



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE
LAS CONSECUENCIAS
ELÉCTRICAS Y LA DISIPACIÓN
TÉRMICA DE LA SUSTITUCIÓN
DE LUMINARIAS CON
LÁMPARAS DE DESCARGA
POR LUMINARIAS LED Y SUS
EFECTOS SOBRE LA
CALIDAD LUMÍNICA Y VIDA
ÚTIL**

Alumno/a: Unión Sánchez, Juan de Dios

Tutor/a: Prof. D. Manuel Jesús Hermoso-Orzáez
Prof. D. Blas Ogáyar Fernández

Dpto.: Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos
Ingeniería Eléctrica

Septiembre, 2019



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Don MANUEL JESÚS HERMOSO-ORZÁEZ y Don BLAS OGÁYAR FERNÁNDEZ , tutores del Trabajo Fin de Máster titulado: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CONSECUENCIAS ELÉCTRICAS Y LA DISIPACIÓN TÉRMICA DE LA SUSTICIÓN DE LUMINARIAS CON LÁMPARAS DE DESCARGA POR LUMINARIAS LED Y SUS EFECTOS SOBRE LA CALIDAD LUMÍNICA Y VIDA ÚTIL, que presenta JUAN DE DIOS UNIÓN SÁNCHEZ, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, SEPTIEMBRE de 2019

El alumno:

Los tutores:

JUAN DE DIOS UNIÓN SÁNCHEZ

MANUEL JESÚS HERMOSO-
ORZÁEZ

BLAS OGÁYAR FERNÁNDEZ

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Componentes de la lámpara de vapor de mercurio-Fuente: Manual Iluminación INDAL	15
Figura 1.2. Esquema de funcionamiento lámpara de vapor de mercurio-Fuente: Manual Iluminación INDAL.....	16
Figura 1.3.Partes de la lámpara de vapor de sodio de alta presión-Fuente: Manual Iluminación INDAL.....	17
Figura 1.4.Esquema con arrancador independiente y esquema con arrancador semiparalelo-Fuente: Manual Iluminación INDAL	17
Figura 1.5.Partes de la lámpara de halogenuros metálicos-Fuente: Manual Iluminación INDAL	18
Figura 1.6.Esquemas de cableado con: arrancador independiente, semiparalelo y paralelo-Fuente: Manual Iluminación INDAL	19
Figura 1.7. Estructura diodo LED-Fuente: Manual Iluminación INDAL.....	20
Figura 1.8. Componentes y patillaje del diodo LED-Fuente: Manual Iluminación INDAL	20
Figura 1.9.Conexión de una lámpara LED-Fuente: Manual Iluminación INDAL	21
Figura 1.10. Gráfico de evolución del alumbrado público-Fuente: Manual de Iluminación INDAL	22
Figura 1.11. Componentes driver LED-Fuente: Manual Iluminación INDAL.....	25
Figura 1.12.Formas de onda en el driver LED-Fuente: Manual Iluminación INDAL	25
Figura 1.13. Corriente pico en el arranque luminaria LED-Fuente: eldoLED.....	26
Figura 1.14. Patrones geográficos de cambios en la iluminación pública: Referencia [6]	27
Figura 1.15.Cambio absoluto en el área iluminada de 2012 a 2016-Fuente: Referencia [6]	27
Figura 2.1 Set-up experimental para la medición de parámetros eléctricos. Fuente: Referencia [14].....	30
Figura 2.2 Set-up experimental para medición de parámetros lumínicos. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 2.3 Set-up experimental para medición de temperatura en luminarias. Fuente: Elaboración propia	33
Figura 2.4 Luminaria LGL1AS060WA01. Fuente: Catálogo LEDUS	34
Figura 2.5 Driver LED Inventronics de 60W.....	35
Figura 2.6 Luminaria LRLT1A080WA02. Fuente: Catálogo LEDUS	37
Figura 2.7 Driver LED Inventronics de 85W.....	37
Figura 2.8 Luminaria LED Mini Iridium. Fuente: Catálogo Philips	38
Figura 2.9 Driver LED Philips LEDSTREET4 de 40W.....	39
Figura 2.10 Luminaria LED NaviaP de 50W. Fuente: Catálogo Solydi.....	41
Figura 2.11 Driver LED Meanwell LPFH de 60W, 24V. Fuente: Catálogo Meanwell.....	41
Figura 2.12 Luminaria LED Aire 7 de 200W. Fuente: Catálogo ATP.....	43
Figura 2.13 Driver LED Tridonic de 200W. Fuente: Catálogo TRIDONIC	44
Figura 2.14 Bulbo luminaria VSAP. Fuente: Catálogo Philips	45
Figura 2.15 Balastro HID para lámpara VSAP. Fuente: Catálogo Philips	46
Figura 2.16 Especificaciones técnicas balastro lámpara VSAP- Fuente: Catálogo Philips....	46
Figura 2.17 Arrancador semiparalelo lámpara VSAP. Fuente: Catálogo Philips	46
Figura 2.18 Disposición de los arrancadores en la luminaria VSAP.....	47
Figura 2.19 Bulbo luminaria HM. Fuente: Catálogo Philips.....	48
Figura 2.20 Balastro HID lámpara HM. Fuente: Catálogo Philips.....	49

Figura 2.21 Analizador de red Fluke 437. Fuente: Catálogo Fluke	50
Figura 2.22 Sonda de corriente i430 Flexi-TF. Fuente: Catálogo Fluke	53
Figura 2.23 Diagrama de cromaticidad XYZ. Fuente: CIE	54
Figura 2.24 Espectrorradiómetro CS-1000A. Fuente: Konica Minolta.....	55
Figura 2.25 Ejemplos de display del espectrorradiómetro. Fuente: Konica Minolta	55
Figura 2.26 Opciones de representación software CS1W. Fuente: Konica Minolta	56
Figura 2.27 Cromatógrafo CL-200A. Fuente: Konica Minolta	57
Figura 2.28 Cámara termográfica Ti25. Fuente: Catálogo Fluke	59
Figura 2.29 Ejemplo de set-up característico de medición parámetros eléctricos.	62
Figura 2.30 Conexión de la sonda de tensión en el set-up eléctrico	62
Figura 2.31 Conexión pinzas amperimétricas en fase y neutro de la luminaria bajo ensayo.	63
Figura 2.32 Ejemplo de set-up característico de medición parámetros lumínicos. Sin luz ambiente	64
Figura 2.33 Ejemplo de set-up característico de medición parámetros lumínicos. Con luz ambiente	64
Figura 2.34 Ejemplo de set-up característico para la medición de la disipación térmica.....	65
Figura 3.1 Corriente de arranque luminaria GL1A día 1, intervalo 0-5 min. Fuente: Software FlukeView.....	68
Figura 3.2 Tensión, corriente y frecuencias nominales luminaria GL1A, día 1 intervalo de medida 0-5 min. Fuente: Software FlukeView	68
Figura 3.3 THD Armónicos de tensión, luminaria GL1A, día 1 intervalo de media 0-5 min. Fuente: Software FlukeView.....	69
Figura 3.4 THD Armónicos de corriente, luminaria GL1A, día 1 intervalo de medida 0-5 min. Fuente: Software FlukeView.....	69
Figura 3.5 Datos de potencia y energía, luminaria GL1A, día 1 intervalo de medida 0-5 min. Fuente: Software FlukeView.....	70
Figura 3.6 Diagrama de funcionamiento cámara termográfica. Fuente: Manual amperis.....	78
Figura 3.7 Curva evolución temperatura máxima luminaria GL1A. Fuente: Elaboración propia	80
Figura 3.8 Imagen térmica característica luminaria GL1A. Fuente: Software SmartView.....	81
Figura 3.9 Límite de temperatura del material luminaria GL1A. Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 3.10 Curva evolución temperatura máxima luminaria T1A. Fuente: Elaboración propia	82
Figura 3.11 Imagen térmica característica luminaria T1A. Fuente: Software SmartView	83
Figura 3.12 Límite de temperatura del material luminaria T1A. Fuente: Elaboración propia .	83
Figura 3.13 Curva evolución temperatura máxima luminaria Mini-Iridium. Fuente: Elaboración propia	84
Figura 3.14 Imagen térmica característica luminaria Mini-Iridium. Fuente: Software SmartView.....	85
Figura 3.15 Límite de temperatura del material luminaria Mini-Iridium. Fuente: Elaboración propia	85
Figura 3.16 Curva evolución temperatura máxima luminaria NaviaP. Fuente: Elaboración propia	86
Figura 3.17 Imagen térmica característica luminaria NaviaP. Fuente: Software SmartView .	87
Figura 3.18 Límite de temperatura del material luminaria NaviaP. Fuente: Elaboración propia	87
Figura 3.19 Curva evolución temperatura máxima luminaria ATP Aire 7. Fuente: Elaboración propia.....	88

Figura 3.20 Imagen térmica característica luminaria ATP Aire 7. Fuente: Software SmartView	89
Figura 3.21 Límite de temperatura del material luminaria ATP Aire 7. Fuente: Elaboración propia	89
Figura 3.22 Curva evolución temperatura máxima luminaria VSAP. Fuente: Elaboración propia	90
Figura 3.23 Imagen térmica característica luminaria VSAP. Fuente: Software SmartView ...	91
Figura 3.24 Límite de temperatura del material luminaria VSAP. Fuente: Elaboración propia	91
Figura 3.25 Curva evolución temperatura máxima luminaria HM. Fuente: Elaboración propia	92
Figura 3.26 Imagen térmica característica luminaria HM. Fuente: Software SmartView	93
Figura 3.27 Límite de temperatura del material luminaria HM. Fuente: Elaboración propia ..	93
Figura 3.28 Diagrama de funcionamiento espectralradiómetro. Fuente: Elaboración propia ..	94
Figura 3.29 Color de un cuerpo negro entre 1000 y 12000K.Fuente: Manual CS1000A Konica Minolta.....	95
Figura 3.30 Diagrama de cromaticidad xy, día 1 de medición. Fuente: Software CS-S1w....	98
Figura 3.31 Diagrama de cromaticidad uv, día 1 de medición. Fuente: Software CS-S1w....	99
Figura 3.32 Diagrama de cromaticidad u'v', día 1 de medición. Fuente: Software CS-S1w ..	99
Figura 3.33 Distribución relativa espectral, día 1 de medición. Fuente: Software CS-S1w ..	100
Figura 3.34 Comparativa evolución de temperatura máxima de las luminarias. Fuente: Elaboración propia	108
Figura 3.35 Linealidad Potencia-Temperatura de disipación. Fuente: Elaboración propia ..	108
Figura 3.36 Coordenadas Cx, Cy en las luminarias, condición ideal de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia y hojas de características.....	110
Figura 3.37 Temperatura de unión (Tj) vs cambio de coordenadas de cromaticidad lámpara GL1A. Fuente: Elaboración propia y catálogo LUMILED	110
Figura 3.38 Temperatura de unión (Tj) vs cambio de coordenadas de cromaticidad lámpara T1A. Fuente: Elaboración propia y catálogo LUMILED	111
Figura 3.39 Temperatura de unión (Tj) vs cambio de coordenadas de cromaticidad lámpara Mini-Iridium. Fuente: Elaboración propia y catálogo LEDGINE.....	112
Figura 3.40 Temperatura de unión (Tj) vs cambio de coordenadas de cromaticidad lámpara NaviaP. Fuente: Elaboración propia y catálogo CREE	113
Figura 3.41 Temperatura de unión (Tj) vs cambio de coordenadas de cromaticidad lámpara ATP Aire 7. Fuente: Elaboración propia y catálogo LUW.....	114
Figura 3.42 Coordenadas Cx, Cy en las luminarias, condición límite de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia	115
Figura 3.43 Flujo luminoso vs horas de funcionamiento luminaria VSAP. Fuente: Catálogo de Philips	116
Figura 3.44 Flujo luminoso vs horas de funcionamiento luminaria HM. Fuente: Catálogo de Philips	116
Figura 3.45 Temperatura de unión (Tj) vs flujo luminoso relativo lámpara GL1A. Fuente: Catálogo LUMILED	117
Figura 3.46 Temperatura de unión (Tj) vs flujo luminoso relativo lámpara T1A. Fuente: Catálogo LUMILED	118
Figura 3.47 Temperatura de unión (Tj) vs flujo luminoso relativo lámpara Mini-Iridium. Fuente: Catálogo LEDGINE	118

