proporcionales esperados (Figura 4.23). En las lámparas C3 y C4, el comportamiento no lineal es detectable en intervalos de tiempo concretos, mientras que en la lámpara L2 la no linealidad se mantiene prácticamente constante, con poca dispersión a lo largo de todo el intervalo de análisis. Por otro lado, cabe destacar que la no linealidad en las lámparas C4 y L2 se hace más evidente a medida que se incrementa el nivel de severidad flicker aplicado, como se observa en la Tabla 4.13 con valores medios de desviación mayores a medida que el factor k aumenta.

El comportamiento no lineal de las lámparas toma vital relevancia cuando se trata de comparar su sensibilidad con la de la lámpara incandescente. Principalmente crítica es la situación en la que a niveles bajos de severidad flicker la sensibilidad de la lámpara analizada se encuentra por debajo de la incandescente, clasificándola como menos sensible que ésta, pero a niveles altos, debido a su respuesta no lineal, pueda llegar a superar la incandescente provocando una mayor molestia. La Figura 4.24 representa los valores de P_{lt_k} de las lámparas L1, C4, C5 y C2 normalizados con respecto a los valores obtenidos para el modelo de lámpara incandescente:

$$P_{lt_k}^N = \frac{P_{lt_k}^{LBE}}{P_{lt_k}^{IEC}} \quad (4.21)$$

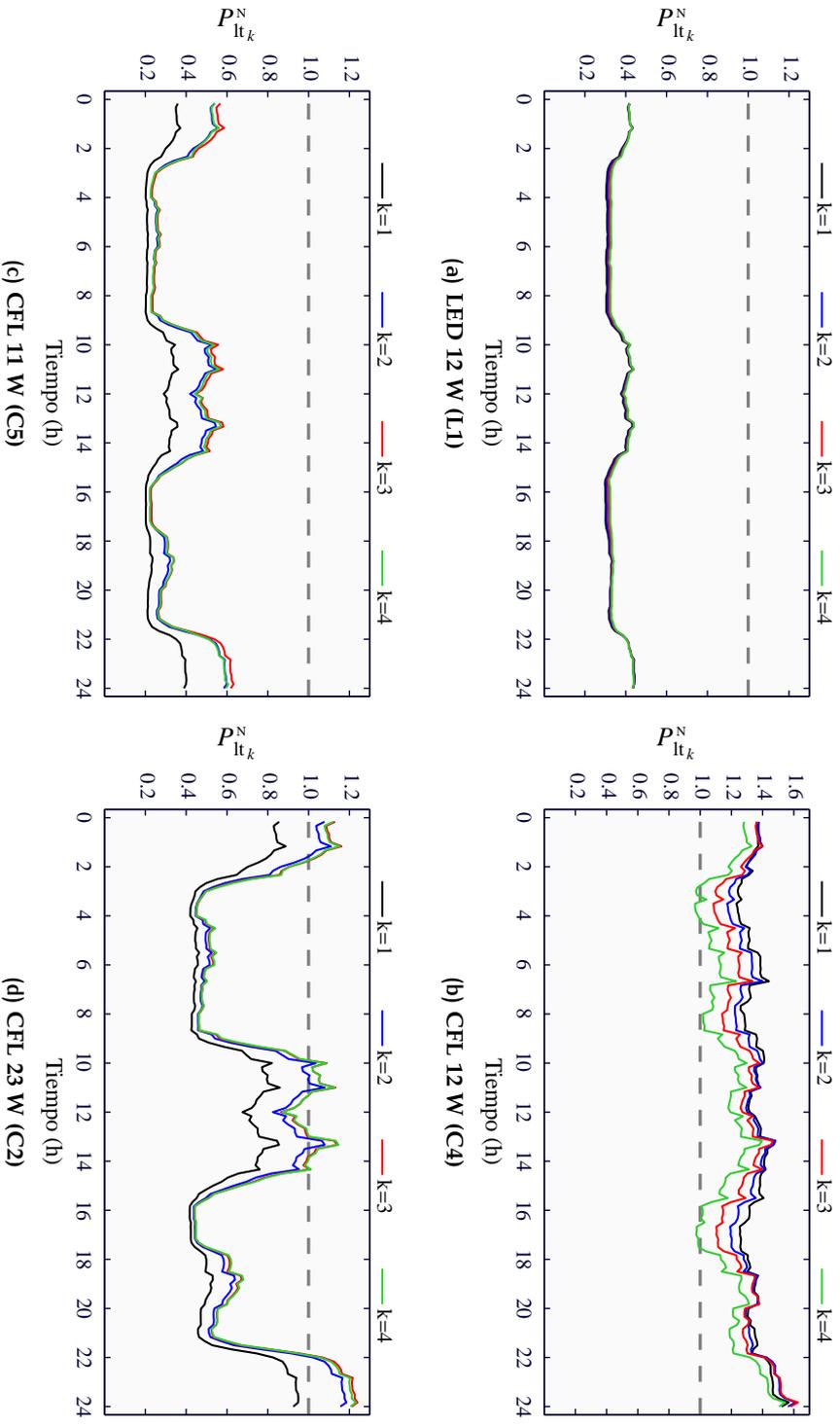


Figura 4.24. Valores de $P_{lt_k}^N$ de las lámparas L1, C4, C5 y C2 normalizados con respecto a los valores del modelo de lámpara incandescente.

La lámpara L1 presentaba una respuesta lineal ante fluctuaciones de tensión proporcionales a la fluctuación de tensión real original (Figura 4.21a). En la Figura 4.24a se observa que para $k = 1$ esta lámpara presenta una sensibilidad menor que el modelo de lámpara incandescente $P_{lt_k}^N < 1$. Debido a la respuesta lineal de L1 este comportamiento se mantiene para cualquiera de los factores k aplicados. La lámpara C4 presentaba una respuesta no lineal con valores de desviación negativos respecto a los esperados (Figura 4.23b). En la Figura 4.24b se observa que para $k = 1$ esta lámpara presenta una sensibilidad mayor que el modelo de lámpara incandescente. La respuesta no lineal de esta lámpara hace que la relación entre su sensibilidad y la del modelo de lámpara incandescente decrezca a medida que el factor k crece. Las lámparas C5 y C2 presentaban respuestas no lineales y en ambos casos con valores de severidad flicker superiores a los esperados (Figuras 4.22c y 4.22b). Sin embargo, la comparación de sus respuestas con respecto al modelo de lámpara incandescente revela diferencias significativas (Figuras 4.24c y 4.24d). En ambos casos, la no linealidad en sus respuesta hace que la relación con respecto al modelo de lámpara incandescente se vea incrementada a medida que el factor k aumenta. Para el caso de la lámpara C5 este comportamiento no resulta preocupante ya que en todos los niveles de severidad flicker su sensibilidad se encuentra por debajo del modelo de lámpara incandescente. Sin embargo, la respuesta no lineal de la lámpara C2 hace que en determinados intervalos de tiempo su sensibilidad se sitúe por encima del modelo de lámpara incandescente a medida que el factor k se incrementa.

Mediante el análisis de linealidad realizado se ha podido comprobar que, ante señales reales de tensión, varias de las lámparas bajo estudio presentan comportamientos no lineales, lo que les lleva incluso a superar la sensibilidad de la lámpara incandescente en determinadas situaciones. Este hecho dificulta, por tanto, el proceso de selección y modelado de una nueva lámpara de referencia y confirma la necesidad de realizar el estudio de su sensibilidad en distintos niveles de severidad flicker.

4.5 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se han presentado y analizado los resultados obtenidos del análisis de la respuesta de las nuevas tecnologías de iluminación ante distintos tipos de fluctuaciones de tensión. Todo el estudio se ha realizado en términos de severidad flicker, utilizando el flickermetro de luz como herramienta de análisis. Se ha descartado el uso del factor de ganancia al detectar que ante determinadas características frecuenciales en la luminosidad de las lámparas, dicho parámetro puede proporcionar una medida imprecisa de la sensibilidad.

A la hora de comparar la sensibilidad de las lámparas bajo estudio con la incandescente, y tomando como referencia los estudios de sensibilidad realizados hasta la fecha, las lámparas se han sometido a fluctuaciones simuladas de tensión con unos patrones específicos: modulaciones AM e interarmónicos. Al analizar la respuesta de las lámparas ante fluctuaciones de tensión provocadas por modulaciones AM se ha comprobado cómo, en general, la mayoría de las lámparas muestran un comportamiento medio menos sensible que la lámpara incandescente. Sin embargo, algunas lámparas fluorescentes, tanto LFL como CFL, presentan sensibilidades crecientes a medida que la frecuencia de la fluctuación aumenta, igualando o incluso superando la sensibilidad de la lámpara incandescente en determinadas bandas frecuenciales. Las conclusiones coinciden con el estudio realizado por [Chmielowiec](#)¹³ en el que la sensibilidad de algunas de las CFL analizadas se incrementaba a medida que se utilizaban frecuencias de la fluctuación más elevadas y difieren de [Cai](#)⁸ quien asumía la inmunidad de las nuevas tecnologías de iluminación. Los resultados obtenidos experimentalmente en estas pruebas han sido corroborados mediante pruebas subjetivas llevadas a cabo sobre un conjunto de personas que ha comparado las fluctuaciones de luminosidad producidas por las lámparas bajo estudio.

Además, el análisis de la respuesta de las lámparas bajo distintas condiciones de regulación ha permitido comprobar cómo la interacción entre el regulador de luz y la propia lámpara influye en la respuesta que éstas presentan a las fluctuaciones de tensión. En concreto, para niveles de luminosidad bajos las lámparas regulables pueden ver incrementada

su sensibilidad hasta valores que superan claramente a los de la lámpara incandescente.

El análisis de la respuesta de las lámparas ante interarmónicos ha demostrado que las nuevas tecnologías pueden ser sensibles a interarmónicos elevados mientras que la lámpara incandescente se mantiene inmune. A pesar de que los estudios existentes determinan que principalmente las nuevas lámparas son sensibles a los interarmónicos cercanos a armónicos impares^{12,21,25}, se ha demostrado que puede haber lámparas a las que les afecte también el tipo de fluctuación de tensión causada por interarmónicos cercanos a armónicos pares.

Por otro lado, ante la no uniformidad de la forma de onda y la complejidad espectral que presentan las fluctuaciones de tensión reales, se ha completado el estudio mediante el análisis de la respuesta de las lámparas a un conjunto de registros de tensión pertenecientes a localizaciones reales. Los resultados cuestionan aún más la asumida insensibilidad de las nuevas tecnologías de iluminación en comparación con la respuesta de la lámpara incandescente. Algunas de las lámparas analizadas muestran en ciertas localizaciones una sensibilidad claramente superior a la lámpara incandescente. Además, presentan sensibilidades divergentes entre las diferentes localizaciones así como discrepancias entre su respuesta ante fluctuaciones simuladas y reales. Es decir, existen lámparas cuyos comportamientos pueden resultar impredecibles ante fluctuaciones de tensión complejas. Este hecho dificulta la búsqueda de una nueva lámpara de referencia para el modelo de medida de flicker.

Otro aspecto crítico a analizar en la respuesta de las lámparas es su comportamiento en distintos niveles de severidad flicker. En general, las lámparas bajo estudio mostraban un comportamiento lineal ante fluctuaciones simuladas de tensión. De esta forma, lámparas menos sensibles que la incandescente seguirán presentando una sensibilidad menor a ésta ante cualquier nivel de severidad flicker. Sin embargo, al completar el estudio empleando señales reales, aplicando fluctuaciones proporcionales a la de la señal original, el comportamiento de varias de las lámparas es claramente no lineal. Es decir, ante señales más complejas no existe garantía de que lámparas caracterizadas

como menos sensibles que la incandescente sigan reproduciendo este comportamiento ante niveles de severidad flicker más elevados.

En definitiva, en vista de estas conclusiones, resulta erróneo asumir la menor sensibilidad de las nuevas tecnologías de iluminación con respecto a la lámpara incandescente. La proliferación de perturbaciones como los interarmónicos, la utilización cada vez más frecuente de reguladores de luz cuya interacción con lámparas regulables influye en la sensibilidad de éstas, la impredecible respuesta de algunas lámparas ante señales reales de tensión y el comportamiento no lineal detectado en muchas de las lámparas imposibilitan la identificación de una lámpara como la más sensible de entre todas las existentes actualmente en el mercado. Ante esta situación, la solución razonable a la medida del flicker no pasa por tratar de buscar una nueva lámpara de referencia, sino en controlar su respuesta a las fluctuaciones de tensión durante el propio proceso de fabricación de las lámparas, garantizando que las fluctuaciones de luminosidad no superen en ningún caso los niveles de compatibilidad actuales.

5

CONTROL DE LA INMUNIDAD A LAS FLUCTUACIONES DE TENSIÓN

*In order to compose, all you need to do is remember a
tune that nobody else has thought of.*

— Robert Schumann

Los resultados del [Capítulo 4](#) invalidan las soluciones planteadas por el grupo de trabajo C4.108 del CIGRE para reducir las discrepancias entre la medida y la verdadera percepción de la molestia. Por un lado, las nuevas tecnologías de iluminación eficientes, en comparación con la lámpara incandescente, no tienen por qué llevar asociada una menor sensibilidad a las fluctuaciones de tensión. La propuesta del grupo de incrementar los límites de compatibilidad de las fluctuaciones de tensión traería consigo más que un posible aumento de quejas por parte de los usuarios, sin aportar la solución al problema. Por otro lado, la variabilidad en las respuestas de algunas lámparas, dependiendo de la complejidad de la fluctuación de tensión, así como su posible comportamiento no lineal, imposibilitan la selección de una nueva lámpara de referencia que permitiera una adaptación del procedimiento de medida.

Ante estos hechos, la solución adecuada pasa por controlar la sensibilidad a las fluctuaciones de tensión de las nuevas tecnologías de iluminación en base a los niveles de compatibilidad actuales. De esta forma, manteniendo el procedimiento de medida de flicker actual, es el

sector de la iluminación el responsable de garantizar que fluctuaciones en la tensión de alimentación de las lámparas no generen flicker. En este capítulo se presenta un procedimiento ideado para controlar la inmunidad de las lámparas a las fluctuaciones de tensión.

Este procedimiento está diseñado para ser ejecutado durante la etapa de diseño e industrialización de una nueva lámpara. Con el objetivo de no ralentizar esta etapa de manera inasumible para los fabricantes, uno de los requisitos indispensables es el de incorporar el mínimo número de pruebas, con la duración mínima que permita evaluar la inmunidad de las lámparas. Estas pruebas se basan en los límites de compatibilidad actuales utilizando las fluctuaciones de tensión que componen la curva $P_{st} = 1$ ⁴⁸, de manera que valores por debajo de esta curva garanticen la ausencia de molestia. El control de la inmunidad de las lámparas se realiza mediante la medida de los valores de severidad flicker que éstas producen, utilizando para ello el flickermetro de luz.

Este capítulo recoge las principales características del procedimiento diseñado para la evaluación de la inmunidad de las lámparas, el cual ha sido incorporado en el informe técnico IEC TR-61547-1^{a53} del grupo TC34 MT1 del IEC, asociado al estándar IEC 61547⁵¹. En primer lugar, se describe el procedimiento a seguir en la evaluación de la inmunidad de las lámparas. A continuación, se describe el sistema de test del procedimiento y se presentan una serie de criterios mediante los cuales verificar la precisión del sistema y validar así las medidas proporcionadas por el mismo. A modo de ejemplo, y con el objetivo de analizar la validez y reproducibilidad del procedimiento, se presentan los resultados de inmunidad de un conjunto específico de lámparas. Estas lámparas han sido analizadas mediante el sistema descrito en el [Capítulo 3](#) dentro del trabajo de esta tesis, así como por el laboratorio de compatibilidad electromagnética del departamento de servicios de innovación de Philips.

^a IEC TR-61547-1: Equipment for general lighting purposes - EMC immunity - Part 1: An objective voltage fluctuation immunity test method.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO

Asumiendo la curva $P_{st} = 1$ como el umbral conocido de molestia, el control de la inmunidad de las lámparas consiste en someter a éstas a un conjunto de fluctuaciones de tensión de dicha curva, y analizar por medio del flickermetro de luz el nivel de severidad flicker que producen. El procedimiento establecido para evaluar la inmunidad de las lámparas es el siguiente:

1. En primer lugar, dependiendo del tipo de lámpara a analizar, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:
 - En aquellas lámparas que lo necesiten se debe aplicar un tiempo previo de estabilización necesario para alcanzar el nivel máximo y estable de su luminosidad.
 - Para aquellas lámparas regulables, la inmunidad debe ser evaluada también en condiciones de regulación, utilizando un regulador de luz compatible y aplicando un nivel de regulación correspondiente al $50\% \pm 10\%$ del nivel máximo de su luminosidad.
2. Se genera una fluctuación en la tensión de alimentación de la lámpara con unos niveles y frecuencia de fluctuación determinados. En concreto, se establece la utilización de fluctuaciones de tensión rectangulares de la forma:

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(2\pi f_0 t) \left\{ 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot \text{signum}(\sin(2\pi f_m t)) \right\} , \quad (5.1)$$

donde $\hat{u} = 230 \cdot \sqrt{2}$, $f_0 = 50$ Hz, y los valores de frecuencia de la fluctuación, f_m , y amplitud relativa de la fluctuación, $\frac{\Delta V}{V}$, son los detallados en la [Tabla 5.1](#), correspondientes a la curva umbral de molestia $P_{st} = 1$. Se aconseja una duración de la fluctuación de tensión y, por tanto, del registro de luminosidad, de al menos 180 s. De esta forma, se consideran 60 s necesarios para el transitorio de los filtros implementados en el flickermetro de luz y 120 s para la evaluación de un número entero de ciclos de la fluctuación de luminosidad.

f_m (cpm) ^a	$\frac{\Delta V}{V}$ (%)
39	0.894
110	0.722
1056	0.275
1620	0.407
4000	2.343

^a Cambio por minuto

Tabla 5.1. Especificaciones para las fluctuaciones de tensión rectangulares del procedimiento de evaluación de la inmunidad de las lámparas.

3. Se registra la luminosidad de la lámpara y se obtienen los valores de severidad flicker correspondientes, P_{st}^{LM} , por medio del flickermetro de luz. Si el valor de P_{st}^{LM} es inferior o igual a la unidad, la lámpara analizada presenta una sensibilidad menor o igual que la incandescente y, por tanto, se considera inmune a los límites de compatibilidad existentes. Si el valor de P_{st}^{LM} supera la unidad, la lámpara presenta una sensibilidad mayor que la lámpara incandescente, y no cumpliría con los niveles de compatibilidad establecidos.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TEST

En esta sección se describe el sistema de test necesario para llevar a cabo el control de inmunidad de las lámparas, así como el procedimiento de verificación establecido para validar la implementación del mismo. El sistema de test, mostrado en la [Figura 5.1](#), debe realizar las siguientes tres funciones principales.

En primer lugar, se **genera la señal de tensión** afectada por la fluctuación de tensión correspondiente y se amplifica hasta tener el nivel necesario para alimentar la lámpara a analizar. A continuación se realiza la **medida fotométrica** de la luminosidad de la lámpara situada en un entorno aislado de cualquier perturbación lumínica. La medida de la luminosidad se realiza mediante un sensor de luz y un amplificador de transimpedancia, el cual transforma la corriente del fotodiodo en la

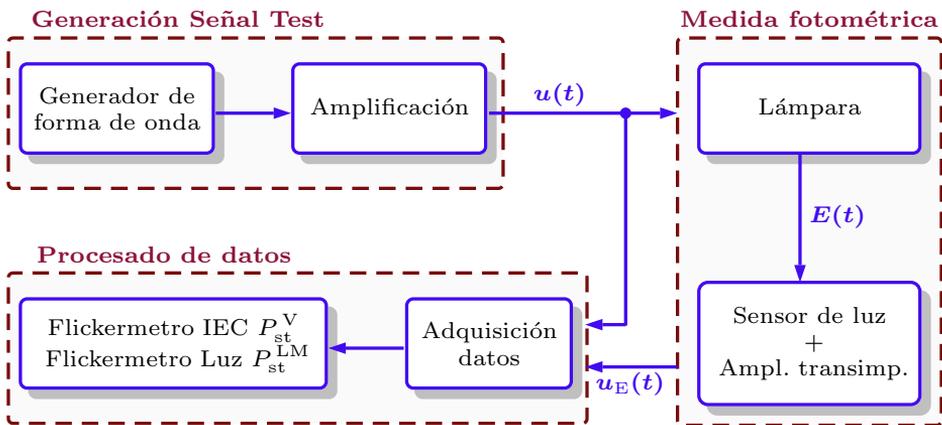


Figura 5.1. Diagrama de bloques del sistema de test del procedimiento de evaluación de la inmunidad de las lámparas.

tensión de salida $u_E(t)$. El sensor de luz debe cumplir con los requisitos de la curva de sensibilidad espectral de un observador estándar definido por CIE⁵⁵, mientras que la tensión de salida del amplificador debe variar linealmente con la luminosidad $E(t)$. Finalmente, **se adquieren los datos y se procesan** para obtener los valores de severidad flicker correspondientes. Por un lado, se debe adquirir la señal representativa de la luminosidad, $u_E(t)$, para obtener los valores de P_{st}^{LM} mediante el flickermetro de luz que permitan **analizar la inmunidad de la lámpara**. En la adquisición de esta señal se recomienda una frecuencia de muestreo mínima de 10 000 muestras/s para evitar el efecto de aliasing que pudieran introducir las componentes frecuenciales por encima de los 100 Hz, presentes en la luminosidad de algunas de las nuevas tecnologías de iluminación⁷⁹. Por otro lado, se requiere también la adquisición de la señal de tensión generada $u(t)$ para obtener los valores de P_{st}^V mediante el flickermetro IEC, utilizados para la verificación de la implementación del propio sistema de test.

Un aspecto crítico a la hora de elaborar el procedimiento para el control de la inmunidad de las lámparas es la definición de la implementación del flickermetro de luz. El flickermetro de luz a utilizar debe proporcionar medidas objetivas y reproducibles y, para ello, el proceso de calibración y verificación de esta herramienta resulta esencial.

5.2.1 Calibración del flickermetro de luz

Con el objetivo de completar la implementación del flickermetro de luz es necesario realizar su calibración. Calibrar consiste en, a partir de un punto de referencia de entrada, ajustar la implementación del flickermetro de luz para conseguir un determinado valor en su salida. Partiendo del estándar IEC 61000-4-15⁵⁰, se toma como punto de calibración la fluctuación sinusoidal de tensión de frecuencia 8.8 Hz y amplitud relativa 0.25 % que produce un valor de $P_{inst\ max} = 1$. En la calibración del flickermetro de luz, cuyo procedimiento se esquematiza en la **Figura 5.2**, es necesario utilizar como señal de entrada la luminosidad de la lámpara incandescente correspondiente a ese punto de calibración, distinguiéndose, por tanto, dos pasos. Por un lado, es necesario obtener la señal de luminosidad correspondiente al punto de calibración seleccionado. Por otro lado, es necesario aplicar una constante de ajuste, S , en el flickermetro de luz para que, ante la señal de luminosidad de calibración, a la salida del bloque C proporcione un valor de $P_{inst\ max} = 1$. Con ello se ajusta el valor interno del adaptador de luminosidad del bloque A y las ganancias de los filtros de los bloques B y C del flickermetro de luz.

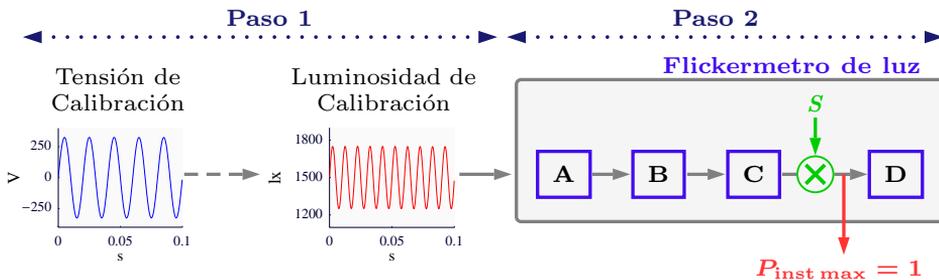


Figura 5.2. Procedimiento para la calibración de la implementación del flickermetro de luz.

El problema surge en el primer paso, a la hora de obtener la señal de luminosidad correspondiente al punto de calibración. Se puede pensar en seleccionar una lámpara incandescente real como referencia y utilizar la señal de luminosidad que produce cuando se le somete a la fluctuación de tensión definida como punto de calibración. Sin embargo, esta opción presenta varios inconvenientes. Por un lado, al sector

de la iluminación le resulta complicado mantener una determinada lámpara incandescente como referencia en el momento en el que se están dejando de fabricar este tipo de lámparas. Por otro lado, el análisis de sensibilidad de varias lámparas incandescentes muestra una cierta dispersión en los valores de severidad flicker. La [Figura 5.3](#) representa los valores de P_{st}^{LM} obtenidos para 8 lámparas incandescentes, sujetas a las fluctuaciones de tensión rectangulares correspondientes a la curva $P_{st} = 1$ (línea roja de la [Figura 4.4](#)). Estos resultados fueron obtenidos tras calibrar el flickermetro de luz mediante la luminosidad proporcionada por la lámpara incandescente representada con el color negro. Se observa una máxima dispersión cercana al 10 % entre los valores de severidad flicker de todas las lámparas incandescentes analizadas. Ante estos hechos, los fabricantes no ven posible definir y especificar una determinada lámpara incandescente como referencia para el calibrado del flickermetro de luz.