Figura 3.48 Temperatura de unión (T_j) vs flujo luminoso relativo lámpara NaviaP. Fuente: Catálogo CREE	119
Figura 3.49 Temperatura de unión (T_j) vs flujo luminoso relativo lámpara ATP Aire 7. Fuente: Catálogo LUW	120
Figura A2.1 Diagrama de cromaticidad xy luminaria T1A. Fuente: CS-S1W.....	145
Figura A2.2 Diagrama de cromaticidad uv luminaria T1A. Fuente: CS-S1W	146
Figura A2.3 Diagrama de cromaticidad u'v' luminaria T1A. Fuente: CS-S1W	146
Figura A2.4 Distribución relativa espectral luminaria T1A. Fuente: CS-S1W	147
Figura A2.5 Diagrama de cromaticidad xy luminaria Mini-Iridium. Fuente: CS-S1W.....	147
Figura A2.6 Diagrama de cromaticidad uv luminaria Mini-Iridium. Fuente: CS-S1W.....	148
Figura A2.7 Diagrama de cromaticidad u'v' luminaria Mini-Iridium. Fuente: CS-S1W	148
Figura A2.8 Distribución relativa espectral luminaria Mini-Iridium. Fuente: CS-S1W	149
Figura A2.9 Diagrama de cromaticidad xy luminaria NaviaP. Fuente: CS-S1W.....	149
Figura A2.10 Diagrama de cromaticidad uv luminaria NaviaP. Fuente: CS-S1W.....	150
Figura A2.11 Diagrama de cromaticidad u'v' luminaria NaviaP. Fuente: CS-S1W	150
Figura A2.12 Distribución relativa espectral luminaria NaviaP. Fuente: CS-S1W	151
Figura A2.13 Diagrama de cromaticidad xy luminaria ATP Aire 7. Fuente: CS-S1W	151
Figura A2.14 Diagrama de cromaticidad uv luminaria ATP Aire 7. Fuente: CS-S1W.....	152
Figura A2.15 Diagrama de cromaticidad u'v' ATP Aire 7. Fuente: CS-S1W	152
Figura A2.16 Distribución relativa espectral luminaria ATP Aire 7. Fuente: CS-S1W.....	153
Figura A2.17 Diagrama de cromaticidad xy luminaria VSAP. Fuente: CS-S1W.....	153
Figura A2.18 Diagrama de cromaticidad uv luminaria VSAP. Fuente: CS-S1W	154
Figura A2.19 Diagrama de cromaticidad u'v' luminaria VSAP. Fuente: CS-S1W	154
Figura A2.20 Distribución relativa espectral luminaria VSAP. Fuente: CS-S1W	155
Figura A2.21 Diagrama de cromaticidad xy luminaria HM. Fuente: CS-S1W.....	155
Figura A2.22 Diagrama de cromaticidad uv luminaria HM. Fuente: CS-S1W	156
Figura A2.23 Diagrama de cromaticidad u'v' luminaria HM. Fuente: CS-S1W	156
Figura A2.24 Distribución relativa espectral luminaria HM. Fuente: CS-S1W	157

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Análisis DAFO tecnología LED versus descarga: Elaboración propia	23
Tabla 2.1 Número de muestras bajo análisis. Elaboración propia	29
Tabla 2.2 Características técnicas luminaria LGL1AS060WA01. Fuente: Catálogo LEDUS	34
Tabla 2.3 Especificaciones entrada driver LED 60W. Fuente: Catálogo INVENTRONICS	35
Tabla 2.4 Especificaciones de salida driver LED 60W. Fuente: Catálogo INVENTRONICS	36
Tabla 2.5 Características técnicas luminaria LRLT1A080WA02. Fuente: Catálogo LEDUS	36
Tabla 2.6 Especificaciones entrada driver LED 85W. Fuente: Catálogo INVENTRONICS	38
Tabla 2.7 Especificaciones de salida driver LED 85W. Fuente: Catálogo INVENTRONICS	38
Tabla 2.8 Características técnicas luminaria Mini Iridium. Fuente: Catálogo Philips	39
Tabla 2.9 Especificaciones técnicas driver LEDSTREET4 40W. Fuente: Catálogo Philips	40
Tabla 2.10 Características técnicas luminaria LED NaviaP. Fuente: Catálogo Solydi	40
Tabla 2.11 Especificaciones de entrada driver LED LPFH. Fuente: Catálogo Meanwell	42
Tabla 2.12 Especificaciones de salida driver LED LPFH. Fuente: Catálogo Meanwell	42
Tabla 2.13 Características técnicas luminaria LED Aire 7. Fuente: Catálogo ATP	43
Tabla 2.14 Especificaciones técnicas driver TRIDONIC LCO 200W. Fuente: Catálogo TRIDONIC	44
Tabla 2.15 Características técnicas lámpara VSAP. Fuente: Catálogo Philips	45
Tabla 2.16 Especificaciones técnicas arrancador semiparalelo lámpara VSAP. Fuente: Catálogo Philips	47
Tabla 2.17 Características técnicas lámpara HM. Fuente: Catálogo Philips	48
Tabla 2.18 Especificaciones técnicas balasto lámpara HM. Fuente: Catálogo Philips	49
Tabla 2.19 Características técnicas de entrada analizador de red. Fuente: Manual Fluke	51
Tabla 2.20 Especificaciones de rango de medida, resolución y precisión. Fuente: Catálogo Fluke	52
Tabla 2.21 Especificaciones técnicas sonda de corriente i430. Fuente: Catálogo Fluke	53
Tabla 2.22 Especificaciones y características Espectro CS-1000A. Fuente: Konica Minolta	56
Tabla 2.23 Especificaciones técnicas cromatógrafo CL-200A. Fuente: Konica Minolta	58
Tabla 2.24 Especificaciones generales cámara térmica Ti25. Fuente: Catálogo Fluke	59
Tabla 2.25 Especificaciones detalladas cámara Ti25. Fuente: Catálogo Fluke	60
Tabla 2.26 Plantilla de recogida de datos estudio eléctrico. Fuente: Elaboración propia	61
Tabla 2.27 Plantilla de recogida de datos estudio lumínico. Fuente: Elaboración propia	63
Tabla 2.28 Plantilla de recogida de datos estudio térmico. Fuente: Elaboración propia	65
Tabla 3.1 Tabla de recogida de datos día 1 de medición, intervalo 0-5 min. Fuente: Elaboración propia	67
Tabla 3.2 Media aritmética de arranque en frío. Fuente: Elaboración propia	72
Tabla 3.3 Varianza en arranque en frío. Fuente: Elaboración propia	73
Tabla 3.4 Desviación típica en arranque en frío. Fuente: Elaboración propia	73
Tabla 3.5 Valores máximos de arranque en frío. Fuente: Elaboración propia	74
Tabla 3.6 Valores mínimos de arranque en frío. Fuente: Elaboración propia	74
Tabla 3.7 Media aritmética de arranque en caliente. Fuente: Elaboración propia	75
Tabla 3.8 Varianza en arranque en caliente. Fuente: Elaboración propia	76
Tabla 3.9 Desviación típica en arranque en caliente. Fuente: Elaboración propia	76
Tabla 3.10 Valores máximos de arranque en caliente. Fuente: Elaboración propia	77
Tabla 3.11 Valores mínimos de arranque en caliente. Fuente: Elaboración propia	77
Tabla 3.12 Coeficientes de emisividad de distintos materiales. Fuente: Referencia [23]	79

Tabla 3.13 Datos de temperatura luminaria GL1A. Fuente: Elaboración propia	80
Tabla 3.14 Datos de temperatura luminaria T1A. Fuente: Elaboración propia	82
Tabla 3.15 Datos de temperatura luminaria Mini-Iridium. Fuente: Elaboración propia	84
Tabla 3.16 Datos de temperatura luminaria NaviaP. Fuente: Elaboración propia	86
Tabla 3.17 Datos de temperatura luminaria ATP Aire 7. Fuente: Elaboración propia	88
Tabla 3.18 Datos de temperatura luminaria VSAP. Fuente: Elaboración propia	90
Tabla 3.19 Datos de temperatura luminaria HM. Fuente: Elaboración propia	92
Tabla 3.20 Media aritmética de parámetros lumínicos. Fuente: Elaboración propia	96
Tabla 3.21 Varianza de parámetros lumínicos. Fuente: Elaboración propia	96
Tabla 3.22 Desviación típica de parámetros lumínicos. Fuente: Elaboración propia	97
Tabla 3.23 Valores máximos de parámetros lumínicos. Fuente: Elaboración propia	97
Tabla 3.24 Valores mínimos de parámetros lumínicos. Fuente: Elaboración propia	98
Tabla 3.25 Comparación valores de corriente de arranque medios. Fuente: Elaboración propia	102
Tabla 3.26 Comparación valores de corriente de arranque máximos. Fuente: Elaboración propia	104
Tabla 3.27 Comparación valores de corriente de arranque mínimos. Fuente: Elaboración propia	105
Tabla 3.28 THD Armónicos de corrientes medios. Fuente: Elaboración propia	106
Tabla 3.29 Comparación de coordenadas de cromaticidad debido al efecto de la temperatura máxima. Fuente: Elaboración propia	115
Tabla A1.1 Datos eléctricos día 1 de medición, intervalo 0-5 min. Fuente: Elaboración propia	131
Tabla A1.2 Datos eléctricos día 1 de medición, intervalo 5-10 min. Fuente: Elaboración propia	131
Tabla A1.3 Datos eléctricos día 1 de medición, intervalo 10-15 min. Fuente: Elaboración propia	132
Tabla A1.4 Datos eléctricos día 1 de medición, intervalo 15-30 min. Fuente: Elaboración propia	132
Tabla A1.5 Datos eléctricos día 1 de medición, intervalo 30-45 min. Fuente: Elaboración propia	133
Tabla A1.6 Datos eléctricos día 1 de medición, intervalo 45-60 min. Fuente: Elaboración propia	133
Tabla A1.7 Datos eléctricos día 2 de medición, intervalo 0-5 min. Fuente: Elaboración propia	134
Tabla A1.8 Datos eléctricos día 2 de medición, intervalo 5-10 min. Fuente: Elaboración propia	134
Tabla A1.9 Datos eléctricos día 2 de medición, intervalo 10-15 min. Fuente: Elaboración propia	135
Tabla A1.10 Datos eléctricos día 2 de medición, intervalo 15-30 min. Fuente: Elaboración propia	135
Tabla A1.11 Datos eléctricos día 2 de medición, intervalo 30-45 min. Fuente: Elaboración propia	136
Tabla A1.12 Datos eléctricos día 2 de medición, intervalo 45-60 min. Fuente: Elaboración propia	136
Tabla A1.13 Datos eléctricos día 3 de medición, intervalo 0-5 min. Fuente: Elaboración propia	137

Tabla A1.14 Datos eléctricos día 3 de medición, intervalo 5-10 min. Fuente: Elaboración propia	137
Tabla A1.15 Datos eléctricos día 3 de medición, intervalo 10-15 min. Fuente: Elaboración propia	138
Tabla A1.16 Datos eléctricos día 3 de medición, intervalo 15-30 min. Fuente: Elaboración propia	138
Tabla A1.17 Datos eléctricos día 3 de medición, intervalo 30-45 min. Fuente: Elaboración propia	139
Tabla A1.18 Datos eléctricos día 3 de medición, intervalo 45-60 min. Fuente: Elaboración propia	139
Tabla A1.19 Datos eléctricos día 4 de medición, intervalo 0-5 min. Fuente: Elaboración propia	140
Tabla A1.20 Datos eléctricos día 4 de medición, intervalo 5-10 min. Fuente: Elaboración propia	140
Tabla A1.21 Datos eléctricos día 4 de medición, intervalo 10-15 min. Fuente: Elaboración propia	141
Tabla A1.22 Datos eléctricos día 4 de medición, intervalo 15-30 min. Fuente: Elaboración propia	141
Tabla A1.23 Datos eléctricos día 4 de medición, intervalo 30-45 min. Fuente: Elaboración propia	142
Tabla A1.24 Datos eléctricos día 4 de medición, intervalo 45-60 min. Fuente: Elaboración propia	142
Tabla A2.1 Parámetros lumínicos día 1 de medición. Fuente: Elaboración propia	144
Tabla A2.2 Parámetros lumínicos día 2 de medición. Fuente: Elaboración propia	144
Tabla A2.3 Parámetros lumínicos día 3 de medición. Fuente: Elaboración propia	145

RESUMEN

El campo de las tecnologías en iluminación urbana ha experimentado profundas transformaciones a lo largo de los últimos años. Estos cambios y la aparición de nuevas tecnologías, han provocado una expansión técnica y comercial.