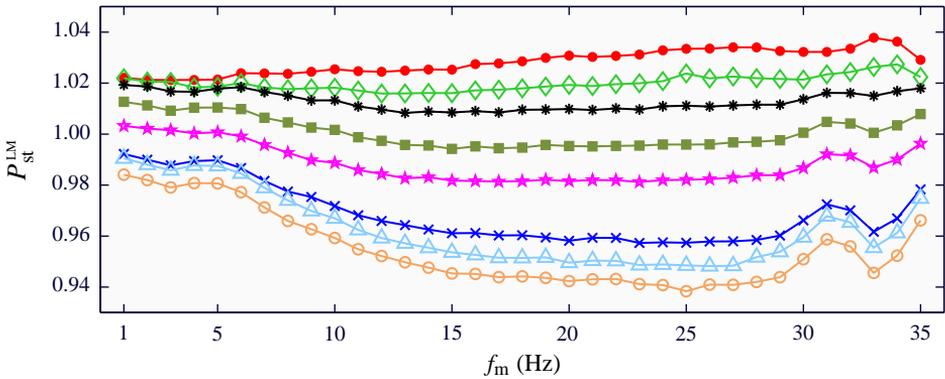


Figura 5.3. Valores de P_{st}^{LM} de 8 lámparas incandescentes sujetas a fluctuaciones rectangulares de tensión correspondientes a la curva $P_{st} = 1$.

La solución pasa por utilizar un modelado de lámpara incandescente de 60 W. En concreto, se propone la utilización de la implementación del modelo presentado por [Drapela y Slezingr²⁷](#). Este modelo consta de los tres bloques representados en la [Figura 5.4](#). El primer bloque consiste en un adaptador del nivel de tensión para independizar la medida del valor nominal de la tensión de red. El bloque 2 refleja la conversión de energía de entrada en la luminosidad de salida de una lámpara incandescente. Por último, en el bloque 3 se representa la respuesta de la lámpara

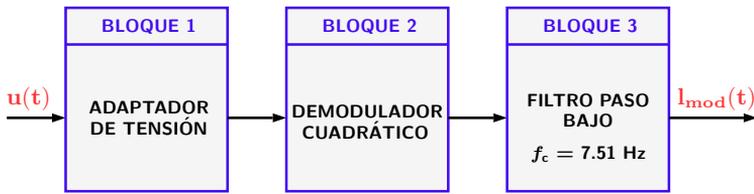


Figura 5.4. Diagrama de bloques del modelo de la lámpara incandescente de 60 W.

incandescente a las fluctuaciones de tensión mediante un filtro paso bajo de frecuencia de corte 7.51 Hz y función de transferencia:

$$F_L(s) = \frac{3.57}{0.02 \cdot 10^{-3} \cdot s^2 + 21.2 \cdot 10^{-3} \cdot s + 1} \quad (5.2)$$

El flickermetro de luz se calibra mediante la señal de luminosidad proporcionada por el modelo cuando se le aplica la fluctuación de tensión correspondiente al punto de calibración. De esta forma, la constante a aplicar a la salida del bloque C se corresponde con el valor $S = 3.944 \cdot 10^6$. Sin embargo, una vez realizada la calibración, se detectan inconsistencias en los resultados obtenidos al analizar la sensibilidad de varias lámparas incandescentes reales a las fluctuaciones de tensión correspondientes a la curva $P_{st} = 1$. Los valores de P_{st}^{LM} obtenidos, se alejan claramente de la referencia unidad. La [Tabla 5.2](#) muestra los valores de P_{st}^{LM} obtenidos para una lámpara incandescente real sujeta a varias fluctuaciones rectangulares de tensión correspondientes a la curva $P_{st} = 1$. En todos los puntos de prueba se observan desviaciones de más del 80 % con respecto al valor esperado.

f_m (cpm)	39	110	1056	1620	4000
P_{st}^{LM}	1.84	1.84	1.85	1.86	1.91

Tabla 5.2. Valores de P_{st}^{LM} obtenidos para una lámpara incandescente real mediante el flickermetro de luz calibrado a través del modelo de la [Figura 5.4](#) ($S = 3.944 \cdot 10^6$).

Estas diferencias derivan de la incapacidad del modelo de la [Figura 5.4](#) para representar el nivel de luminosidad real de una lámpara incandescente. Analizando el contenido espectral de la señal proporcionada por el modelo, l_{mod} , el modelo proporciona la relación

$\frac{\Delta L_{\text{mod}}}{L_{\text{mod}}}$ para una frecuencia de fluctuación de la luminosidad, donde $\Delta L_{\text{mod}}(t)$ es la amplitud de la componente de la fluctuación y L_{mod} es la amplitud de la componente continua. Sin embargo, el modelo no proporciona el nivel real de luminosidad y, por tanto, estos valores relativos no se corresponden con los valores reales que generaría una lámpara incandescente. Es decir, dos lámparas con curvas de ganancia relacionadas por un factor constante k para cualquier f_m , estarían representadas por el mismo modelo de lámpara, aunque éste no reflejaría la relación k entre sus sensibilidades.

Para resolver este problema es necesario que el modelo proporcione el valor real del nivel de luminosidad de la lámpara incandescente, $L_{\text{mod}}^{\text{R}}$, para obtener así valores válidos de $\frac{\Delta L}{L}$. Para obtener $L_{\text{mod}}^{\text{R}}$ se ha utilizado información acerca de la luminosidad tanto del modelo como de lámparas incandescentes reales según la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta L_{\text{mod}}}{L_{\text{mod}}^{\text{R}}} = \frac{\Delta L_{\text{inc}}}{L_{\text{inc}}} \rightarrow L_{\text{mod}}^{\text{R}} = \frac{\Delta L_{\text{mod}}}{\Delta L_{\text{inc}}/L_{\text{inc}}}, \quad (5.3)$$

donde el valor de ΔL_{mod} se obtiene mediante el modelo de la lámpara incandescente y $\Delta L_{\text{inc}}/L_{\text{inc}}$ se calcula de manera experimental a partir de la luminosidad real de varias lámparas incandescentes. En concreto, este último valor se obtuvo como el valor medio de los valores de $\Delta L_{\text{inc}}/L_{\text{inc}}$ obtenidos para 8 lámparas incandescentes sujetas a la fluctuación de tensión correspondiente al punto de calibración. Una vez calculado el valor real del nivel de luminosidad de una lámpara incandescente, $L_{\text{mod}}^{\text{R}}$, éste se aplica al modelo como se indica en la [Figura 5.5](#), reflejando la verdadera relación entre la amplitud de la fluctuación y el nivel de luminosidad de una lámpara incandescente.

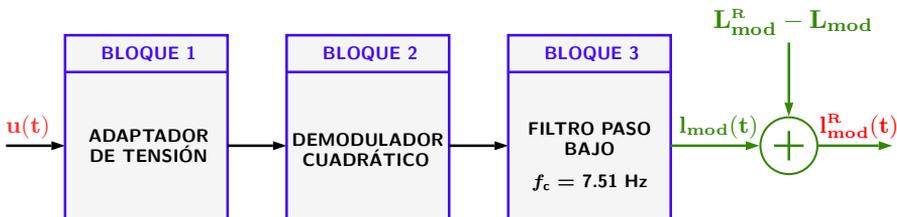


Figura 5.5. Diagrama de bloques del modelo modificado de la lámpara incandescente de 60 W.

Calibrando nuevamente el flickermetro de luz mediante el modelo de la [Figura 5.5](#) se obtiene una constante $S = 1.102 \cdot 10^6$. De esta forma, los valores de P_{st}^{LM} obtenidos para la lámpara incandescente real, mostradas en la [Tabla 5.3](#), se corresponden con los valores esperados al presentar desviaciones menores del 5 % con respecto al valor unidad de referencia.

f_m (cpm)	39	110	1056	1620	4000
P_{st}^{LM}	1.00	1.00	0.99	0.98	0.95

Tabla 5.3. Valores de P_{st}^{LM} obtenidos para una lámpara incandescente real mediante el flickermetro de luz calibrado a través del modelo de la [Figura 5.5](#) ($S = 1.102 \cdot 10^6$).

Una vez definida la manera correcta de calibrar el flickermetro de luz, existen varias alternativas a la hora de establecer los requisitos de la calibración de esta herramienta dentro de la definición del procedimiento de control de la inmunidad. La primera opción consiste en implementar el propio modelo de la lámpara incandescente para obtener así la señal de luminosidad con la que posteriormente calibrar el flickermetro de luz. Sin embargo, esta opción añade complejidad al propio procedimiento al ser necesaria la implementación de un elemento añadido, utilizado únicamente en la calibración del flickermetro de luz. La segunda opción consiste en proporcionar directamente la constante S de ajuste resultante de la calibración. Esta opción resta flexibilidad dentro de las implementaciones propias de cada herramienta, además de implicar la selección de una determinada implementación como referencia absoluta para la obtención de esa constante de ajuste S . La tercera opción, que es la incluida finalmente dentro del procedimiento, es la de proporcionar un patrón que caracteriza la señal de luminosidad resultante del modelo de la lámpara incandescente cuando la señal de entrada es una fluctuación sinusoidal de tensión de 8.8 Hz y 0.25 % de amplitud. De esta forma, el patrón de luminosidad proporcionado sigue la siguiente expresión:

$$E(t) = 1 + \frac{d_E}{2} \cdot \sin(2\pi f_m t) , \quad (5.4)$$

donde $f_m = 8.8$ Hz y $d_E = 0.630$ %.

La calibración del flickermetro de luz debe realizarse aplicando el patrón de luminosidad anterior, ante el cual se debe obtener un valor de $P_{\text{inst max}}$ igual a la unidad.

5.2.2 Verificación del sistema de test

Se han establecido una serie de ensayos para la verificación del sistema de test. Las diferentes pruebas se orientan hacia la comprobación de la correcta generación de la señal de tensión, la correcta medida de la señal de luminosidad y la correcta implementación del flickermetro de luz.

Verificación de la señal de tensión generada

Son cuatro los parámetros a controlar de la señal de tensión: por un lado, su valor eficaz y la frecuencia de su componente fundamental y, por otro, la frecuencia y la amplitud de la fluctuación.

Para una señal de tensión compuesta únicamente por la componente fundamental de 50 Hz se debe de cumplir que:

$$U_{ef} = 230 \text{ V} \pm 0.5 \% \quad (5.5)$$

$$f_0 = 50 \text{ Hz} \pm 0.5 \% \quad (5.6)$$

Para la verificación de la correcta generación de la fluctuación de tensión se especifican dos opciones. La primera de ellas se plantea como alternativa a aquellos que no dispongan, o no deseen implementar, un flickermetro IEC. Esta prueba consiste en la generación de una fluctuación rectangular de tensión, como indica la [Ecuación 5.1](#), donde $f_m = 2 \text{ Hz}$ y $\frac{\Delta V}{V} = 1\%$ de manera que se compruebe que:

$$\Delta u = 230\sqrt{2} \cdot \frac{\Delta V}{V} = 3.25 \text{ V} \pm 2 \% \quad (5.7)$$

$$f_m = 1 \text{ Hz} \pm 1 \% \quad (5.8)$$

Para la segunda opción es necesaria la generación de las fluctuaciones de tensión rectangulares cuyas características se especifican en la [Tabla 5.1](#) y que producen un valor de $P_{st} = 1$ en una lámpara incandescente.

Mediante el flickermetro IEC se debe obtener por un lado, el nivel de ruido del propio flickermetro ante una señal de tensión sin fluctuación y por otro, los valores de severidad flicker obtenidos para las fluctuaciones rectangulares anteriores de manera que se cumpla que:

$$P_{st}^V \Big|_{\text{ruido}} < 0.1 \quad (5.9)$$

$$P_{st}^V = 1 \pm 2\%. \quad (5.10)$$

Verificación de la medida fotométrica

Se debe comprobar el correcto funcionamiento del sensor y del amplificador de transimpedancia utilizado en la captación de la luminosidad de la lámpara, así como la idoneidad del espacio físico habilitado para la instalación de la lámpara y el sensor. Para ello se establecen los siguientes requisitos:

1. Comprobar la ausencia de una tensión de *offset* cuando el fotodiodo del sensor de luz no esté captando ningún tipo de señal. Cubriendo el sensor de manera que no entre nada de luz, la tensión a la salida del amplificador de transimpedancia debe ser menor del 0.1 % de su valor máximo.
2. Se debe comprobar que la tensión de salida del amplificador de transimpedancia varíe linealmente con la distancia existente entre el sensor de luz y la lámpara de manera $1/r^2$.
3. Comprobar que, si la luminosidad de una lámpara se mantiene constante, el valor de severidad flicker obtenido sea nulo. En caso contrario, el valor residual de severidad flicker medido será el producido por la combinación del sensor, amplificador y flickermetro de luz. Se establece que, para una lámpara incandescente o halógena alimentadas mediante una tensión sinusoidal de 50 Hz, el valor de severidad flicker proporcionado por el flickermetro de luz debe satisfacer:

$$P_{st}^{LM} \Big|_{\text{ruido}} < 0.1 \quad (5.11)$$

Verificación del flickermetro de luz

Al igual que lo establecido para el proceso de calibración del flickermetro de luz, en su verificación se especifican las características de un determinado patrón de luminosidad obtenido a partir del modelo de la lámpara incandescente de la [Figura 5.5](#). De esta forma, se determinan los patrones de luminosidad correspondientes a las fluctuaciones rectangulares de tensión de la [Tabla 5.1](#), correspondientes a la curva $P_{st} = 1$:

$$E(t) = \left\{ 1 - \frac{d_r}{2} \cdot \cos(2\pi f_r t) \right\} \cdot \left\{ 1 + \frac{d_E}{2} \cdot \text{signum}(\sin(2\pi f_m t)) \right\} , \quad (5.12)$$

donde $f_r = 100$ Hz, $d_r = 22\%$ y los valores de f_m y d_E son los especificados en la [Tabla 5.4](#).

f_m (cpm)	d_E (%)
39	2.5386
110	2.0473
1056	0.6832
1620	0.7780
4000	2.0027

Tabla 5.4. Especificaciones para el patrón de luminosidad utilizado en la verificación del flickermetro de luz.

Utilizando estos patrones de luminosidad, los valores de severidad flicker proporcionados por el flickermetro de luz deben cumplir:

$$P_{st}^{LM} = 1 \pm 5\% . \quad (5.13)$$

Se debe comprobar además, el rango de funcionamiento del propio flickermetro de luz. Para ello, se debe repetir la prueba con los valores de amplitud relativa de la fluctuación de luminosidad, d_E , de la [Tabla 5.4](#) multiplicados por los factores $\alpha = \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 2, 3, 4$ y 5. Utilizando estos nuevos patrones de luminosidad, los valores de severidad flicker proporcionados por el flickermetro de luz deben cumplir:

$$\left| \frac{\alpha - P_{st}^{LM}}{\alpha} \right| < 5\% . \quad (5.14)$$

5.3 APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO

Con el objetivo de comprobar la reproducibilidad de los resultados y la validez del procedimiento se seleccionó un conjunto de lámparas a las que realizar el control de su inmunidad. Estas lámparas fueron analizadas dentro del trabajo realizado en esta tesis mediante el sistema de test descrito en el [Capítulo 3](#) (identificado en adelante como UPV/EHU^b), así como por el laboratorio de compatibilidad electromagnética del departamento de servicios de innovación de la empresa Philips. El conjunto de lámparas seleccionadas para este análisis se corresponde con las especificadas en la [Tabla 5.5](#).

Id.	Descripción
I2	Incandescente 60 W (Philips)
I3	Incandescente 60 W (Gamma)
C6	CFL 8 W (Philips)
C7	CFL 20 W (Philips)
L3	LED 20 W (Philips)

Tabla 5.5. Conjunto de lámparas sometidas al procedimiento de control de la inmunidad.

Antes de llevar a cabo las pruebas de las que se compone el procedimiento, los sistemas de test implementados tanto por Philips como por la UPV/EHU fueron calibrados y verificados, constatando que cumplían con los requerimientos establecidos en el apartado de verificación del sistema de test que incluye el propio protocolo de inmunidad.

La [Tabla 5.6](#) muestra los valores de P_{st}^{LM} obtenidos para cada punto de prueba de la [Tabla 5.1](#). En concreto, la [Tabla 5.6a](#) representa los resultados obtenidos por la UPV/EHU y la [Tabla 5.6b](#) representa los valores obtenidos por el laboratorio de Philips. La lámpara I3 sólo pudo ser analizada por Philips, ya que sufrió daños durante el transporte y llegó en mal estado a la UPV/EHU.

^b UPV/EHU: Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea.

Id.	f_m (cpm)					Id.	f_m (cpm)				
	39	110	1056	1620	4000		39	110	1056	1620	4000
I2	0.82	0.82	0.73	0.68	0.65	I2	0.83	0.83	0.73	0.69	0.66
I3	-	-	-	-	-	I3	0.98	0.98	0.98	0.98	1.00
C6	0.29	0.29	0.32	0.41	0.68	C6	0.28	0.28	0.31	0.39	0.66
C7	0.04	0.04	0.04	0.05	0.11	C7	0.04	0.04	0.05	0.06	0.15
L3	0.37	0.34	0.34	0.30	0.20	L3	0.38	0.38	0.39	0.38	0.40

(a) UPV/EHU (b) Philips

Tabla 5.6. Valores de P_{st}^{LM} obtenidos al aplicar el procedimiento de control de la inmunidad al conjunto de lámparas bajo estudio.

Se puede observar que existe una gran correlación entre los valores obtenidos por la UPV/EHU y por Philips, demostrando por tanto la reproducibilidad del procedimiento. Las mayores diferencias se observan para la lámpara L3. Sin embargo, estas diferencias son consecuencia del comportamiento errático e inestable mostrado por la propia lámpara durante las pruebas. Por otro lado, se pueden observar diferencias en los comportamientos de ambas lámparas incandescentes (I2, I3). La lámpara I3 se corresponde con una lámpara incandescente estándar de 60 W, y como tal, ante las fluctuaciones rectangulares de la [Tabla 5.1](#) los valores de P_{st}^{LM} se encuentran muy cercanos al valor unidad. Por el contrario, la lámpara I2 es un tipo de lámpara incandescente de 60 W diseñada para poder ser resistente a vibraciones y a perturbaciones externas que pudieran dañar el filamento de la lámpara. Debido a las características específicas de su filamento, esta lámpara incandescente presenta valores de P_{st}^{LM} por debajo de la unidad.

En el análisis de inmunidad realizado a este conjunto de lámparas se ha comprobado que todas ellas presentan un comportamiento menos sensible que la lámpara incandescente I3. Sin embargo, estos resultados no deben ser generalizados a cualquier lámpara. En la [Tabla 5.7](#) se muestran valores de P_{st}^{LM} adicionales obtenidos por la UPV/EHU al aplicar el procedimiento de control de la inmunidad a otras de las lámparas de la [Tabla 3.1](#). Se puede comprobar que, para algunas de las frecuencias de la fluctuación, estas lámparas presentan un comportamiento más sensible que la lámpara incandescente, $P_{st}^{LM} > 1$. Ante la dispersión existente en los valores de sensibilidad de las nuevas

tecnologías de iluminación, la existencia de un procedimiento para el control de la inmunidad de las lámparas adquiere, aún si cabe, mayor importancia.

Id.	f_m (cpm)				
	39	110	1056	1620	4000
F1	0.36	0.36	0.40	0.50	1.37
C3	0.51	0.53	0.60	0.75	1.61
C4	1.06	1.05	0.87	0.68	1.28

Tabla 5.7. Valores de P_{st}^{LM} obtenidos al aplicar el procedimiento de control de la inmunidad a las lámparas F1, C3 y C4.

5.4 RESUMEN DEL CAPÍTULO

Ante la dificultad de establecer una nueva lámpara de referencia para la medida del flicker y con el objetivo de mantener los límites de compatibilidad actuales, este capítulo recoge un procedimiento para el control de la inmunidad de las lámparas, a realizar durante el proceso de diseño y fabricación de las mismas. Este procedimiento busca comprobar que las lámparas muestran una sensibilidad igual o inferior a la de la lámpara incandescente para un conjunto de fluctuaciones rectangulares de la curva $P_{st} = 1$. El procedimiento ha sido aceptado e incorporado en el informe técnico IEC TR-61547-1⁵³ del grupo de trabajo TC34 MT1 del IEC, con el objetivo de considerar la incorporación de un procedimiento similar en el estándar de inmunidad para equipos de iluminación de uso general IEC 61547⁵¹.

El punto crítico del proceso fue la definición de la implementación de un flickermetro de luz que sirviera como referencia a la hora de obtener resultados válidos y reproducibles entre aquellas entidades que ejecuten el procedimiento del control de inmunidad. Para calibrar y validar esta herramienta no es viable utilizar la luminosidad de una lámpara incandescente universal. Como solución se ha optado por definir un modelo analítico de lámpara incandescente mediante el cual establecer el

patrón de luz a utilizar durante el proceso de calibración del flickermetro de luz, así como los patrones que permiten su verificación.

Una vez definido el procedimiento, se ha corroborado su validez y la reproducibilidad de sus resultados a través del análisis de la inmunidad de un conjunto de lámparas realizado en conjunto con la empresa Philips. Se han obtenido prácticamente los mismos resultados en todas las lámparas analizadas, presentando todas ellas una inmunidad a las fluctuaciones de tensión mayor que la lámpara incandescente. Aplicando el procedimiento a otro conjunto de lámparas se ha podido comprobar también la validez del método a la hora de identificar lámparas que se comportan de manera más sensible que la incandescente y, por lo tanto, que no pueden clasificarse como inmunes a las fluctuaciones de tensión.

6 | CONCLUSIONES

*If we all did the things we are capable of doing, we
would literally astound ourselves.*

— Thomas A. Edison

El trabajo ha intentado aclarar el futuro incierto del marco de regulación del flicker ante la retirada de la lámpara incandescente y la utilización de nuevas tecnologías de iluminación más eficientes. Las principales conclusiones del trabajo de tesis han sido las siguientes.

En primer lugar, el profundo análisis de sensibilidad realizado a diferentes tecnologías de iluminación ha permitido demostrar, de manera concluyente, la invalidez de las propuestas orientadas hacia la modificación del flickermetro IEC y de los niveles de compatibilidad actuales en base a la búsqueda de una nueva lámpara de referencia. Se ha podido comprobar que las nuevas tecnologías de iluminación no tienen por qué llevar asociada una menor sensibilidad a las fluctuaciones de tensión que la que presenta la lámpara incandescente. Además, el sector de la iluminación actual no está orientado hacia la mejora de la sensibilidad de las nuevas lámparas a las fluctuaciones de tensión y, por tanto, el rápido avance tecnológico que presenta este sector obligaría a un constante análisis y, por consiguiente, una continua redefinición de los niveles de compatibilidad establecidos.

Desaconsejando modificaciones dentro del marco actual de regulación del flicker, la segunda conclusión del trabajo plantea la necesidad de garantizar en el propio proceso de fabricación de las lámparas que no sean más sensibles que la lámpara incandescente a las fluctuaciones de tensión. Son, por tanto, los propios fabricantes los que deben controlar la inmunidad que presentan sus lámparas a las fluctuaciones de tensión.

Para ello, es necesario el establecimiento de un procedimiento de pruebas que, manteniendo el flickermetro IEC como el medidor de flicker de referencia y los actuales niveles de compatibilidad, garantice la ausencia de molestia.

En este capítulo se resumen las principales aportaciones obtenidas del trabajo de tesis doctoral. Además se exponen las fuentes de financiación en las que se ha sustentado el trabajo así como la difusión de los resultados realizada. Finalmente, se detallan algunas de las posibles líneas futuras de trabajo derivadas del presente trabajo de tesis.

6.1 APORTACIONES DE LA TESIS

Acorde a los objetivos parciales planteados en el [Capítulo 1](#) las aportaciones del trabajo realizado en esta tesis son las siguientes:

1. *Selección del flickermetro de luz como la herramienta de análisis correcta para el estudio de la sensibilidad de las lámparas a las fluctuaciones de tensión.* Se desaconseja el uso del factor de ganancia ya que, ante determinadas características frecuenciales en la luminosidad de algunas lámparas, componentes distintas a la frecuencia de fluctuación no son consideradas a la hora de analizar la sensibilidad.
2. *Estudio de la sensibilidad de las lámparas a fluctuaciones simuladas de tensión.* Siguiendo la metodología utilizada en los estudios de sensibilidad realizados hasta la fecha (detallados en el [Capítulo 2](#)) se ha tomado como patrón las fluctuaciones de tensión provocadas por modulaciones AM e interarmónicos. Para el caso de modulaciones AM, los resultados obtenidos muestran en general un comportamiento menos sensible por parte de las lámparas analizadas en comparación con la lámpara incandescente. Sin embargo, cabe destacar que algunas lámparas fluorescentes, tanto LFL como CFL, muestran un incremento en su sensibilidad a medida que la frecuencia de la fluctuación aumenta, llegando incluso a superar a la incandescente. El estudio de la sensibilidad de varias lámparas regulables ha demostrado que la sensibilidad

de algunas de estas lámparas se incrementa a medida que el nivel de luminosidad decrece, llegando a valores que superan la sensibilidad de la lámpara incandescente en algunos casos. Para el caso de interarmónicos, se ha podido comprobar que tecnologías como las CFL o LED pueden verse afectadas por este tipo de fluctuaciones de tensión a diferencia de la lámpara incandescente que se muestra inmune. Además, se ha demostrado que las lámparas pueden ser sensibles a interarmónicos cercanos a armónicos tanto pares como impares.