El dilema se plantea en tratar de dar respuesta a las siguientes cuestiones: ¿Es preferible mantener la antigua forma de iluminar ciudades, apostando por las lámparas tradicionales de descarga como las de VSAP o HM? O por el contrario, ¿resulta preferible romper con la antigua forma tecnológica y apostar definitivamente por las nuevas aplicaciones lumínicas, que utilizan como base tecnológica el 'diodo emisor de luz', LED?

Esto obliga a ser precisos en la selección tecnológica, debido a las consecuencias, técnicas y económicas, que pudiera ocasionar una desafortunada elección. En juego está, el futuro de la iluminación de nuestras ciudades y los resultados asociados a la eficiencia energética y el ahorro económico que le vienen aparejados. Todo esto, además, enmarcado en una situación difícil a nivel económico y de desinversión en Investigación, Desarrollo e innovación.

El presente trabajo tratar de arrojar un poco de luz y ayudar a responder a las anteriores cuestiones a través de estudios experimentales en laboratorio de las tres áreas más importantes en la que se divide la iluminación urbana: calidad de energía, disipación térmica y eficiencia lumínica, todas ellas relacionadas con un concepto muy importante, en lo que a iluminación urbana se refiere, como es la vida útil de las luminarias.

Para evaluar esta situación y poder poner orden dentro de este rompecabezas, se aprovecharon unas instalaciones en la Escuela Politécnica Superior de Jaén, concretamente en el laboratorio de iluminación y domótica, en funcionamiento, con tecnologías modernas y con equipos de medida que ofrecían garantías, para poder realizar una buena recogida de datos y posteriormente una evaluación y tratamiento de los mismos.

ABSTRACT

The field of technologies in urban lighting has undergone profound transformations in recent years. These changes and the emergence of new technologies have caused a technical and commercial expansion.

The dilemma arises in trying to answer the following questions: Is it preferable to keep the old way of illuminating cities, betting on traditional discharge lamps such as VSAP or HM? Or on the contrary, is it preferable to break with the old technological form and definitely bet on the new light applications, which use the 'light emitting diode', LED as a technological base?

This forces to be precise in the technological selection, due to the consequences, technical and economic, that could cause an unfortunate election. At stake is the future of lighting in our cities and the results associated with energy efficiency and the economic savings that come with it. All this, in addition, framed in a difficult situation at economic level and of disinvestment in Research, Development and innovation.

The present work try to shed some light and help answer the above questions through experimental laboratory studies of the three most important areas in which urban lighting is divided: quality energy, thermal dissipation and lighting efficiency, all of them related to a very important concept, as far as urban lighting is concerned, as is the useful life of the luminaires.

To assess this situation and to be able to put order within this puzzle, facilities were used at the Superior Polytechnic School of Jaén, specifically in the lighting and home automation laboratory, in operation, with modern technologies and with measuring equipment that offered guarantees, to to be able to make a good collection of data and subsequently an evaluation and treatment of them.

PALABRAS CLAVE

LED, HM, VSAP, corriente de pico, armónicos, arranque, disipación térmica, calidad lumínica, coordenadas de cromaticidad y vida útil.

Contenidos

ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE TABLAS	7
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
PALABRAS CLAVE	12
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Evolución tecnológica del alumbrado público	15
1.2 Análisis DAFO tecnología LED versus descarga	23
1.3 Problemas de la tecnología LED	24
2. HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA	29
2.1 Objeto y alcance del trabajo	29
2.1.1 Calidad de energía	29
2.1.2 Calidad lumínica	31
2.1.3 Disipación térmica	32
2.2 Características técnicas de las luminarias	34
2.2.1 Luminaria GL1A Modular LED 60W modelo Jaén	34
2.2.2 Luminaria T1A Modular LED 80W modelo Jaén	36
2.2.3 Luminaria LED Philips Mini Iridium	38
2.2.4 Luminaria LED NaviaP	40
2.2.5 Luminaria LED ATP Aire 7	42
2.2.6 Luminaria de descarga VSAP	45
2.2.7 Luminaria de descarga HM	48
2.3 Características técnicas de los equipos de medida	50
2.3.1 Analizador de red	50
2.3.2 Espectrorradiómetro	54
2.3.3 Cromatógrafo	57
2.3.4 Cámara termográfica	58
2.4 Descripción detallada del método de medición utilizado	61
2.4.1 Estudio eléctrico	61
2.4.2 Estudio lumínico	63
2.4.3 Estudio térmico	64
3. RESULTADOS	66
3.1 Resultados eléctricos	66

3.1.1 Arranque en frío	72
3.1.2 Arranque en caliente	75
3.2 Resultados térmicos	78
3.2.1 Luminaria LED GL1A	80
3.2.2 Luminaria LED T1A	82
3.2.3 Luminaria LED Mini-Iridium	84
3.2.4 Luminaria LED NaviaP	86
3.2.5 Luminaria LED ATP Aire 7	88
3.2.6 Lámpara de descarga VSAP	90
3.2.7 Lámpara de descarga HM	92
3.3 Resultados lumínicos	94
4. DISCUSIÓN	101
4.1 Resultados eléctricos	101
4.2 Resultados térmicos/lumínicos	107
5. CONCLUSIONES	121
5.1 Resultados eléctricos	121
5.2 Resultados térmicos/lumínicos	123
Bibliografía	126
ANEXOS	129
Anexo 1	130
Anexo 2	143

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Evolución tecnológica del alumbrado público

El alumbrado público ha sufrido una gran evolución tecnológica desde el año 1931, momento en el que aparecieron las primeras lámparas de vapor de mercurio en Europa. El principio de funcionamiento de esta lámpara consiste en el cierre de un interruptor produciendo un arco entre los dos electrodos de la lámpara, ionizando el gas contenido en el interior del tubo iniciando la descarga principal. La descarga se produce en primer lugar a través del gas ya que el mercurio está a temperatura ambiente y con una presión baja. Progresivamente el mercurio va aumentando su temperatura y se vaporiza aumentando la presión del interior del tubo y consecuentemente la tensión entre los bornes de la lámpara. Pasados unos minutos el mercurio está completamente volatilizado y la descarga se produce a través de este. En este momento aumenta el flujo luminoso y varía el color de la fuente. Cuando se llega al equilibrio la intensidad la regula el balasto [1]

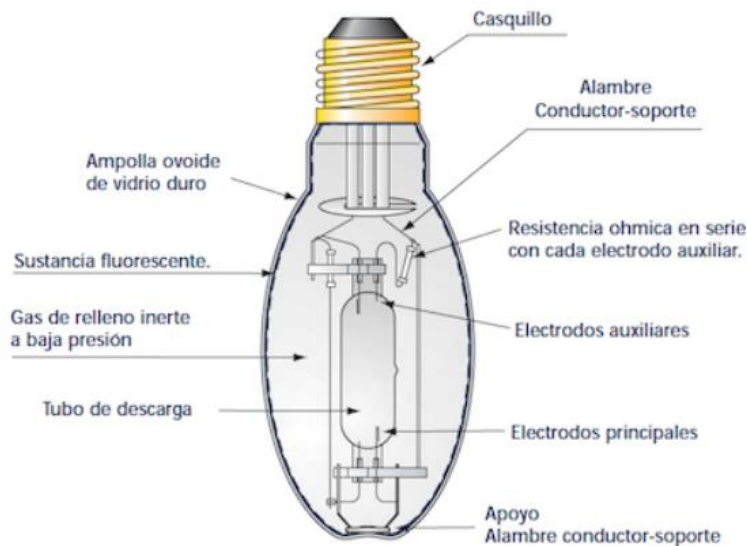


Figura 1.1 Componentes de la lámpara de vapor de mercurio-Fuente: Manual Iluminación INDAL

Estas lámparas necesitan una reactancia que limitan el paso de intensidad a través del tubo y estabilizan la descarga. No necesitan equipo de arranque y tienen un condensador conectado en serie con la lámpara cuya función será la corrección del factor de potencia [1]

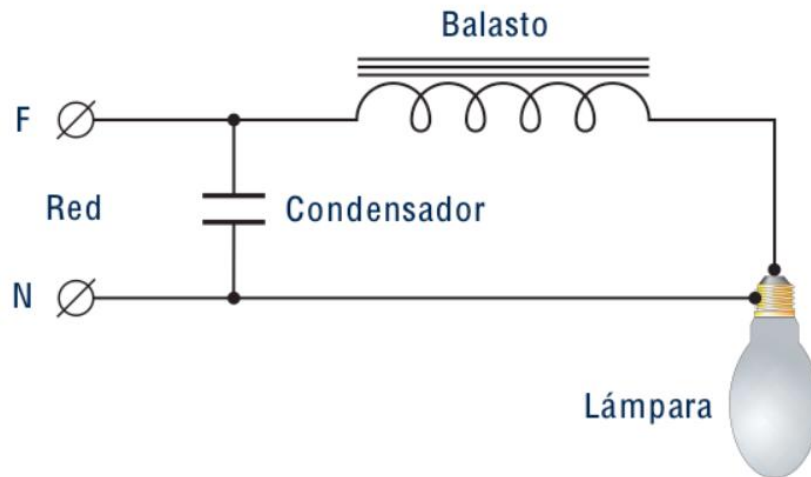


Figura 1.2. Esquema de funcionamiento lámpara de vapor de mercurio-Fuente: Manual Iluminación INDAL

A partir del año 2015 se empezaron a prohibir en España en las obras nuevas de alumbrado público y se recomendaba su sustitución en las instalaciones existentes.

En el año 1955, apareció una lámpara más avanzada y de evolución tecnológica con respecto a la de vapor de mercurio, denominada lámpara de Vapor de Sodio de Alta Presión (VSAP). Se mejoraron las características de las luminarias de alumbrado público con estas lámparas, pero la eficacia luminosa y la reproducción cromática fue el punto débil de éstas.

El principio de funcionamiento es más simple que el de la tecnología de vapor de mercurio y consiste en que la luz se obtiene por la emisión generada en el choque de los electrones libres con los átomos del gas del tubo de descarga. Los choques excitan a los electrones que pasan a un nivel energético superior. Cuando estos electrones regresan a su órbita natural, se produce la emisión de los fotones, es decir, de la radiación de luz [1]

Las radiaciones emitidas por estas lámparas representan un espectro de emisión con bandas más anchas, donde el tubo de descarga de la luminaria puede llegar a alcanzar los 1000°C

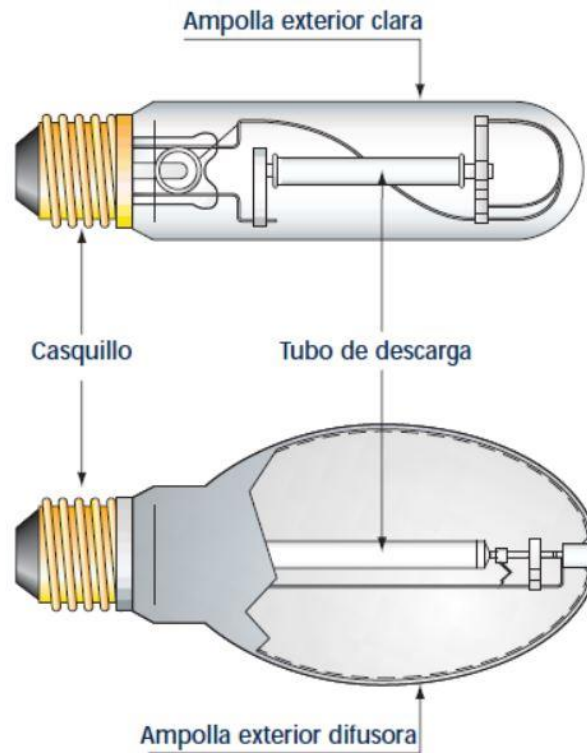


Figura 1.3. Partes de la lámpara de vapor de sodio de alta presión-Fuente: Manual Iluminación INDAL

Las luminarias de Vapor de Sodio de Alta Presión necesitan una tensión elevada durante su proceso de arranque, luego necesitan un equipo auxiliar para encenderse. El equipo auxiliar está formado por un balasto y un arrancador que puede ir conectado en serie o en semiparalelo. Para corregir el factor de potencia se conecta un condensador en paralelo [1]

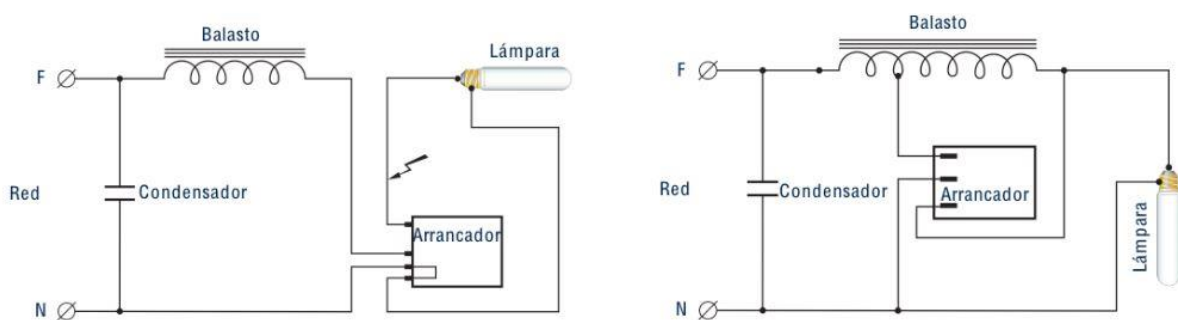


Figura 1.4. Esquema con arrancador independiente y esquema con arrancador semiparalelo-Fuente: Manual Iluminación INDAL

Estas luminarias tienen un color amarillento dorado, y se utilizan para alumbrado exterior siempre que el rendimiento cromático no deba ser elevado.

Paralelamente a la lámpara VSAP y sobre el año 1960, aparecieron las primeras lámparas de Halogenuros Metálicos (HM). En el interior del tubo de descarga se añaden aditivos metálicos para potenciar determinadas zonas del espectro visible de modo que aumenta su rendimiento, tanto luminoso como de color. La composición espectral de estas lámparas es muy completa y se puede adaptar a las necesidades del usuario porque depende de la composición de los metales añadidos.

El principio de funcionamiento es muy parecido al de la lámpara de vapor de mercurio (Hg). La luz se obtiene por la descarga eléctrica que se genera por la diferencia de potencial entre los electrodos. Esta diferencia provoca que un flujo de electrones atraviese el gas, y así excite los átomos contenidos en el tubo de descarga. Dependiendo del ioduro con el que se rellene el tubo la excitación de los átomos producirá distintos colores [1]

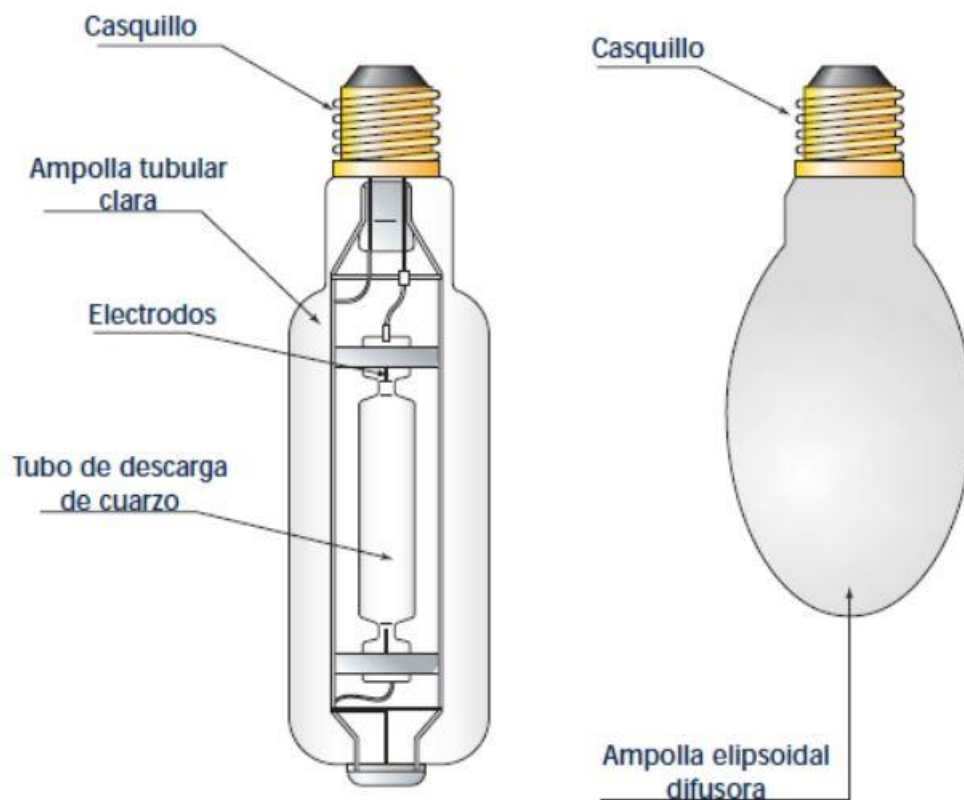


Figura 1.5. Partes de la lámpara de halogenuros metálicos-Fuente: Manual Iluminación INDAL

En el arranque de las lámparas de HM es necesaria una tensión de arranque muy elevada debido a los halogenuros. Para conseguirla, es necesario conectar un arrancador, que tiene como elemento fundamental un tiristor, responsable de suministrar un pico de tensión. Además del arrancador, el equipo auxiliar de arranque contiene un balasto en serie con el tubo de descarga para estabilizar la descarga y un condensador para compensar el factor de potencia. El tiempo necesario para alcanzar las condiciones de régimen está entre los 3-5 minutos. [1]

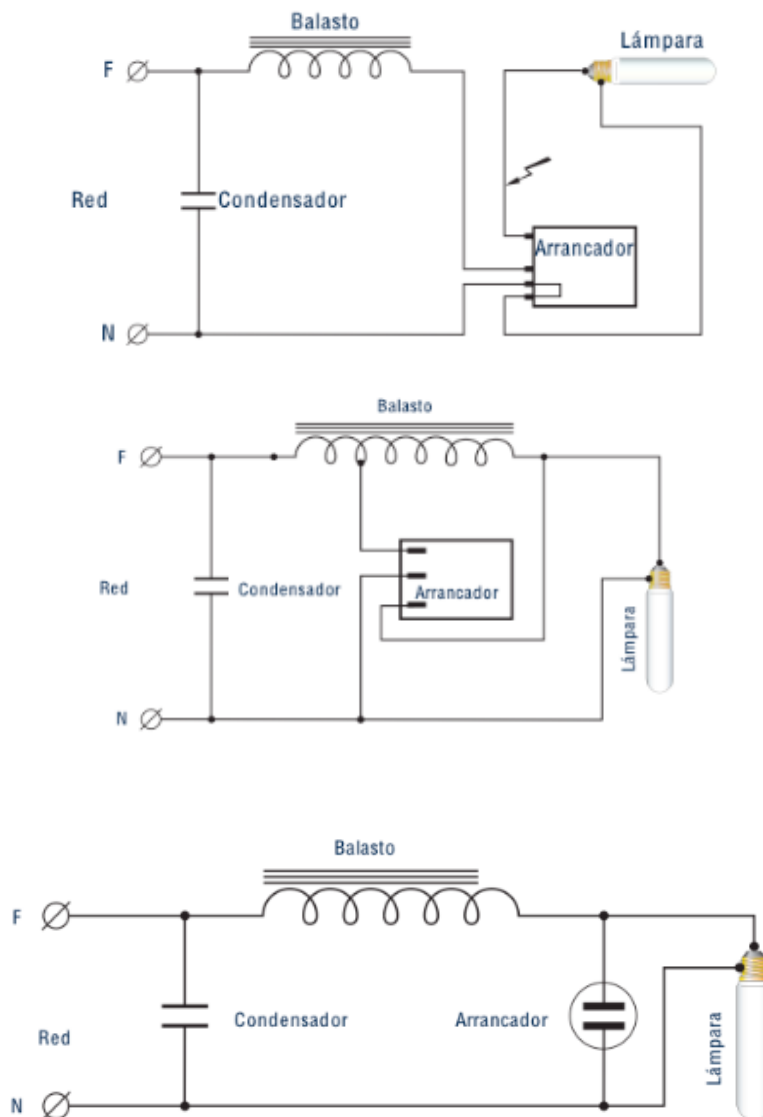


Figura 1.6.Esquemas de cableado con: arrancador independiente, semiparalelo y paralelo-Fuente: Manual Iluminación INDAL

Este tipo de lámparas se utilizan en lugares donde es necesario un alto rendimiento cromático, como por ejemplo espacios deportivos, centros comerciales, fachadas, monumentos, retransmisiones de televisión, etc.

Fue a partir del año 2000, cuando se produjo la mayor revolución tecnológica con respecto a consumo y eficiencia energética en el alumbrado público con el desarrollo de las luminarias con tecnología LED.

Estas luminarias se basaron en el desarrollo de los LED de potencia. Se define un diodo LED como un dispositivo electrónico semiconductor unidireccional. Cuando el LED está polarizado de forma directa (la tensión del ánodo es positiva, y la tensión del cátodo es negativa) y circula corriente a través de ellos, los electrones libres de la capa N se mueven a través del diodo y se combinan con los huecos de la capa P, implicando una caída de la banda de conducción a un menor orbital, de manera que los electrones liberan energía en forma de fotones (luz). El tamaño del salto de banda define el color de la luz [1]

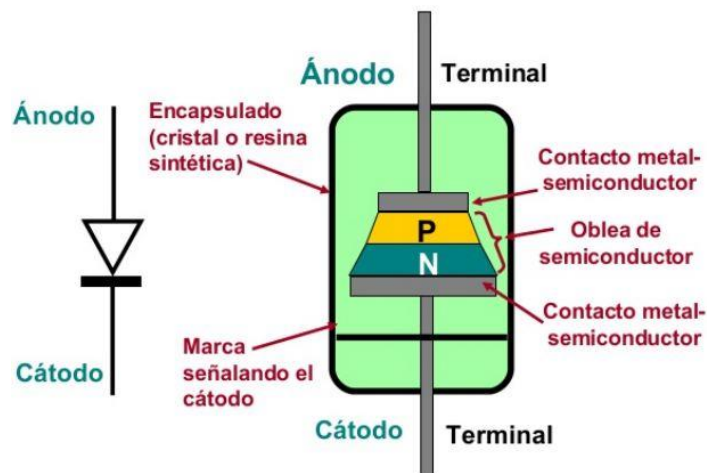


Figura 1.7. Estructura diodo LED-Fuente: Manual Iluminación INDAL

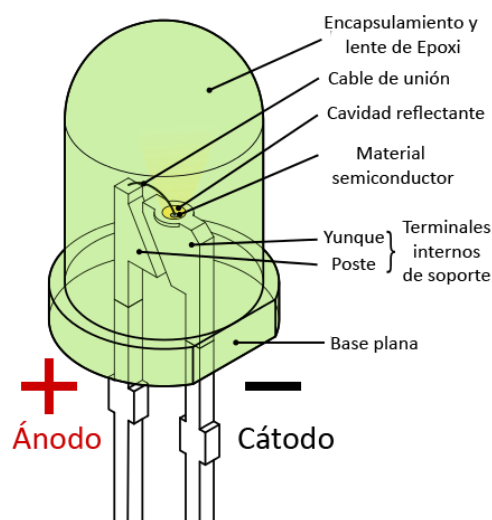


Figura 1.8. Componentes y patillaje del diodo LED-Fuente: Manual Iluminación INDAL

Los LED se diseñan para trabajar con corrientes concretas, a diferencia de las tecnologías expuestas anteriormente que están construidas para trabajar con una tensión determinada.