3. *Estudio de sensibilidad de las lámparas ante fluctuaciones reales de tensión.* Se ha analizado la sensibilidad de las lámparas ante registros de tensión obtenidos en cuatro localizaciones reales. Los resultados obtenidos cuestionan aún más la asumida insensibilidad de las nuevas tecnologías de iluminación a las fluctuaciones de tensión. Existen lámparas cuya sensibilidad es claramente superior a la lámpara incandescente en algunas localizaciones, demostrando que su comportamiento ante fluctuaciones simuladas de tensión no resulta representativo de su comportamiento real debido a la complejidad frecuencial de éstas. Además, se ha podido comprobar que la respuesta de algunas lámparas varía significativamente entre diferentes localizaciones mostrando, por tanto, comportamientos impredecibles ante fluctuaciones reales de tensión. Estos resultados dificultan la búsqueda de una nueva lámpara de referencia para el modelo de medida del flicker.
4. *Estudio de sensibilidad de las lámparas en distintos niveles de severidad flicker.* En este estudio se han empleado tanto fluctuaciones simuladas como reales de tensión asociadas a distintos niveles de severidad flicker. Ante fluctuaciones simuladas de tensión, la mayoría de las lámparas analizadas presentan ligeras desviaciones de su comportamiento ideal lineal dependiendo de la frecuencia de la fluctuación y el factor de proporcionalidad aplicado. Ante señales reales de tensión varias de las lámparas muestran respuestas claramente no lineales con elevadas desviaciones de su comportamiento ideal lineal. Esto implica que, ante fluctuaciones de tensión complejas, lámparas caracterizadas como menos sensibles que la incandescente en niveles de severidad flicker igual a la unidad, presenten comportamientos impredecibles,

pudiendo incluso superar a la lámpara incandescente, en niveles de severidad flicker superiores. Es decir, el comportamiento no lineal de las lámparas complica, aún más si cabe, la identificación de una nueva lámpara de referencia como la más sensible de entre todas las existentes actualmente.

5. *Definición de un procedimiento para el control de la inmunidad de las lámparas a las fluctuaciones de tensión.* A partir de los niveles de compatibilidad establecidos para la lámpara incandescente se ha diseñado un sistema de test y un conjunto de pruebas con las que controlar la inmunidad de las lámparas en su proceso de fabricación. El control se realiza utilizando patrones de fluctuación de tensión provocados por modulaciones AM y correspondientes a la curva $P_{st} = 1$, referencia de compatibilidad electromagnética. Las lámparas para considerarse inmunes deben de producir, ante estas fluctuaciones de tensión, niveles de severidad flicker iguales o inferiores a la unidad.

Uno de los aspectos importantes a la hora de definir el procedimiento era el de establecer una implementación del flickermetro de luz válida, consistente y que permitiera obtener resultados reproducibles entre todos aquellos que quisieran realizar el control de inmunidad de un conjunto de lámparas. El principal aspecto crítico a la hora de establecer estas especificaciones era la obtención de las señales de luminosidad utilizadas en el proceso de calibración y verificación de la implementación del flickermetro de luz. Se ha optado por el establecimiento de un conjunto de patrones de luminosidad obtenidos a partir de un preciso modelo de lámpara incandescente.

6.2 PROYECTOS

La presente tesis doctoral ha sido financiada a través de una beca de investigación predoctoral (P1) y de dos proyectos de investigación concedidos por la Universidad del País Vasco (P2) y el Ministerio de Economía y Competitividad (P3).

- P1** *Ayuda predoctoral para la formación de personal investigador no doctor.*
Ref: BFI2012-315
Departamento de Educación, Universidades e Investigación del Gobierno Vasco.
Participante: Grupo de Señal y Comunicaciones (GSC).
Enero 2013 - Diciembre 2016.
- P2** *Unidad de Formación e Investigación en Telecomunicaciones y Electrónica.*
Ref: UFI11/16
Universidad del País Vasco (UPV/EHU).
Participantes: Grupo APERT; Grupo APG; Grupo I²T; Grupo GSC (Todos de la UPV/EHU).
Enero 2012 - Diciembre 2015.
- P3** *Hacia una revisión de la medida del flicker según la norma IEC 61000-4-15. Implicaciones en la caracterización de la calidad en la generación con turbinas eólicas.*
Ref: ENE2009-13978-C02-02
Ministerio de Economía y Competitividad.
Participantes: Universidad de Cantabria y Universidad del País Vasco (UPV/EHU).
Enero 2010 - Diciembre 2012.

6.3 DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La difusión de los resultados de esta tesis ha quedado avalada mediante publicaciones en comités de estudio y regulación internacionales (I1 y I2), en revistas científicas (A1, A2, A3 y A4) y mediante ponencias en congresos internacionales (C1, C2 y C3).

6.3.1 Publicaciones

Comités de estudio y regulación internacionales

I1 **Título:** *"TB656 Review of LV and MV compatibility levels for voltage fluctuations"*

Tipo Documento: Informe final del grupo de trabajo C4.111 del CIGRE

Fecha: Mayo de 2016

Aportaciones: El informe recoge los resultados del estudio de sensibilidad con fluctuaciones simuladas y reales presentado en el [Capítulo 4](#). El grupo de trabajo concluyó que no se puede afirmar, de forma general, que las nuevas tecnologías de iluminación sean menos sensibles a las fluctuaciones de tensión que la lámpara incandescente. Además, el grupo remarcaba la falta de correlación existente entre el comportamiento de las lámparas ante fluctuaciones simuladas de tensión y el mostrado ante señales reales de tensión.

I2 **Título:** *"34/212/DTR IEC TR 61547-1:2015 Equipment for general lighting purposes - EMC immunity requirements - Part 1: An objective voltage fluctuation immunity test method"*

Tipo Documento: Informe técnico del grupo de trabajo TC34 MT1 del IEC

Fecha: Abril de 2015

Aportaciones: El informe recoge el procedimiento para el control de la inmunidad de las lámparas a las fluctuaciones de tensión descrito en el [Capítulo 5](#). El informe establece además la necesidad de considerar la incorporación de un procedimiento similar en el estándar de inmunidad para equipos de iluminación de uso general IEC 61547.

Artículos en revistas

A1 Título: *"Flicker characteristics of efficient lighting assessed by the IEC flickermeter"*

Autores: I. Azcarate, J.J. Gutierrez, P. Saiz, A. Lazkano, L.A. Leturiondo, K. Redondo

Publicación: Electric Power Systems Research vol.107, pp.21–27, Febrero 2014

Indicador de calidad: JCR 1.749 (Q2).

Aportaciones: En esta publicación se recoge el estudio para seleccionar el flickermetro de luz como herramienta de análisis para el estudio de sensibilidad y se presentan los primeros resultados del estudio de sensibilidad de un conjunto de lámparas utilizando fluctuaciones de tensión provocadas por modulaciones AM sinusoidales.

A2 Título: *"Experimental study of the response of efficient lighting technologies to complex voltage fluctuations"*

Autores: I. Azcarate, J.J. Gutierrez, A. Lazkano, P. Saiz, K. Redondo, L.A. Leturiondo

Publicación: Electrical Power and Energy Systems vol.63, pp.499–506, Diciembre 2014

Indicador de calidad: JCR 2.587 (Q1).

Aportaciones: En esta publicación se completa el estudio de sensibilidad mediante los resultados obtenidos ante fluctuaciones de tensión provocadas por modulaciones AM rectangulares y por los resultados obtenidos con la utilización de los registros reales de tensión. Finalmente, recogiendo las conclusiones de este artículo y del artículo [A1](#) se desaconseja la modificación de la regulación actual para la medida de flicker en base a la búsqueda de una nueva lámpara de referencia y se orienta la solución hacia la incorporación de controles de inmunidad a la hora de diseñar y fabricar las lámparas.

A3 Título: *"Towards limiting the sensitivity of energy-efficient lighting to voltage fluctuations"*

Autores: I. Azcarate, J.J. Gutierrez, A. Lazkano, P. Saiz, K. Redondo, L.A. Leturiondo

Publicación: Renewable and Sustainable Energy Reviews vol.59,

pp.1384–1395, Junio 2016

Indicador de calidad: JCR 6.798 (Q1).

Aportaciones: En esta publicación se recoge todo el estado del arte relacionado con el estudio de la sensibilidad de las lámparas a las fluctuaciones de tensión. En vista de la falta de consenso en los resultados obtenidos en los diferentes estudios, se presenta finalmente como solución la implantación de un procedimiento para el control de la inmunidad a las fluctuaciones de tensión para las lámparas en su proceso de fabricación. Este reto lo afronta el grupo TC34 MT1 del IEC estableciendo como aspectos claves la selección de la herramienta de análisis y la definición de las pruebas que conformarían el procedimiento.

A4 Título: "*Sensitivity of modern lighting technologies at different flicker severity levels*"

Autores: J.J. Gutierrez, P. Saiz, I. Azcarate, L.A. Leturiondo, K. Redondo, S. Ruiz de Gauna, Digna M. Gonzalez-Otero

Publicación: IEEE Transactions on Power Delivery (En revisión)

Indicador de calidad: JCR 2.032 (Q2).

Aportaciones: En esta publicación se recogen los resultados del estudio de sensibilidad realizado a las lámparas en distintos niveles de severidad flicker. Varias de las lámparas analizadas presentaban comportamientos no lineales principalmente con señales complejas como las señales reales de tensión. Ante estos comportamientos, se recomienda la incorporación de algún tipo de prueba en el procedimiento para el control de la inmunidad de las lámparas.

Congresos internacionales

C1 Título: "*Sensitivity to Flicker of Dimmable and Non-dimmable Lamps*"

Autores: I. Azcarate, J.J. Gutierrez, A. Lazkano, P. Saiz, L.A. Leturiondo, K. Redondo

Tipo de participación: Presentación oral

Congreso: IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012, Graz (Austria)

Publicación: Proceedings, pp.344–347

Aportaciones: En este congreso se presentaron los primeros

resultados de sensibilidad en curvas de ganancia de las lámparas analizadas, utilizando fluctuaciones de tensión provocadas por modulaciones AM sinusoidales.

- C2 Título:** *"Type Testing of a Highly Accurate Illuminance Flickermeter"*
Autores: I. Azcarate, J.J. Gutierrez, A. Lazkano, L.A. Leturiondo, P. Saiz, K. Redondo
Tipo de participación: Presentación oral
Congreso: IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012, Hong Kong (China)
Publicación: Proceedings, pp.897-903
Aportaciones: En este congreso se presentó la implementación del flickermetro de luz utilizado para el estudio de sensibilidad de las lámparas a las fluctuaciones de tensión.
- C3 Título:** *"A Protocol to Test the Sensitivity of Lighting Equipment to Voltage Fluctuations"*
Autores: J.J. Gutierrez, P. Beeckman, I. Azcarate
Tipo de participación: Presentación oral
Congreso: CIRED 23rd International Conference on Electricity Distribution, 2015, Lyon (Francia)
Publicación: Proceedings, Paper0409
Aportaciones: En este congreso se presentó el procedimiento para el control de la inmunidad de las lámparas a las fluctuaciones de tensión detallando los aspectos críticos a los que nos enfrentamos a la hora de especificar una implementación válida del flickermetro de luz.

6.4 LÍNEAS FUTURAS

Los resultados obtenidos a través de este trabajo de tesis permiten apuntar a diferentes direcciones futuras de investigación:

- Completar el procedimiento de inmunidad de las lámparas para evaluar características adicionales en la respuesta de las lámparas que pueden comprometer la inmunidad de éstas a las fluctuaciones de tensión. El estudio realizado en el [Capítulo 4](#)

ha demostrado que, a diferencia de la lámpara incandescente, existen lámparas que pueden presentar comportamientos no lineales y ser sensibles a fluctuaciones de tensión provocadas por interarmónicos. Por ello, resulta necesario incorporar al procedimiento pruebas que permitan evaluar la inmunidad de las lámparas ante estos dos nuevos escenarios. Por un lado, es necesario controlar la inmunidad de las lámparas en distintos niveles de severidad flicker ya que la no linealidad en la respuesta de una lámpara puede comprometer su inmunidad en niveles de severidad flicker diferentes al establecido en el procedimiento como referencia, $P_{st} = 1$. Por otro lado, es necesario establecer un criterio mediante el cual poder controlar la inmunidad de las lámparas a fluctuaciones provocadas por interarmónicos en la tensión superiores a 100 Hz.