Estos dispositivos semiconductores se alimentan con una fuente de corriente continua a través de una resistencia en serie para limitar y controlar la corriente y conseguir un correcto funcionamiento y alargar la vida del componente.

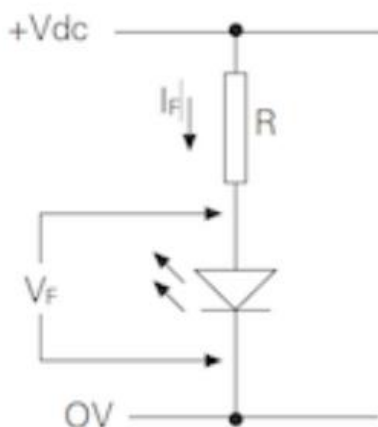


Figura 1.9. Conexión de una lámpara LED-Fuente: Manual Iluminación INDAL

Las luminarias LED, se alimentan con fuentes de alimentación (Driver), que dependen de la configuración de la lámpara, de la corriente continua a proporcionar y controlar la corriente que los atraviesa. El motivo fundamental es que las variaciones de tensión puede provocar la destrucción de LED cuando existe un aumento de tensión elevado. Por el contrario una disminución de tensión se aprovecha como método de regulación [1]

Actualmente en el ámbito del alumbrado público, se utilizan diodos LED de alta luminosidad, son más complejos porque incorporan elementos para disipar el calor que permiten soportar corrientes mayores para proporcionar más flujo luminoso.

Los LED, gracias a la alta resistencia que tienen frente a las condiciones ambientales y sus ventajas frente a las lámparas incandescentes, se pueden utilizar en cualquier ámbito de la iluminación exterior [1]

A modo de resumen y para dar una visión más general de la evolución tecnológica y la eficiencia energética que ha sufrido el alumbrado público, que ha sido expuesto en este punto, se puede observar el siguiente gráfico donde se representa la eficiencia energética de cada luminaria y su año de aparición.

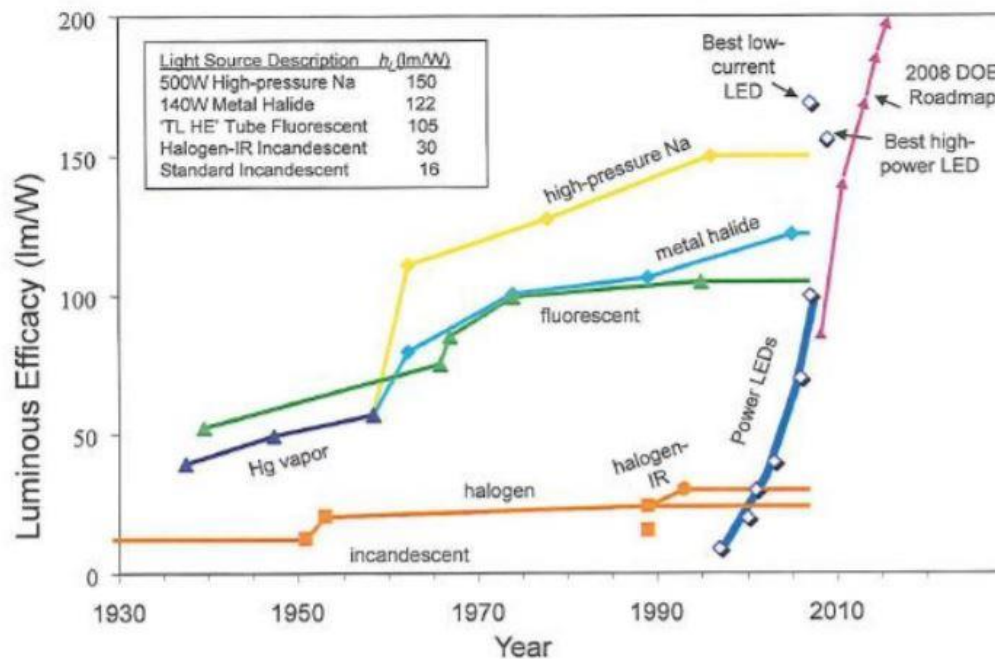


Figura 1.10. Gráfico de evolución del alumbrado público-Fuente: Manual de Iluminación INDAL

1.2 Análisis DAFO tecnología LED versus descarga

El análisis DAFO, se trata de un mapa a través del que se establecen las debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades de una organización, proyecto, tecnología, etc. En nuestro caso realizaremos el análisis DAFO sobre una tecnología, en éste caso el LED frente a la tecnología de descarga.

Mediante un análisis del entorno externo y las características internas de la tecnología a analizar, esta herramienta permite obtener una representación gráfica de:

- **Debilidades:** Constituyen los aspectos limitadores de la capacidad de desarrollo de la tecnología, debido a sus características internas.
- **Amenazas:** Son todos los factores externos que pueden llegar a impedir el desarrollo de esta tecnología.
- **Fortalezas:** Reúnen el conjunto de recursos internos, posiciones de poder o cualquier tipo de ventaja competitiva frente a otras tecnologías.
- **Oportunidades:** Factores ajenos que favorecen el desarrollo de la tecnología o brindan la oportunidad de implantar mejoras.

	Análisis interno	Análisis externo
	Debilidades	Amenazas
Negativo	Tecnología más cara respecto a la de descarga Mal rendimiento en altas temperaturas por los componentes electrónicos que contienen Requieren una elevada disipación térmica para alargar su vida útil	Aumento del riesgo de enfermedades crónicas debido a su luz blanca Alteración del comportamiento y reproducción de organismos que durante la noche conviven con la luz blanca y alteran su ritmo de vida
Positivo	Bajo consumo energético Larga durabilidad Alto índice de reproducción cromática Menor contaminación lumínica	Producen menos emisiones de CO₂ para conseguir la misma iluminación Mayores ayudas y financiación para su implantación Reducción de materias primas para su fabricación al tener una elevada vida útil

Tabla 1.1 Análisis DAFO tecnología LED versus descarga: Elaboración propia

1.3 Problemas de la tecnología LED

El uso de la tecnología LED en la iluminación del alumbrado público parecía plantear una prometedora revolución con una ventaja evidente: la del ahorro energético que se lograría al usarla.

Esa revolución se ha visto comprometida por una serie de problemas térmicos, eléctricos y lumínicos que se han ido estudiando a medida que esta tecnología comenzaba a implantarse en nuestras ciudades.

Comenzando por la parte de disipación térmica, uno de los mayores problemas que presenta la tecnología LED, es la gran cantidad de calor que tiene que evacuar al exterior con respecto a la tecnología de descarga. La gran cantidad de componentes electrónicos que forma una luminaria LED, hace que la generación de calor en su interior sea muy grande [2] . La mayor parte del calor se produce en el driver (80%), y en los diodos emisores de luz (20% aprox) [3] . El calor generado en el driver es muy grande debido a su propio funcionamiento, ya que él es el encargado de la protección de los LED mediante una tensión y una intensidad adecuadas.

El funcionamiento de un driver LED, es básicamente un puente rectificador de diodos de onda completa, que transforma la corriente alterna (CA) en corriente continua (CC) y adapta la tensión y corrientes de salida para el correcto funcionamiento del LED. La tensión de alimentación de una luminaria LED es la red (230 V eficaces), esta tensión pasa por un transformador de tensión reductor que adapta la tensión a la entrada del puente. La entrada, consiste en un puente de cuatro diodos que conducen dos a dos, según se encuentre el ciclo de la onda de tensión (positivo o negativo) y que rectifica completamente la onda de tensión, posteriormente pasa por un condensador que es el encargado de generar la corriente continua mediante su propia carga y descarga. Una vez se ha generado ésta, un diodo Zener es el encargado de estabilizar y limpiar la corriente continua para que puede ser consumida por la carga (Diodo LED).

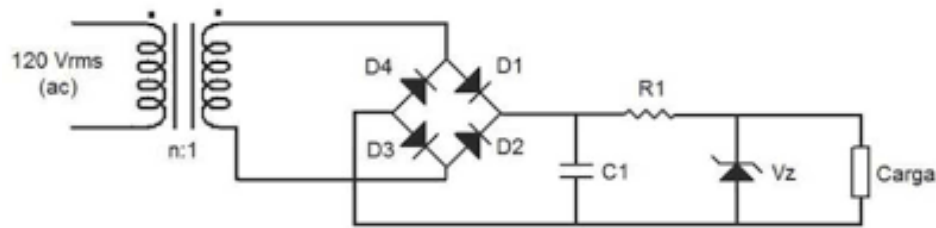


Figura 1.11. Componentes driver LED-Fuente: Manual Iluminación INDAL

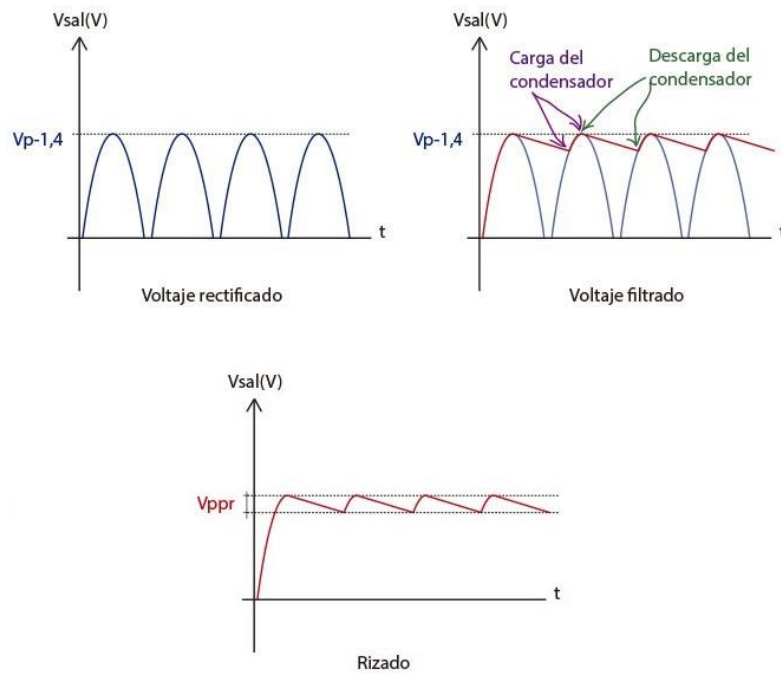


Figura 1.12. Formas de onda en el driver LED-Fuente: Manual Iluminación INDAL

Como se puede observar el uso de componentes electrónicos es grande, y la generación de calor es muy elevada, luego una mala disipación térmica provoca una disminución muy importante de la vida útil de la luminaria [4] .

El segundo grupo de problemas que presenta la tecnología LED es en la parte eléctrica [5] . La introducción a gran escala de lámparas LED impacta dos perturbaciones importantes de la calidad de la energía: distorsión o contaminación armónica [6] y corriente de pico en el arranque [7]

La distorsión armónica de las lámparas LED es más alta que las luminarias de descarga (debido a los componentes electrónicos que contienen). La preocupación de los operadores de red es que grandes cantidades de estas luminarias impactarán en la red de manera negativa con altos niveles de armónicos [6] y supraharmónicos [8] . La preocupación es que aunque el valor absoluto de la emisión de una lámpara pueda

ser bajo, es probable que las luminarias se instalen en grandes cantidades y que la emisión combinada resultante de las lámparas pueda ser muy importante. Esto derivará en calentamiento en los conductores y por consiguiente riesgo de incendio en la instalación si no está bien protegida la línea.

Con respecto a la corriente de pico en el arranque, se puede decir que los equipos electrónicos en luminarias mejoran significativamente su eficiencia lumínica, lo que aumenta la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación. Sin embargo, el uso de la electrónica [por ejemplo el uso de balastos electrónicos para lámparas de descarga o drivers para luminarias LED] también pueden causar algunos efectos negativos en la instalación de iluminación. Uno de estos efectos es la gran corriente de entrada [7] , que puede exceder en gran medida, la carga de línea admisible y activar los dispositivos de protección contra sobre-corriente. Para solventar este problema actualmente se realiza un encendido progresivo mediante circuitos, es decir, encender bloques de luminarias de forma progresiva en vez de provocar el encendido masivo de las lámparas, para así intentar mitigar este problema [7]

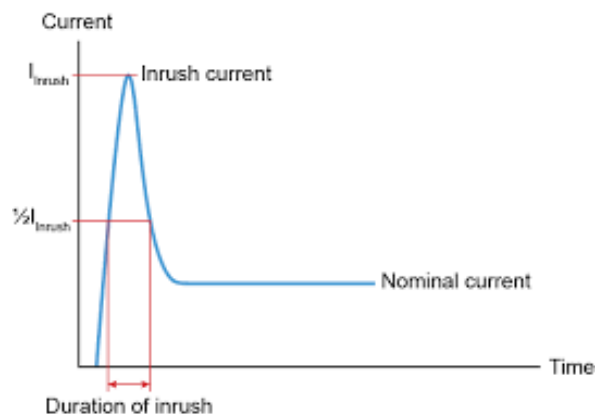


Figura 1.13. Corriente pico en el arranque luminaria LED-Fuente: eldoLED

Para terminar con los problemas que presenta esta tecnología, estudiamos la parte lumínica. Estudios recientes han demostrado que el uso de iluminación LED en exteriores tiene un coste medioambiental importante, ya que la contaminación lumínica, debido a la temperatura de color más fría en las luminarias LED, degrada los ecosistemas en todo nuestro planeta [9] .

Se esperaba que con la adopción de soluciones LED los países desarrollados aparecieran “oscurecidos” en las imágenes tomadas por un satélite gracias al menor

impacto de esa tecnología, pero su uso masivo ha hecho que esa iluminación simplemente se mantenga o incluso se incremente.

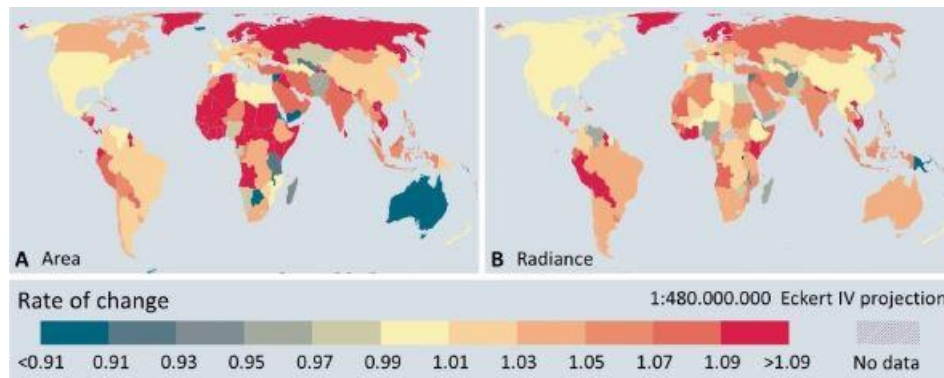


Figura 1.14. Patrones geográficos de cambios en la iluminación pública: Referencia [6]

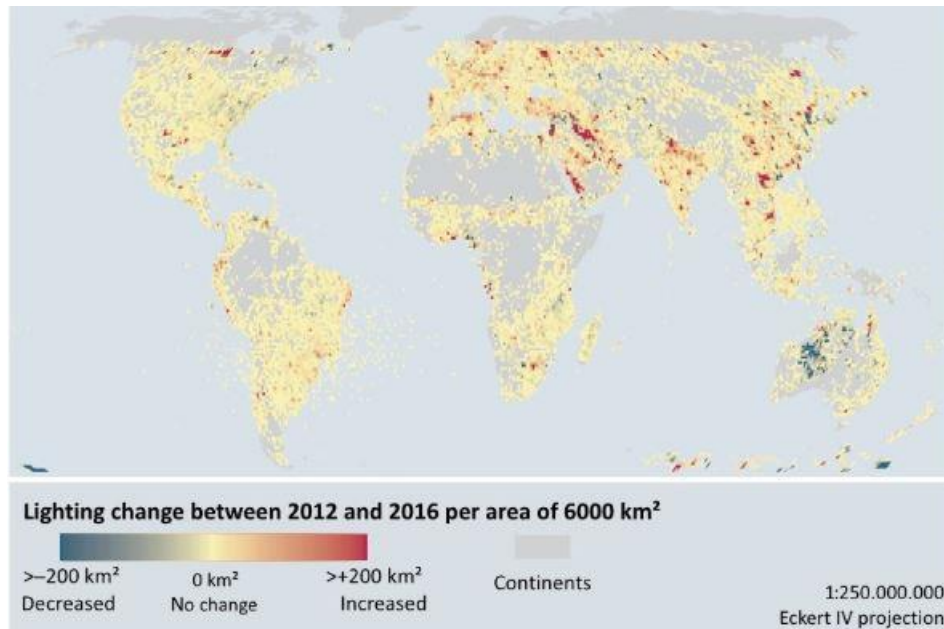


Figura 1.15. Cambio absoluto en el área iluminada de 2012 a 2016-Fuente: Referencia [6]

Los resultados del estudio alertaban del peligro de hacer que la contaminación lumínica comprometa “el bienestar de prácticamente cualquier organismo de nuestro planeta incluyendo a los seres humanos”.

Hace tiempo que este tipo de luz se considera como un contaminante medioambiental importante que puede afectar las rutinas de animales, plantas y microorganismos, pero también la de los humanos, ya que perturba el ritmo circadiano, que puede llevar a sufrir desórdenes del metabolismo.

El problema podría minimizarse usando longitudes de ondas más cortas en las luminarias, es decir, luminarias LED con una iluminación más cálida. Esto se consigue dopando al LED, pero por el contrario estaríamos reduciendo su vida útil.

2. HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA

2.1 Objeto y alcance del trabajo

El presente trabajo trata de un estudio en profundidad de las tres grandes áreas técnicas en las que se divide el alumbrado público: calidad de energía, calidad lumínica y disipación térmica.

Un total de 7 luminarias de alumbrado público se analizaron al detalle en cada una de las tres áreas expuestas anteriormente. De éste total, 1 lámpara pertenecía a la tecnología VSAP, 1 luminaria a la tecnología de HM y 5 luminarias contenían tecnología LED. De las 5 luminarias que pertenecían a la categoría LED, 3 de ellas montaban una tecnología con una antigüedad de 10 años y las 2 últimas eran tecnología LED de última generación.

Tecnología		Número de muestras
VSAP		1
HM		1
LED	10 años antigüedad	3
	Última generación	2
Total		7

Tabla 2.1 Número de muestras bajo análisis. Elaboración propia

2.1.1 Calidad de energía

El término “calidad de energía” hace referencia a una serie de fenómenos electromagnéticos existentes en una red eléctrica que afecta a sus parámetros de tensión y corriente: Desviación de la forma de onda ideal (armónicos), aparición de un estado transitorio (corriente de pico en el arranque), $\cos \varphi$, y simetría [11]

Varios estudios revelan que la generación armónica y las corrientes de pico son los principales problemas y efectos negativos relacionados con la calidad de la energía asociada con las fuentes electrónicas (drivers) de la tecnología LED [12] [13]

Los driver LED son el componente más importante de éste tipo de luminarias para mejorar el concepto de “calidad de energía”. La mayoría de los drivers se basaron en convertidores de tensión de modo conmutado, evolucionando hacia nuevas tipologías de circuito que puedan utilizarse como fuentes de corriente para aplicaciones LED [11]

Se propone una metodología sencilla para detectar y clasificar las perturbaciones de la señal de alimentación de los nuevos equipos de iluminación LED, en comparación con tecnologías LED de distinta antigüedad y tecnologías de descarga (VSAP, HM), que pueden ser importantes a la calidad de potencia de la instalación [14]

- Transitorio: arranques en frío
- Eventual: variaciones en la tensión de alimentación
- Estado estacionario: armónicos, fluctuaciones y variaciones de frecuencia.



Figura 2.1 Set-up experimental para la medición de parámetros eléctricos. Fuente: Referencia [14]

Si se observa el set-up de la imagen anterior, las luminarias bajo test, estarán alimentadas de forma monofásica por la tensión de red (230 V, 50Hz), un analizador de red Fluke, conectado a ellas será capaz de medir cada uno de los parámetros eléctricos más importantes, y mediante el propio software del analizador guardaremos dichos datos para ser tratados posteriormente y extraer conclusiones sobre la calidad de energía de cada una de las luminarias bajo estudio.

Dicho estudio fue el primero en realizarse en el presente trabajo, debido a su larga extensión ya que había 7 luminarias bajo estudio, se realizaron medidas en

varios intervalos de tiempo diferentes (arranque en frío y en caliente), y finalmente se analizaron en varios días de funcionamiento.

2.1.2 Calidad lumínica

El concepto de “calidad lumínica”, engloba diferentes significados, según desde el punto de vista que se analice. Desde el punto de vista del usuario final o del peatón, la calidad de iluminación en las carreteras es importante para aumentar la visibilidad. Desde el punto de vista del propietario o de la empresa de servicios de iluminación, la iluminación de la calzada es importante porque el sistema seleccionado cumple con los requisitos fotométricos de la aplicación con la mayor eficacia posible, de modo que se minimizan los costos de operación del sistema. Desde el punto de vista de la calidad de iluminación, la iluminación de la calzada debe ofrecer niveles de luz, uniformidad y contraste de objetivos suficientes de acuerdo con el tipo de calzada y las necesidades visuales de los usuarios en diversas condiciones de iluminación. Las necesidades visuales más comunes de conductores y peatones incluyen la identificación de objetos, obstáculos e individuos tanto en el campo de visión directo como en la periferia. Igualmente importante es la minimización del deslumbramiento (directo y reflejado) y la contaminación lumínica para hacer que las apariencias de los espacios sean atractivas. Por lo tanto, la efectividad de un sistema de iluminación de una carretera determinada se debe determinar por la manera en que se cumplan los objetivos de iluminación considerando la potencia y el costo necesarios para alcanzarlos, en lugar de juzgar solo la eficiencia luminosa de la fuente de luz o la luminaria en ausencia de contexto [15]

En este estudio se pretendía estudiar la evolución desde el punto de vista luminotécnico de las diferentes luminarias mencionadas anteriormente. Para ello se contará con la ayuda de un instrumento de medida denominado espectroradiómetro, que posteriormente se definirá en los siguientes apartados. Dicho estudio se llevó a cabo en una habitación cerrada, sin ninguna contaminación lumínica exterior que pudiese perturbar las medidas realizadas y éstas fueran representativas. Para realizar las medidas se situaban las luminarias de manera que el foco de luz incidiera directamente sobre el espectroradiómetro y con una distancia longitudinal al mismo, lo suficientemente grande como para no provocar la obturación del sensor de medida.