- Medida del efecto estroboscópico en la luz^{5,67}. En la caracterización de la calidad de la luz proporcionada por una lámpara, el sector de la iluminación distingue dos efectos diferentes: el flicker y el efecto estroboscópico. El efecto estroboscópico se define como el cambio en la percepción del movimiento de un observador estático en un entorno no estático, inducido por una fuente de luz cuya luminosidad fluctúa con el tiempo. Mientras que para el flicker existen métricas que permiten caracterizarlo, como el P_{st} definido por IEC, no ocurre lo mismo para el efecto estroboscópico. Es necesario por tanto, establecer un procedimiento que permita la medida de este efecto y la definición de límites que permitan su control.

A | ENSAYOS DE VERIFICACIÓN SEGÚN EL ESTÁNDAR IEC 61000-4-15

El estándar IEC 61000-4-15 define un número de ensayos, compuestos por distintas señales de tensión, con el objetivo de evaluar el funcionamiento de un flickermetro y la exactitud de sus medidas. Además, estas pruebas permiten clasificar a los flickermetros en tres clases diferentes: F1, F2 y F3. En el proceso de verificación, un flickermetro básico (F3) debe proporcionar una desviación menor del $\pm 8\%$ con respecto al límite impuesto para el ensayo 1 y del $\pm 5\%$ para el ensayo 2. Para poder clasificar un flickermetro como altamente preciso (F1), éste debe proporcionar además desviaciones por debajo de los límites especificados para los demás ensayos que componen el proceso de verificación. En la [Tabla A.1](#) se presenta un resumen de todas estas pruebas y el parámetro de salida a analizar en cada una de ellas.

a.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Las especificaciones de los ensayos que aquí se presentan se corresponden con las definidas para un medidor de flicker de 230 V/50 Hz.

Ensayo	Características de la tensión	Parámetro de salida	Clase del Flickermetro		
1	Fluctuaciones sinusoidales y rectangulares.	P_{inst}	F1	F2	F3
2	Fluctuaciones rectangulares.	P_{st}	F1	F2	F3
3	Cambios de frecuencia.	P_{inst}	F1		
4	Tensión distorsionada con múltiples pasos por cero.	P_{inst}	F1		
5	Armónicos con banda lateral.	P_{inst}	F1		
6	Salto de fase.	P_{st}	F1		
7	Fluctuaciones rectangulares con ciclo trabajo.	P_{st}	F1	F2	

Tabla A.1. Resumen de las especificaciones de los ensayos de verificación del flickermetro.

Ensayo 1: Fluctuaciones sinusoidales y rectangulares de tensión

El estándar establece las amplitudes y frecuencias de las fluctuaciones de tensión, tanto sinusoidales como rectangulares, correspondientes a una percepción instantánea de flicker, $P_{inst\max}$, de valor unidad con una tolerancia de $\pm 8\%$. El objetivo de esta prueba es el de analizar las características de la respuesta de los filtros y parámetros de escalado del flickermetro. A continuación se presentan la [Tabla A.2](#) y la [Tabla A.3](#), correspondientes a las tablas 1b y 2b del estándar IEC 61000-4-15, respectivamente.

f_m (Hz)	$\frac{\Delta V}{V}$ (%)								
0.5	2.325	4.0	0.497	7.5	0.265	11.5	0.298	18.0	0.590
1.0	1.397	4.5	0.442	8.0	0.256	12.0	0.314	19.0	0.646
1.5	1.067	5.0	0.396	8.8	0.250	13.0	0.351	20.0	0.704
2.0	0.879	5.5	0.357	9.5	0.254	14.0	0.393	21.0	0.764
2.5	0.747	6.0	0.325	10.0	0.261	15.0	0.438	22.0	0.828
3.0	0.645	6.5	0.300	10.5	0.271	16.0	0.486	23.0	0.894
3.5	0.564	7.0	0.280	11.0	0.283	17.0	0.537	24.0	0.964
								25.0	1.037
								33 1/3	2.128

Tabla A.2. Respuesta normalizada para fluctuaciones de tensión sinusoidales.

f_m (Hz)	$\frac{\Delta V}{V}$ (%)								
0.5	0.509	4.5	0.312	8.8	0.196	14.0	0.308	21.5.0	0.592
1.0	0.467	5.0	0.291	9.5	0.199	15.0	0.341	22.0	0.612
1.5	0.429	5.5	0.268	10.0	0.203	16.0	0.376	23.0	0.680
2.0	0.398	6.0	0.248	10.5	0.212	17.0	0.411	24.0	0.743
2.5	0.370	6.5	0.231	11.0	0.222	18.0	0.446	25.0	0.764
3.0	0.352	7.0	0.216	11.5	0.233	19.0	0.497	25.5	0.806
3.5	0.342	7.5	0.207	12.0	0.245	20.0	0.553	28.0	0.915
4.0	0.332	8.0	0.199	13.0	0.272	21.0	0.585	30.5	0.847
								33 1/3	1.671

Tabla A.3. Respuesta normalizada para fluctuaciones de tensión rectangulares.

Ensayo 2: Fluctuaciones rectangulares

El estándar establece las amplitudes y frecuencias de 7 fluctuaciones rectangulares con la finalidad de analizar los algoritmos de clasificación y evaluación estadística (Tabla A.4). En este caso el parámetro de salida a analizar es la severidad flicker, P_{st} , que debe tomar el valor unidad con una tolerancia del $\pm 5\%$.

f_m (cpm)	$\frac{\Delta V}{V}$ (%)
1	2.715
2	2.191
7	1.450
39	0.894
110	0.722
1620	0.407
4000	2.343

Tabla A.4. Especificaciones de ensayo para fluctuaciones de tensión rectangulares.

Se debe especificar además el rango de funcionamiento del flickermetro. Para ello, los valores de amplitud de la Tabla A.4 se multiplican por un factor k y se determina el P_{st} para ese factor. Se deberá especificar el rango de valores de k para los que el valor de severidad flicker se encuentra dentro de los límites de $P_{st} \pm 5\%$.

Ensayo 3: Fluctuaciones combinadas de frecuencia y amplitud

En este ensayo la frecuencia y la amplitud de la tensión va cambiando en intervalos de 4 segundos en cada paso por cero de la señal con los valores que se indican en la [Tabla A.5](#). La máxima percepción instantánea de flicker obtenida, $P_{\text{inst max}}$, debe ser la unidad permitiéndose una desviación del $\pm 8\%$. El objetivo de este ensayo es el de analizar el circuito de medida.

Frecuencia del sistema (Hz)	Frecuencia variable (Hz)	Tensión variable (V)
50	49.75	230.000
	50.25	228.812

Tabla A.5. Especificaciones de ensayo para una combinación de variaciones de frecuencia y tensión.

Ensayo 4: Tensión distorsionada con múltiples pasos por cero

La señal está compuesta con la componente fundamental U y los niveles de armónicos de acuerdo a lo especificado en la [Tabla A.6](#). Los armónicos presentan un desfase de 180° con respecto a la componente de 50 Hz. Esta tensión se modula después a 8.8 Hz y una profundidad de modulación de 0.25%. El parámetro a analizar es la máxima percepción instantánea de flicker, $P_{\text{inst max}}$, permitiéndose una desviación del $\pm 8\%$ respecto del valor unidad. El objetivo de este ensayo es analizar la estabilidad del circuito de control de entrada.

Orden del armónico ν	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25	29	31
U_ν % de U	5	6	5	1.5	3.5	3.0	2.0	1.76	1.41	1.27	1.06	0.97

Tabla A.6. Especificaciones de ensayo para la tensión distorsionada por múltiples pasos por cero.

Ensayo 5: Análisis del ancho de banda mediante la modulación en banda lateral de armónicos e interarmónicos

El ensayo consiste en modular la tensión de red U superponiendo dos frecuencias separadas entre sí 10 Hz ($f_v, f_i = f_v - 10$ Hz). El procedimiento consiste en ir incrementando el par de frecuencias f_v y f_i en saltos de 50 Hz con el objetivo de obtener el ancho de banda del flickermetro. La frecuencia más alta $f_{v,max}$ para la cual $P_{inst\ max} = 1$ con una tolerancia de $\pm 8\%$ se corresponderá con el ancho de banda de entrada del medidor. El estándar establece que al menos $f_{v,max} = 450$ Hz y que el mínimo valor del par de frecuencias f_v y f_i con las que comenzar el análisis debe ser $f_i = 140$ Hz y $f_v = 150$ Hz, ambas para una amplitud relativa de $\frac{U_i}{U} = 3.611\%$.

Ensayo 6: Saltos de fase

Se generan una serie de saltos de fase en cada paso por cero positivo después de 1 min, 3 min y 9 min (± 10 s) del comienzo del periodo de observación de 10 min. Los ángulos de fase utilizados son $\Delta\beta = \pm 30^\circ$ y $\Delta\beta = \pm 45^\circ$. El objetivo de este ensayo es el de analizar la estabilidad del circuito de control de entrada, el ancho de banda de entrada y los algoritmos utilizados en el análisis estadístico. La severidad flicker, P_{st} , observada tiene que corresponderse con los valores especificados en la [Tabla A.7](#) con una tolerancia del $\pm 5\%$.

Salto de Fase $\Delta\beta$	P_{st}
± 30	0.913
± 45	1.060

Tabla A.7. Especificaciones de ensayo para saltos de fase.

Ensayo 7: Fluctuaciones rectangulares con un ciclo de utilización del 20%

La tensión se modula rectangularmente a una frecuencia de 28 Hz con un ciclo de trabajo del 20% es decir, en un periodo de 60 segundos la

señal permanece en un nivel 12 s y 48 s en el otro nivel. La amplitud relativa de la fluctuación debe ser de 1.418% y el parámetro de salida a analizar es el P_{st} que debe ser igual a la unidad con una tolerancia del $\pm 5\%$. El objetivo de este ensayo es el de analizar los algoritmos utilizados en el análisis estadístico.

a.2 RESULTADOS DE LA VERIFICACIÓN DEL FLICKERMETRO IEC

Se presentan los resultados obtenidos en la verificación de la implementación digital del flickermetro IEC utilizada durante el trabajo de tesis. Para la verificación del instrumento se han generado analíticamente las señales de tensión definidas en cada uno de los ensayos.

Ensayo 1

La [Tabla A.8](#) y la [Tabla A.9](#) muestran los valores máximos de P_{inst} obtenidos para las fluctuaciones sinusoidales y rectangulares definidas en las [Tablas A.2](#) y [A.3](#) respectivamente. Se muestran también los valores absolutos de desviación obtenidos con respecto a los requerimientos establecidos para este ensayo ($P_{inst\max} = 1 \pm 8\%$). Se observa que para todos los puntos de prueba la desviación obtenida es claramente inferior a los límites establecidos.

Ensayo 2

Los resultados correspondientes a este ensayo se recogen en la [Tabla A.10](#). En ella se muestran los valores de P_{st} obtenidos mediante el flickermetro IEC para cada una de las fluctuaciones rectangulares de la [Tabla A.4](#) así como las desviaciones porcentuales con respecto al valor de P_{st} unidad. Se puede observar que en todos los puntos del ensayo las medidas se encuentran dentro del límite $P_{st} = 1 \pm 5\%$.

f_m (Hz)	P_{inst}	Desv (%)										
0.5	1.010	1.0	5.0	1.003	0.3	10.0	1.001	0.1	17.0	0.998	0.2	
1.0	1.003	0.3	5.5	1.000	0.0	10.5	1.002	0.2	18.0	0.997	0.3	
1.5	1.001	0.1	6.0	0.997	0.3	11.0	0.998	0.2	19.0	0.997	0.3	
2.0	1.001	0.1	6.5	1.001	0.1	11.5	1.001	0.1	20.0	0.996	0.4	
2.5	1.001	0.1	7.0	1.001	0.1	12.0	0.998	0.2	21.0	0.994	0.6	
3.0	1.000	0.0	7.5	0.998	0.2	13.0	0.997	0.3	22.0	0.995	0.5	
3.5	1.002	0.2	8.0	1.003	0.3	14.0	0.999	0.1	23.0	0.994	0.6	
4.0	1.001	0.1	8.8	1.000	0.0	15.0	0.998	0.2	24.0	0.994	0.6	
4.5	1.002	0.2	9.5	1.001	0.1	16.0	0.998	0.2	25.0	0.992	0.8	
										33 1/3	0.989	1.1

Tabla A.8. Resultados del flickermetro IEC para el ensayo 1 (sinusoidales).

f_m (Hz)	P_{inst}	Desv (%)										
0.5	0.998	0.2	5.5	1.000	0.0	11.0	0.999	0.1	20.0	0.997	0.3	
1.0	0.998	0.2	6.0	0.998	0.2	11.5	0.997	0.3	21.0	0.994	0.6	
1.5	1.000	0.0	6.5	1.001	0.1	12.0	0.999	0.1	21.5	0.995	0.5	
2.0	0.999	0.1	7.0	0.997	0.3	13.0	0.999	0.1	22.0	0.994	0.6	
2.5	0.998	0.2	7.5	1.003	0.3	14.0	1.001	0.1	23.0	0.993	0.7	
3.0	1.000	0.0	8.0	0.996	0.4	15.0	0.998	0.2	24.0	0.993	0.7	
3.5	0.998	0.2	8.8	1.000	0.0	16.0	0.996	0.4	25.0	0.993	0.7	
4.0	1.000	0.0	9.5	1.000	0.0	17.0	0.996	0.4	25.5	0.992	0.8	
4.5	0.997	0.3	10.0	1.002	0.2	18.0	0.996	0.4	28.0	0.992	0.8	
5.0	1.000	0.0	10.5	1.002	0.2	19.0	0.995	0.5	30.5	0.995	0.5	
										33 1/3	0.987	1.3

Tabla A.9. Resultados del flickermetro IEC para el ensayo 1 (rectangulares).

f_m (cpm)	P_{st}	Desv (%)
1	1.006	0.6
2	1.008	0.8
7	1.009	0.9
39	1.000	0.0
110	0.999	0.1
1620	0.998	0.2
4000	0.988	1.2

Tabla A.10. Resultados del flickermetro IEC para el ensayo 2 con fluctuaciones rectangulares.

Ensayo 3

Aplicando los cambios de frecuencia y amplitud de la tensión especificados en la [Tabla A.5](#), se obtuvo un valor de $P_{\text{inst max}} = 1.016$ presentando por tanto una desviación del 1.6% con respecto al valor unidad. Ante la tolerancia permitida de este ensayo del $\pm 8\%$ el flickermetro IEC cumple con los requerimientos de este ensayo.

Ensayo 4

Para la señal analítica distorsionada por múltiplos pasos por cero (ver [Tabla A.6](#)) el flickermetro IEC proporcionó un valor de $P_{\text{inst max}} = 1.000$ y, por lo tanto, cumple con los requerimientos de este ensayo.

Ensayo 5

Dadas las especificaciones del ensayo 5, el flickermetro IEC presenta un ancho de banda de $f_{v, \text{max}} = 5$ KHz correspondiente a la mitad del valor de la frecuencia de muestreo utilizada ($f_s = 10$ KHz).

Ensayo 6

Para la señal con los saltos de fase y con los requerimientos del ensayo especificados en la [Tabla A.7](#) se puede observar en la [Tabla A.11](#) que el flickermetro IEC cumple con las especificaciones de este ensayo mostrando desviaciones claramente inferiores al límite de $\pm 5\%$ de tolerancia establecido.

Ensayo 7

Para el ensayo 7 en el que se modula rectangularmente la señal con un ciclo de utilización del 20% el valor registrado por el flickermetro IEC fue de $P_{\text{st}} = 0.994$ presentando una desviación con respecto al valor

Salto de fase	P_{st}	Desv (%)
-30°	0.914	0.11 ¹
+30°	0.911	0.22 ¹
-45°	1.063	0.28 ²
+45°	1.056	0.38 ²

¹ Desviación porcentual respecto de $P_{st} = 0.913$

² Desviación porcentual respecto de $P_{st} = 1.060$

Tabla A.11. Resultados del flickermetro IEC para el ensayo 6.

unidad de 0.6 %. La tolerancia en este ensayo era del $\pm 5\%$ por lo que el medidor se encuentra dentro de los límites establecidos.

a.3 RESULTADOS DE LA VERIFICACIÓN DEL SISTEMA DE ANÁLISIS COMPLETO

En el [Capítulo 3](#) se ha presentado los resultados de la verificación del sistema de análisis completo mediante el segundo ensayo definido en el protocolo de verificación del estándar IEC 61000-4-15. Con el objetivo de facilitar la lectura de dicho capítulo, se han trasladado a este apéndice los resultados obtenidos en la verificación del sistema completo mediante el resto de ensayos definidos por el estándar.

Ensayo 1

La [Tabla A.12](#) y la [Tabla A.13](#) muestran los resultados obtenidos con el flickermetro de luz para las fluctuaciones sinusoidales y rectangulares definidas en las tablas [A.2](#) y [A.3](#). Se observa que en todos los casos el valor de $P_{instmax}$ presenta desviaciones menores de el 8% con respecto al valor unidad.

f_m (Hz)	P_{inst}	Desv (%)									
0.5	0.984	1.6	5.0	0.996	0.4	10.0	0.997	0.3	17.0	0.997	0.3
1.0	0.988	1.2	5.5	0.994	0.6	10.5	0.997	0.3	18.0	0.996	0.4
1.5	0.985	1.5	6.0	0.997	0.3	11.0	0.993	0.7	19.0	0.998	0.2
2.0	0.988	1.2	6.5	0.995	0.5	11.5	0.994	0.6	20.0	0.998	0.2
2.5	0.997	0.3	7.0	0.997	0.3	12.0	0.992	0.8	21.0	0.995	0.5
3.0	1.004	0.4	7.5	0.994	0.6	13.0	0.993	0.7	22.0	0.997	0.3
3.5	0.989	1.1	8.0	1.000	0.0	14.0	0.996	0.4	23.0	0.997	0.3
4.0	0.995	0.5	8.8	0.997	0.3	15.0	0.995	0.5	24.0	0.998	0.2
4.5	0.993	0.7	9.5	0.997	0.02	16.0	0.995	0.5	25.0	0.997	0.3
									33 1/3	1.014	1.4

Tabla A.12. Resultados del flickermetro de luz para el ensayo 1 (sinusoidales).

f_m (Hz)	P_{inst}	Desv (%)									
0.5	0.987	1.3	5.5	0.982	1.8	11.0	1.000	0.0	20.0	1.011	1.1
1.0	0.992	0.8	6.0	0.988	1.2	11.5	0.995	0.5	21.0	0.998	0.2
1.5	0.982	1.8	6.5	0.992	0.8	12.0	0.994	0.6	21.5	1.000	0.0
2.0	0.991	0.9	7.0	0.988	1.2	13.0	0.988	1.2	22.0	1.002	0.2
2.5	0.990	1.0	7.5	1.001	0.1	14.0	1.002	0.2	23.0	0.999	0.1
3.0	0.991	0.9	8.0	0.992	0.8	15.0	0.997	0.3	24.0	1.009	0.9
3.5	0.985	1.5	8.8	0.999	0.1	16.0	0.993	0.7	25.0	1.013	1.3
4.0	0.987	1.3	9.5	0.999	0.1	17.0	0.980	2.0	25.5	0.978	2.2
4.5	0.981	1.9	10.0	1.003	0.3	18.0	0.991	0.9	28.0	1.005	0.5
5.0	0.993	0.7	10.5	0.997	0.3	19.0	0.996	0.4	30.5	0.992	0.8
									33 1/3	1.008	0.8

Tabla A.13. Resultados del flickermetro de luz para el ensayo 1 (rectangulares).

Ensayo 3

Aplicando los cambios de frecuencia y amplitud de la tensión especificados en la [Tabla A.5](#), se obtuvo un valor de $P_{inst\max} = 1.030$ presentando por tanto una desviación del 3% con respecto al valor unidad. Ante la tolerancia permitida de este ensayo del $\pm 8\%$ el flickermetro de luz cumple con los requerimientos de este ensayo.

Ensayo 4

Para la señal analítica distorsionada por múltiplos pasos por cero (ver [Tabla A.6](#)) el flickermetro de luz proporcionó un valor de $P_{\text{inst max}} = 0.997$ presentando una desviación del 0.3% con respecto al valor unidad, cumpliendo con los requerimientos de este ensayo.

Ensayo 5

Este ensayo comienza con las frecuencias de modulación $f_i = 140$ Hz y $f_v = 150$ Hz, y se van incrementando en saltos de 50 Hz hasta llegar a la máxima frecuencia, $f_{v,max}$, para la cual $P_{\text{inst max}} = 1 \pm 8\%$. En este caso el ancho de banda alcanzado es de 5 KHz, valor que se corresponde con $\frac{f_s}{2}$ al utilizar una frecuencia de muestreo de 10 KHz.

Ensayo 6

Para la señal con los saltos de fase y con los requerimientos del ensayo especificados en la [Tabla A.7](#) se puede observar en la [Tabla A.14](#) que el flickermetro de luz cumple con las especificaciones de este ensayo mostrando desviaciones menores que el límite de $\pm 5\%$ de tolerancia establecido.

Salto de fase	P_{st}	Desv (%)
-30°	0.895	1.97 ¹
+30°	0.927	1.53 ¹
-45°	1.068	0.75 ²
+45°	1.065	0.47 ²

¹ Desviación porcentual respecto de $P_{st} = 0.913$

² Desviación porcentual respecto de $P_{st} = 1.060$

Tabla A.14. Resultados del flickermetro de luz para el ensayo 6.

Ensayo 7

Para el ensayo 7 en el que se modula rectangularmente la señal con un ciclo de utilización del 20% el valor registrado por el flickermetro de luz fue de $P_{st} = 1.004$ presentando una desviación con respecto al valor unidad de 0.4%. La tolerancia en este ensayo era del $\pm 5\%$ por lo que el medidor cumple claramente con los límites establecidos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ailleret P. Détermination des lois expérimentales du papillotement (flicker) en vue de leur application aux réseaux basse tension sur lesquels les charges varient périodiquement ou aléatoirement (soudeuses démarrages de moteurs). *Bulletin de la Société Française des Electriciens* 1957;7(77); 257–262.
- [2] Aman MM, Jasmon GB, Mokhlis H, y Bakar AHA. Analysis of the performance of domestic lighting lamps. *Energy Policy* 2013;52; 482–500.
- [3] Arlt D, Stark M, y Eberlein C. Examples of international flicker requirements in high voltage networks and real world measurements. En Proceedings of 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU) 2007, págs. 1–4.
- [4] Azcarate I, Gutierrez JJ, Lazkano A, Leturiondo LA, et al. Type testing of a highly accurate illuminance flickermeter. En Proceedings of IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP) 2012, págs. 897 –903.
- [5] Beeckman P. Algorithm and sensitivity curve of Stroboscopic Visibility Measure. Inf. Técn., Philips Innovation Services 2015.
- [6] Blanco AM, Stiegler R, y Meyer J. Power quality disturbances caused by modern lighting equipment (CFL and LED). En Proceedings of IEEE PowerTech, Grenoble 2013, págs. 1–6.
- [7] Bouwknecht A. Compact Fluorescent Lamps. En Proceedings of Annual IES Conference, Toronto, Canada 1981.
- [8] Cai R. Flicker Interaction Studies and Flickermeter Improvement. Tesis doctoral, Eindhoven University of Technology 2009.

- [9] Cai R, Cobben JF, Myrzik JM, Blom JH, y Kling WL. Flickermeter used for different types of lamps. En Proceedings of 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU) 2007, IEEE, págs. 1–6.
- [10] Cai R, Cobben JF, Myrzik JM, Blom JH, y Kling WL. Flicker responses of different lamp types. *IET Generation, Transmission and Distribution* 2009;3(9); 816–824.
- [11] Chang WN, Wu CJ, y Yen SS. The influence of voltage flicker on residential lamps. En Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), vol. 1 1997, págs. 392–396.
- [12] Chen S, Heah MY, Then AB, y Foo MK. Automatic evaluation of flickering sensitivity of fluorescent lamps caused by interharmonic voltages. En Proceedings of 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power 2008, págs. 1–6.
- [13] Chmielowiec K. Flicker effect of different types of light sources. En Proceedings of 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU) 2011, págs. 1 –6.
- [14] CIGREJWGC407. Power Quality Indices and Objectives, Final WG Report. Inf. Técn., CIGRE Joint Working Group C4.07 2004.
- [15] CIGREWGC4108. Review of Flicker Objectives for HV, MV and LV Systems, Final WG Report. Inf. Técn., CIGRE Working Group C4.108 2009.
- [16] CIGREWGC4111. Review of LV and MV Compatibility levels for Voltage Fluctuation, Final WG Report. Inf. Técn., CIGRE Working Group C4.111 2016.
- [17] CIGREWGC4111TOR. Review of LV and MV Compatibility levels for Voltage Fluctuation, Terms of Reference. Inf. Técn., CIGRE Working Group C4.111 2010.
- [18] Cobben J, Cai R, Kling W, y Myrzik J. The Cheapest Way to Solve the Flicker Problem. En Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), vol. 3 2006, págs. 1051–1055.