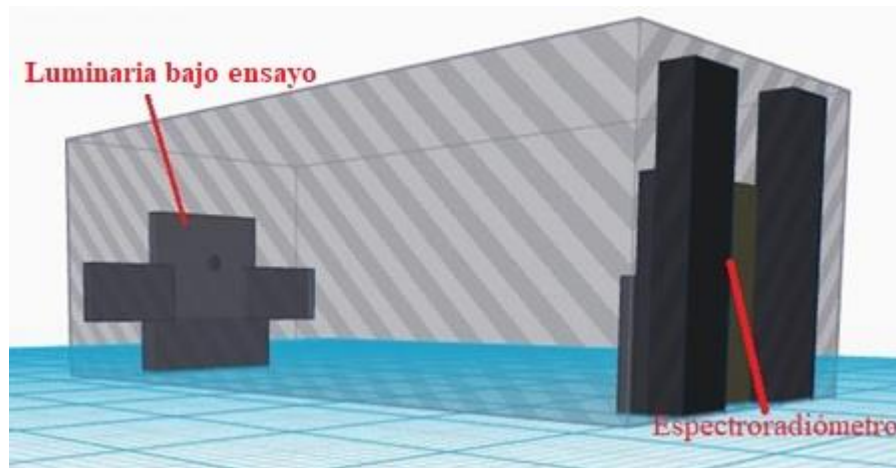


Figura 2.2 Set-up experimental para medición de parámetros lumínicos. Fuente: Elaboración propia

El estudio de la evolución desde el punto de vista luminotécnico de dichas luminarias se basó en diferentes parámetros del espacio de color CIE 1931, que será descrito detalladamente en los siguientes epígrafes.

2.1.3 Disipación térmica

Debido a que la iluminación con diodos LED tiene la ventaja de una vida útil más larga y la eficiencia lumínica también se ha mejorado, como resultado, el mercado de los dispositivos de iluminación LED ha crecido rápidamente recientemente. Sin embargo, debido a este hecho, se produce un grave problema de disipación de calor, ya que casi el 70% de la energía total consumida por el dispositivo de iluminación LED se emite como calor y se debe eliminar para obtener una mayor eficiencia y una mayor vida útil. El rendimiento y la vida útil de las luminarias LED se volverán deficientes y cortos si el calor no se disipa correctamente [16]

Hoy en día, se requiere que se aplique mayor potencia al dispositivo LED para producir más salida de luz, por lo tanto, el calor total generado por la luminaria LED también se incrementará significativamente. Si no se enfría lo suficiente, se reducirá tanto la vida útil como la eficiencia luminosa del dispositivo LED. Por lo tanto, para comercializar los dispositivos LED de alta potencia, el problema de la disipación de calor debe superarse primero [17]

El desarrollo de una tecnología de refrigeración efectiva es considerado como un importante requisito para un régimen de operación admisible que no reduzca la vida útil de los dispositivos de iluminación.

En éste último estudio llevado a cabo en el presente trabajo, proponemos una metodología para el estudio de la efectividad en la disipación de calor de las distintas luminarias bajo análisis mediante la curva de evolución de temperatura de cada una de ellas. La realización de dicha curva se realizó con la ayuda de una cámara termográfica, que será descrita detalladamente en los siguientes apartados.



Figura 2.3 Set-up experimental para medición de temperatura en luminarias. Fuente: Elaboración propia

La realización de dicho estudio térmico se realizó simulando unas “condiciones de funcionamiento reales” de las luminarias, es decir, se simuló un régimen de funcionamiento nocturno en una habitación totalmente a oscuras a una temperatura ambiente normal del 25°C y con un intervalo de 8h de trabajo continuas de las luminarias, que es normalmente el tiempo que permanecen encendidas durante la noche en un día normal de funcionamiento.

Dicho estudio se realizó en dos tandas, una primera tanda en la que se estudiaron las lámparas de descarga (HM y VSAP), y una segunda y última tanda en la que se estudiaron las 5 luminarias LED.

2.2 Características técnicas de las luminarias

2.2.1 Luminaria GL1A Modular LED 60W modelo Jaén

Se trata de una luminaria LED de la marca LEDUS de 60W de potencia nominal, que se encuentra instalada en las calles de la ciudad de Jaén. La tabla de características técnicas de dicha luminaria es la siguiente:

Referencia	LGL1AS060WA01
Consumo	60W
Tensión de entrada	AC 90-305V
Factor de potencia	0,95
Eficiencia lumínica	100lm/W
Flujo luminoso	6000lm
Distribución de luz	90º, batwing
Temperatura de color	6000K
CRI	70
Fuente LED	Philips-Lumileds REBEL ES
Material	Aluminio Anodizado
Resistencia al viento	Fuerza 12-Escala de Beaufort
Temperatura de unión	<80°C
Condiciones de trabajo	Temperatura entre -40°C hasta 50°C. Humedad relativa entre 10% y 90%
Temperatura de almacenamiento	Entre -40°C y 50°C
Dimensiones	Diámetro: 445mm. Altura: 494mm
Grado IP	Módulo LED IP68; Fuente de alimentación IP67
Vida útil	50000 horas

Tabla 2.2 Características técnicas luminaria LGL1AS060WA01. Fuente: Catálogo LEDUS



Figura 2.4 Luminaria LGL1AS060WA01. Fuente: Catálogo LEDUS

Dicha luminaria presenta un driver LED de la marca INVENTRONICS modelo EUC-060S105SV-HP04 de 60W que opera desde 90-305 V con un excelente factor de potencia. La alta eficiencia de estos controladores y la compacta carcasa metálica les permite funcionar más eficientemente, mejorando significativamente la confiabilidad y extendiendo la vida útil del producto.

Para garantizar un funcionamiento sin problemas, se proporciona protección contra sobrecargas de entrada, sobre-voltaje de salida, cortocircuito y sobre-temperatura.



Figura 2.5 Driver LED Inventronics de 60W

Las especificaciones de la entrada del driver, se reflejan en la siguiente tabla:

Parámetros	Mínimo	Típico	Máximo	Comentario
Tensión de entrada	90V	-	305V	
Frecuencia de entrada	47Hz	-	63Hz	
Corriente de fuga	-	-	1mA	A 277V y 60Hz de entrada
Corriente de entrada AC	-	-	0,8A	Medido a carga completa y 100 V de entrada
	-	-	0,36A	Medido a carga completa y 200 V de entrada
Pico de corriente	-	-	60A	A 230V de entrada y 25°C de arranque en frío
Factor de potencia	0,9	-	-	Entre 100 y 277 V y 75%-100% de la carga
THD	-	-	20%	

Tabla 2.3 Especificaciones entrada driver LED 60W. Fuente: Catálogo INVENTRONICS

Las especificaciones de salida, se detallarán en esta tabla:

Parámetros	Mínimo	Típico	Máximo	Comentario
Tolerancia corriente salida	-5%	-	5%	
Regulación de línea	-	-	1%	
Regulación de carga	-	-	3%	
Tiempo de encendido	-	0,8s	1,2s	Medido a 120V de entrada
	-	0,4s	0,6s	Medido a 220V de entrada
Eficiencia	87%	89%	-	
Temperatura de operación	(-)35°C	70°C	-	

Tabla 2.4 Especificaciones de salida driver LED 60W. Fuente: Catálogo INVENTRONICS

2.2.2 Luminaria T1A Modular LED 80W modelo Jaén

Se trata de una luminaria LED de la marca LEDUS de 80W de potencia nominal, que se encuentra instalada en los viales y calles de la ciudad de Jaén. La tabla de características técnicas de dicha luminaria es la siguiente:

Referencia	LRLT1A080WA02
Consumo	80W
Tensión de entrada	AC 90-305V
Factor de potencia	0,95
Eficiencia lumínica	100lm/W
Flujo luminoso	8000lm
Distribución de luz	Asimétrica tipo batwing
Temperatura de color	6000K
CRI	70
Fuente LED	Philips-Lumileds REBEL ES
Material	Aluminio Anodizado
Resistencia al viento	Fuerza 12-Escala de Beaufort
Temperatura de unión	<80°C
Condiciones de trabajo	Temperatura entre -40°C hasta 50°C. Humedad relativa entre 10% y 90%
Temperatura de almacenamiento	Entre -40°C y 50°C
Dimensiones	645x330x91 mm
Grado IP	Módulo LED IP68; Fuente de alimentación IP67
Vida útil	50000 horas

Tabla 2.5 Características técnicas luminaria LRLT1A080WA02. Fuente: Catálogo LEDUS

En la siguiente imagen se muestra el aspecto de esta luminaria, que como podemos observar con respecto a la anterior de 60W, es más grande de tamaño y cambia de forma a rectangular, en vez de circular.



Figura 2.6 Luminaria LRLT1A080WA02. Fuente: Catálogo LEDUS

Al igual que la luminaria de 60W, dicha luminaria también presenta un driver LED de la marca INVENTRONICS, modelo EUC-085S070SV-HP04 de 85W que opera desde 90-305V.



Figura 2.7 Driver LED Inventronics de 85W

Como se puede observar en esta imagen, a diferencia del driver de la luminaria anterior cambia la corriente y tensión de salida del controlador, así como también soporta una mayor corriente de entrada al convertidor.

Las especificaciones de la entrada del driver, se reflejan en la siguiente tabla:

Parámetros	Mínimo	Típico	Máximo	Comentario
Tensión de entrada	90V	-	305V	
Frecuencia de entrada	47Hz	-	63Hz	
Corriente de fuga	-	-	0,75mA	A 277V y 60Hz de entrada
Corriente de entrada AC	-	-	1,1A	Medido a carga completa y 100 V de entrada
	-	-	0,5A	Medido a carga completa y 200 V de entrada
Pico de corriente	-	-	60A	A 230V de entrada y 25°C de arranque en frío
Factor de potencia	0,9	-	-	Entre 100 y 277 V y 75%-100% de la carga
THD	-	-	20%	

Tabla 2.6 Especificaciones entrada driver LED 85W. Fuente: Catálogo INVENTRONICS

Las especificaciones de salida, se detallarán en esta tabla:

Parámetros	Mínimo	Típico	Máximo	Comentario
Tolerancia corriente salida	-5%	-	5%	
Regulación de línea	-	-	2%	
Regulación de carga	-	-	3%	
Tiempo de encendido	-	2s	3s	Medido a 120V de entrada
	-	0,6s	1s	Medido a 220V de entrada
Eficiencia	89%	90%	-	
Temperatura de operación	(-)35°C	70°C	-	

Tabla 2.7 Especificaciones de salida driver LED 85W. Fuente: Catálogo INVENTRONICS

2.2.3 Luminaria LED Philips Mini Iridium

Se trata de una luminaria LED de la marca Philips de 20W de potencia nominal, de la familia de productos Iridium. En la siguiente imagen se muestra el aspecto físico de dicha lámpara vial.



Figura 2.8 Luminaria LED Mini Iridium. Fuente: Catálogo Philips

La tabla de características técnicas de dicha luminaria es la siguiente:

Referencia	BGS451 ECO43-2S/740 II MSO GR
Consumo	20W
Tensión de entrada	AC 220-240V
Factor de potencia	0,95
Frecuencia de entrada	50-60 Hz
Eficiencia lumínica	122lm/W
Flujo luminoso	4321lm
Temperatura de color	4000K
CRI	70
Material	Aluminio Anodizado
Condiciones de trabajo	Temperatura entre -20°C hasta 35°C. Humedad relativa entre 10% y 90%
Dimensiones	154x524x262 mm
Vida útil	50000 horas

Tabla 2.8 Características técnicas luminaria Mini Iridium. Fuente: Catálogo Philips

Dicha luminaria presenta un driver también de la marca PHILIPS modelo LEDSTREET'4 441137071190, de 40W de potencia nominal, que opera entre 220V y 240V con un buen factor de potencia.