- [19] Cornfield GC. Definition and measurement of voltage flicker [in lighting]. En Proceedings of IEE Colloquium on Electronics in Power Systems Measurement 1988, págs. 1–4.
- [20] De Almeida A, Santos B, Paolo B, y Quicheron M. Solid state lighting review - Potential and challenges in Europe. *Renewable Sustainable Energy Reviews* 2014;34; 30–48.
- [21] De Koster M, De Jaeger E, y Vancoetsem W. Light Flicker Caused by Interharmonics. Inf. Técn., Laborelec 1999.
- [22] De Lange H. Experiments on flicker and some calculations on an electrical analogue of the foveal systems. *Physica* 1952;18; 935–950.
- [23] DiLaura D, Houser K, Mistrick R, y Steffy G. The Lighting Handbook, Illuminating Engineering Society 2011.
- [24] Drapela J. Performance of a voltage peak detection based flickermeter. En Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control and Signal processing (CSECS) 2009, págs. 296–301.
- [25] Drapela J, Kratky M, Weidinger L, y Zavodny M. Light flicker of fluorescent lamps with different types of ballasts caused by interharmonics. En Proceedings of IEEE Power Tech, Russia 2005, págs. 1–7.
- [26] Drapela J, Langella R, Slezinger J, y Testa A. A Tunable Flickermeter to Account for Different Lamp Technologies. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2016;PP(99); 1–8.
- [27] Drapela J y Slezinger J. A light-flickermeter — Part 1: Design. En Proceedings of 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering (EPE) 2010, págs. 453–458.
- [28] Drapela J y Slezinger J. Design and utilization of a light flickermeter. En Proceedings of IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS) 2012, págs. 1–6.
- [29] Drapela J y Toman P. Interharmonic - Flicker Curves of Lamps and Compatibility Lever for Interharmonic Voltages. En Proceedings of IEEE Power Tech, Lausanne 2007, págs. 1552–1557.

- [30] Emanuel A y Peretto L. The response of fluorescent lamp with magnetic ballast to voltage distortion. *IEEE Transactions on Power Delivery* 1997;12(1); 289–295.
- [31] Emanuel AE y Peretto L. A simple lamp-eye-brain model for flicker observations. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2004;19(3); 1308–1313.
- [32] EPRI. Lamp Flicker Predicted by Gain-Factor Measurements. Inf. Técn., Electric Power Research Institute, PQTN Brief No. 36 2007.
- [33] European Comission (EC). Communication from the Comission to the European Parliament, the Council, the European economic and social committee and the committee of the regions, 20 20 by 2020 Europe’s climate change opportunity 2008;European Commission, Brussels, COM(2008) 30 final.
- [34] European Comission (EC). Commission Regulation (EC) No 244/2009 of 18 March 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for non-directional household lamps. *Official Journal of the European Union* 2009;L76; 3–16.
- [35] European Comission (EC). Commission Regulation (EC) No 245/2009 of 18 March 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for fluorescent lamps without integrated ballast, for high intensity discharge lamps, and for ballasts and luminaires able to operate such lamps, and repealing Directive 2000/55/EC of the European Parliament and of the Council. *Official Journal of the European Union* 2009;L76; 17–44.
- [36] European Comission (EC). EUROPE 2020: A strategy for smart, sustainable and inclusive growth 2010;European Commission, Brussels, COM(2010) 2020.
- [37] European Comission (EC). Communication from the Comission to the European Parliament, the Council, the European economic and social committee and the committee of the regions, Energy Efficiency Plan 2011;European Commission, Brussels, COM(2011) 109 final.

- [38] European Commission (EC). GREEN PAPER, Lighting the Future: Accelerating the deployment of innovative lighting technologies 2011;European Commission, Brussels, COM(2011) 889 final.
- [39] Frater L y Watson N. Light flicker sensitivity of high efficiency compact fluorescent lamps. En Proceedings of Power Engineering Conference (AUPEC), Australasian Universities 2007, págs. 1–6.
- [40] Gallo D, Landi C, y Pasquino N. Low cost device for light flicker measurement. En Proceedings of XIII Imeko TC-4 Meeting Athens, Greece 2004, págs. 773 – 778.
- [41] Gallo D, Landi C, y Pasquino N. Design and Calibration of an Objective Flickermeter. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2006;55(6); 2118 –2125.
- [42] Gil-de Castro A, Rönnerberg SK, Bollen M, y Moreno-Muñoz A. Study on harmonic emission of domestic equipment combined with different types of lighting. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2014;55; 116–127.
- [43] Gutiérrez JJ. Revisión crítica del flickermetro IEC. Una nueva estrategia para la medida del flicker. Tesis doctoral, Universidad del País Vasco 2009.
- [44] Haitz R y Tsao JY. Solid-state lighting: The case 10 years after and future prospects. *Physica status solidi (a)* 2011;208(1); 17–29.
- [45] Halpin M, Bergeron R, Blooming TM, Burch RF, Conrad LE, y Key TS. Voltage and lamp flicker issues: should the IEEE adopt the IEC approach? *IEEE Transactions on Power Delivery* 2003;18(3); 1088–1097.
- [46] Halpin M, Cai R, De Jaeger E, Papic I, Perera S, y Yang X. A review of flicker objectives related to complaints, measurements, and analysis techniques. En Proceedings of the 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 2 (CIRED) 2009, págs. 1–12.
- [47] Hooshyar A y El-Saadany EF. Development of a Flickermeter to Measure Non-Incandescent Lamps Flicker. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2013;28(4); 2103–2115.

- [48] IEC 555-3. Disturbances in Supply Systems caused by Household Appliances and Similar Electric Equipment - Part 3: Voltage Fluctuations. 1982.
- [49] IEC 61000-2-1. Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 2-1: Guide to electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems 1992.
- [50] IEC 61000-4-15-ed2.0. Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4: Testing and Measurement Techniques - Section 15: Flickermeter Functional and Design Specifications 2010.
- [51] IEC 61547-ed2.0. Equipment for general lighting purposes - EMC immunity 2009.
- [52] IEC 868. Flickermeter. Functional and design specifications 1986.
- [53] IEC TR-61547-1:2015. Equipment for general lighting purposes - EMC immunity - Part 1: An objective voltage fluctuation immunity test method 2015.
- [54] Inman GE. Characteristics of Fluorescent Lamps. En Proceedings of Thirty-second Annual Convention of the Illuminating Engineering Society, Minneapolis, Minnesota 1938.
- [55] ISO. Colorimetry – Part 1: CIE standard colorimetric observers. ISO 11664-1:2007, International Organization for Standardization 2007.
- [56] Kay SM y Marple SL. Spectrum analysis—A modern perspective. *Proceedings of the IEEE* 1981;69(11); 1380–1419.
- [57] Keppler T, Watson NR, Arrillaga J, y Chen S. Theoretical assessment of light flicker caused by sub- and interharmonic frequencies. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2003;18(1); 329– 333.
- [58] Kim T, Powers EJ, Grady WM, y Arapostathis A. Detection of Flicker Caused by Interharmonics. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2009;58(1); 152–160.
- [59] Koenderink J y Van Doorn A. Visibility of un predictably flickering lights. *Journal of the Optical Society of America* 1974;64(11); 1517–1522.

- [60] Langella R y Testa A. Amplitude and Phase Modulation Effects of Waveform Distortion in Power Systems. *Electrical Power Quality and Utilization Journal* 2007;13(1); 25–32.
- [61] Lehman B, Wilkins A, Berman S, Poplawski M, y Miller NJ. Proposing Measures of Flicker in the Low Frequencies for Lighting Applications. *LEUKOS* 2011;7(3); 189–195.
- [62] McKinsey & Company Inc. Lighting the way: Perspectives on the global lighting market, Second Edition 2012. [Online].
- [63] Mirra C. Connection of fluctuating loads. Inf. Técn., International Union for Electroheat 1988.
- [64] Mombauer W. Flicker caused by interharmonics. *ETZ* 1990;12(12); 391–396.
- [65] Peretto L y Emanuel AE. A theoretical study of the incandescent filament lamp performance under voltage flicker. *IEEE Transactions on Power Delivery* 1997;12(1); 279–288.
- [66] Peretto L, Pivello E, Tinarelli R, y Emanuel AE. Theoretical Analysis of the Physiologic Mechanism of Luminous Variation in Eye-Brain System. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2007; 56(1); 164–170.
- [67] Perz M, Vogels I, Sekulovski D, Wang L, Tu Y, y Heynderickx I. Modeling the visibility of the stroboscopic effect occurring in temporally modulated light systems. *Lighting Research and Technology* 2014;0; 1–20.
- [68] Rashbass C. The visibility of transient changes of luminance. *The Journal of Physiology* 1970;210(1); 165.
- [69] Rezek IA y Roberts SJ. Stochastic complexity measures for physiological signal analysis. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 1998;45(9); 1186–1191.
- [70] Rönnerberg SK, Bollen M, y Wahlberg M. Harmonic emission before and after changing to LED and CFL; Part I: Laboratory measurements for a domestic customer. En Proceedings of IEEE 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP) 2010, págs. 1–7.

- [71] Shannon CE. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal* 1948;27; 379–423 and 623–656.
- [72] Sharma H, Sharp F, y McGranaghan M. Flicker/voltage fluctuation response of modern lamps including those with dimmable capability and other low voltage sensitive equipment. En Proceedings of 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED) 2013, págs. 1–4.
- [73] Sharma H, Sunderman WG, y Gaikwad A. Harmonic impacts of widespread use of CFL lamps on distribution systems. En Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting 2011, págs. 1–5.
- [74] Simons K. Das Flackern des Lightes in elektrischen Beleuchtungsanlagen. *ETZ* 1917;37,38,39; 453–455, 465–468, 474–476.
- [75] Singh M, Khadkikar V, Chandra A, y Varma RK. Grid Interconnection of Renewable Energy Sources at the Distribution Level With Power-Quality Improvement Features. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2011;26(1); 307–315.
- [76] Slezingr J y Drapela J. An alternative flickermeter evaluating high-frequency interharmonic voltages. En Proceedings of IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS) 2012, págs. 1–6.
- [77] Slezingr J, Drapela J, Langella R, y Testa A. A new simplified model of compact fluorescent lamps in the scenario of smart grids. En Proceedings of IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP) 2012, págs. 835–841.
- [78] Smith J, Speakes J, y Rashid M. An overview of the modern light dimmer: design, operation, and application. En Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium 2005, págs. 299 – 303.
- [79] Taekhyun K, Rylander M, Powers E, Grady W, y Arapostathis A. LED Lamp Flicker Caused by Interharmonics. En Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC) 2008, págs. 1920–1925.

- [80] Tang L, Mueller D, Hall D, Samotyj M, y Randolph J. Analysis of DC arc furnace operation and flicker caused by 187 Hz voltage distortion. *IEEE Transactions on Power Delivery* 1994;9(2); 1098–1107.
- [81] Tayjasanant T, Wang W, Li C, y Xu W. Interharmonic-flicker curves. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2005;20(2); 1017–1024.
- [82] Testa A, Akram MF, Burch R, Carpinelli G, et al. Interharmonics: Theory and Modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2007; 22(4); 2335–2348.
- [83] Tonkoski R, Turcotte D, y EL-Fouly THM. Impact of High PV Penetration on Voltage Profiles in Residential Neighborhoods. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2012;3(3); 518–527.
- [84] Uddin S, Shareef H, Mohamed A, y Hannan MA. An analysis of harmonic diversity factors applied to LED lamps. En Proceedings of IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON) 2012, págs. 1–5.
- [85] UIE. Flicker measurement and evaluation. Inf. Técn., International Union for Electroheat, Disturbances WG 1992.
- [86] UIE. Guide to quality of electrical supply for industrial installations, Part V: Flicker. Inf. Técn., International Union for Electroheat, Disturbances WG 1999.
- [87] Čuk V, Cobben J, Kling W, y Timens R. An analysis of diversity factors applied to harmonic emission limits for energy saving lamps. En Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - (ICHQP) 2010, págs. 1–6.
- [88] Witte MD. Flicker problems in a steel plant caused by interharmonics. Case study, Laborelec 2007.
- [89] Xu W. Deficiency of the IEC flicker meter for measuring interharmonic-caused voltage flickers. En Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting 2005, págs. 2326–2329 Vol. 3.
- [90] Yang K, Bollen M, Larsson EOA, y Wahlberg M. Measurements of harmonic emission versus active power from wind turbines. *Electric Power Systems Research* 2014;108; 304–314.

- [91] Yong J, Tayjasanant T, Xu W, y Sun C. Characterizing Voltage Fluctuations Caused by a Pair of Interharmonics. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2008;23(1); 319–327.
- [92] Zargari A, Moallem P, y Kiyoumars A. Studying and improvement of operation of IEC flickermeter. En Proceedings of 18th Iranian Conference on Electrical Engineering 2010, págs. 925–931.