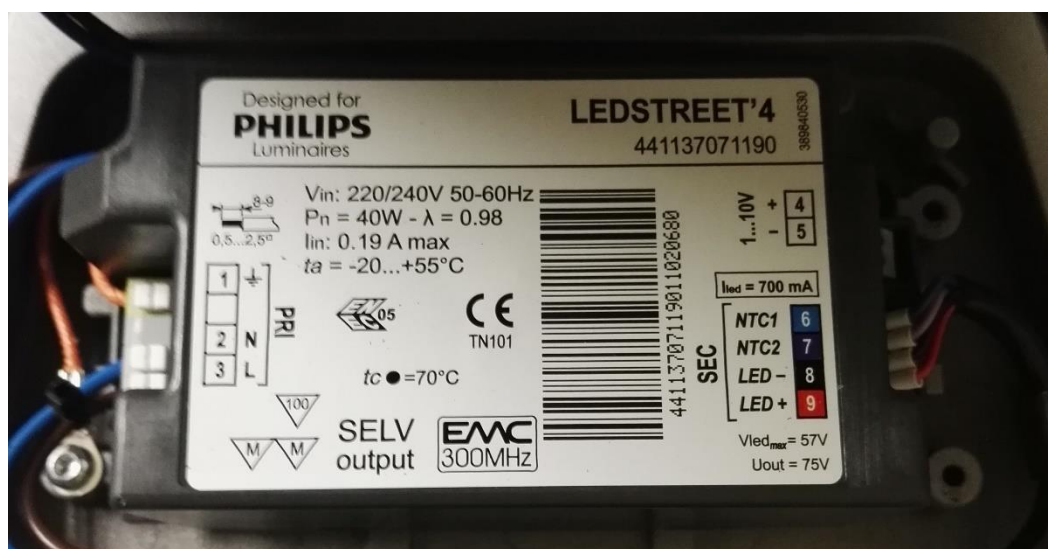


Figura 2.9 Driver LED Philips LEDSTREET4 de 40W

Para garantizar un correcto funcionamiento, se proporciona a la luminaria conectada protección contra sobrecargas de entrada, sobretensiones de salida, cortocircuito y protección térmica por sobretemperatura.

La tabla de especificaciones técnicas del driver son las siguientes:

Parámetros	Mínimo	Máximo
Tensión de entrada	220V	240V
Frecuencia de entrada	45Hz	50Hz
Corriente de entrada	-	0,19A
Potencia nominal	-	40W
Factor de potencia	0,8	-

Tabla 2.9 Especificaciones técnicas driver LEDSTREET4 40W. Fuente: Catálogo Philips

2.2.4 Luminaria LED NaviaP

Se trata de una luminaria LED de la marca Solydi de 50W de potencia nominal, originaria de la ciudad de Málaga y perteneciente a la familia de productos Navia Series. La tabla de características técnicas de dicha luminaria es la siguiente:

Referencia	50-F/N/C/SC
Consumo	50W
Tensión de entrada	AC 100-300V
Factor de potencia	0,95
Eficiencia lumínica	130 lm/W
Flujo luminoso	5450 lm
Temperatura de color	5500K
CRI	70
Fuente LED	CREE Xlamp XT-E
Material	Aluminio de Alta Densidad
Temperatura de unión	85°C
Condiciones de trabajo	Temperatura entre -40°C hasta 70°C. Humedad relativa entre 10% y 90%
Temperatura de almacenamiento	Entre -40°C y 70°C
Dimensiones	500x215x52 mm
Protección mecánica	IP65
Vida útil	90000 horas

Tabla 2.10 Características técnicas luminaria LED NaviaP. Fuente: Catálogo Solydi

Esta luminaria es una de las dos de última tecnología que analizaremos en el presente trabajo, su producción y lanzamiento al mercado data del año 2018, a diferencia de las 5 luminarias anteriormente descritas a ésta que montan una tecnología más antigua en el tiempo, de aproximadamente unos 10 años de antigüedad, como se describió en la tabla resumen del inicio del capítulo.

Una imagen representativa de la luminaria descrita es la siguiente:



Figura 2.10 Luminaria LED NaviaP de 50W. Fuente: Catálogo Solydi

El controlador AC-DC Driver LED que alimenta la luminaria es de la marca MEANWELL, modelo LPFH-60D-24, de potencia nominal 60W que opera entre 200V-400V. Gracias a su alta eficiencia de más del 90%, y al diseño con ventilador, puede operar entre temperaturas extremas de -40°C y 70°C en la carcasa bajo convección de aire. El controlador LPFH-60D está equipado con la función de regulación 3 en 1 luego proporciona un diseño óptimo para sistemas de iluminación LED. Además está clasificado con un nivel de protección IP67.



Figura 2.11 Driver LED Meanwell LPFH de 60W, 24V. Fuente: Catálogo Meanwell

Las especificaciones de la entrada del driver, se reflejan en la siguiente tabla:

Parámetros	Mínimo	Típico	Máximo	Comentarios
Tensión de entrada	200V	-	400V	
Frecuencia de entrada	47Hz	-	63Hz	
Corriente de fuga	-	-	0,75mA	
Corriente de entrada AC	-	-	0,32A	A 347 VAC
	-	-	0,4	A 277 VAC
Pico de corriente	-	-	40A	
Factor de potencia	0,95	-	-	
THD	-	-	20%	

Tabla 2.11 Especificaciones de entrada driver LED LPFH. Fuente: Catálogo Meanwell

Las especificaciones de salida, se detallarán en esta tabla:

Parámetros	Mínimo	Típico	Máximo	Comentario
Tensión DC	-	24V	-	
Corriente DC	-	2,5A	-	
Tolerancia de corriente	-5%	-	5%	
Tiempo de encendido	-	700ms	-	Medido a 277 VAC
	-	500ms	-	Medido a 347VAC
Eficiencia	-	89%	-	
Temperatura de operación	(-)40°C	90°C	-	

Tabla 2.12 Especificaciones de salida driver LED LPFH. Fuente: Catálogo Meanwell

2.2.5 Luminaria LED ATP Aire 7

Se trata de una luminaria LED de la marca ATP de 200W de potencia nominal, originaria de la provincia de Navarra y perteneciente a la familia de productos Aire Series.

Esta luminaria, al igual que la Navia P, son las dos de última tecnología que analizaremos en el presente trabajo, su producción y lanzamiento al mercado data de principios del año 2018. La presente luminaria, es incluso más moderna en cuanto a lo que tecnología se refiere con respecto a la Navia P, ya que incorpora un sistema muy novedoso de disipación de calor por disipador laminar. Además también incorpora un novedoso sistema IoT (Internet of Things) que permite la telegestión, conexión por wifi y programación horaria de encendido y apagado de la luminaria.

La tabla de características técnicas de dicha luminaria es la siguiente:

Referencia	ATP Aire 7
Consumo	200W
Tensión de entrada	AC 100-240V
Factor de potencia	0,95
Eficiencia lumínica	150 lm/W
Flujo luminoso	28284 lm
Temperatura de color	4500K
CRI	70
Material	Aleación de aluminio
Condiciones de trabajo	Temperatura entre -40°C hasta 70°C. Humedad relativa entre 10% y 90%
Protección mecánica	IP67
Vida útil	50000 horas

Tabla 2.13 Características técnicas luminaria LED Aire 7. Fuente: Catálogo ATP

El aspecto físico de la luminaria se puede observar en la siguiente imagen, observándose a simple vista cómo es más moderna tecnológicamente que las primeras lámparas LED que hemos detallado a lo largo del capítulo, superando incluso a la NaviaP.



Figura 2.12 Luminaria LED Aire 7 de 200W. Fuente: Catálogo ATP

El driver implementado en la luminaria es de la marca TRIDONIC, modelo LCO 200/1400 mA fixC L SNC2, de potencia nominal de 200W, con muy buen factor de potencia.



Figura 2.13 Driver LED Tridonic de 200W. Fuente: Catálogo TRIDONIC

La tabla de especificaciones técnicas del driver son las siguientes:

Parámetros	Mínimo	Máximo
Tensión de entrada	100V	240V
Frecuencia de entrada	50Hz	60Hz
Corriente de entrada	-	0,97A
Potencia nominal	-	200W
Factor de potencia	0,97	-

Tabla 2.14 Especificaciones técnicas driver TRIDONIC LCO 200W. Fuente: Catálogo TRIDONIC

Todas las luminarias descritas hasta el momento, montaban tecnología LED de diferentes años de antigüedad como hemos comentado anteriormente. A partir de ahora las 2 últimas luminarias analizadas en el presente trabajo y descritas a continuación, se trata de luminarias con tecnología de descarga, en concreto dos tecnologías, el Vapor de Sodio de Alta Presión y Halogenuros Metálicos.

Estos modelos de luminarias de descarga ensayadas, fueron elegidos para realizar las pruebas, haciendo un estudio de la tecnología mayormente implantada en iluminación vial antes de la irrupción LED, con el fin de conseguir unos resultados más representativos para nuestro estudio

2.2.6 Luminaria de descarga VSAP

Se trata de una luminaria de descarga de Vapor de Sodio de Alta Presión de la marca PHILIPS de 250W de potencia nominal, con bombilla exterior tubular transparente. La tabla de características técnicas de dicha luminaria es la siguiente:

Referencia	SON-T 250W E E40 1SL
Consumo	250W
Tensión de entrada	AC 100-240V
Corriente nominal	3A
Factor de potencia	0,97
Eficiencia lumínica	110 lm/W
Flujo luminoso	28000lm
Temperatura de color	2000K
CRI	70
Material carcasa	Plástico
Dimensiones del bulbo	47x158x255mm
Longitud del filamento	66mm
Vida útil	30000 horas

Tabla 2.15 Características técnicas lámpara VSAP. Fuente: Catálogo Philips

En la siguiente imagen podemos observar el bulbo de la lámpara, éste fue montado en una carcasa de plástico, dando forma a la luminaria VSAP, que se puede seguir viendo hoy día en iluminación vial.



Figura 2.14 Bulbo luminaria VSAP. Fuente: Catálogo Philips

A diferencia de las luminarias LED que instalaban drivers para el encendido de los LED, en las lámparas de descarga, tanto en VSAP como en HM, poseen un arrancador serie. En la presente lámpara, el balasto serie utilizado es de la marca PHILIPS, modelo SI 51 220-240V 50/60Hz, de potencia nominal 250/400W, tipo HID.



Figura 2.15 Balastro HID para lámpara VSAP. Fuente: Catálogo Philips

Las especificaciones técnicas, pueden encontrarse en la siguiente tabla:

Parámetros	Mínimo	Típico	Máximo
Tensión de entrada	220V	-	240V
Potencial nominal	250W	-	400W
Frecuencia de entrada	50Hz	-	60Hz
Pérdidas de potencia	-	1W	-
Tensión de respuesta	-	190V	-
Tensión para encendido	-	-	0,75kV

Figura 2.16 Especificaciones técnicas balastro lámpara VSAP- Fuente: Catálogo Philips

Además del arrancador serie, para garantizar el correcto encendido de la luminaria, instalaba un arrancador semiparalelo de la marca PHILIPS, modelo BSN 250L 427 ITS, con un alto factor de potencia.



Figura 2.17 Arrancador semiparalelo lámpara VSAP. Fuente: Catálogo Philips

La siguiente tabla refleja las características técnicas, del arrancador semiparalelo:

Parámetros	Mínimo	Típico	Máximo
Tensión de entrada	230V	-	240V
Frecuencia de entrada	-	50Hz	-
Factor de potencia	-	0,85	-
Corriente de entrada con corrección FP	-	1,4A	-
Corriente de entrada con corrección FP		3A	
Potencia	-	250W	-

Tabla 2.16 Especificaciones técnicas arrancador semiparalelo lámpara VSAP. Fuente: Catálogo Philips

La siguiente figura, muestra la disposición en la luminaria de los dos arrancadores analizados, dónde el balasto de color negro es el arrancador serie, y el de color blanco, el semiparalelo.

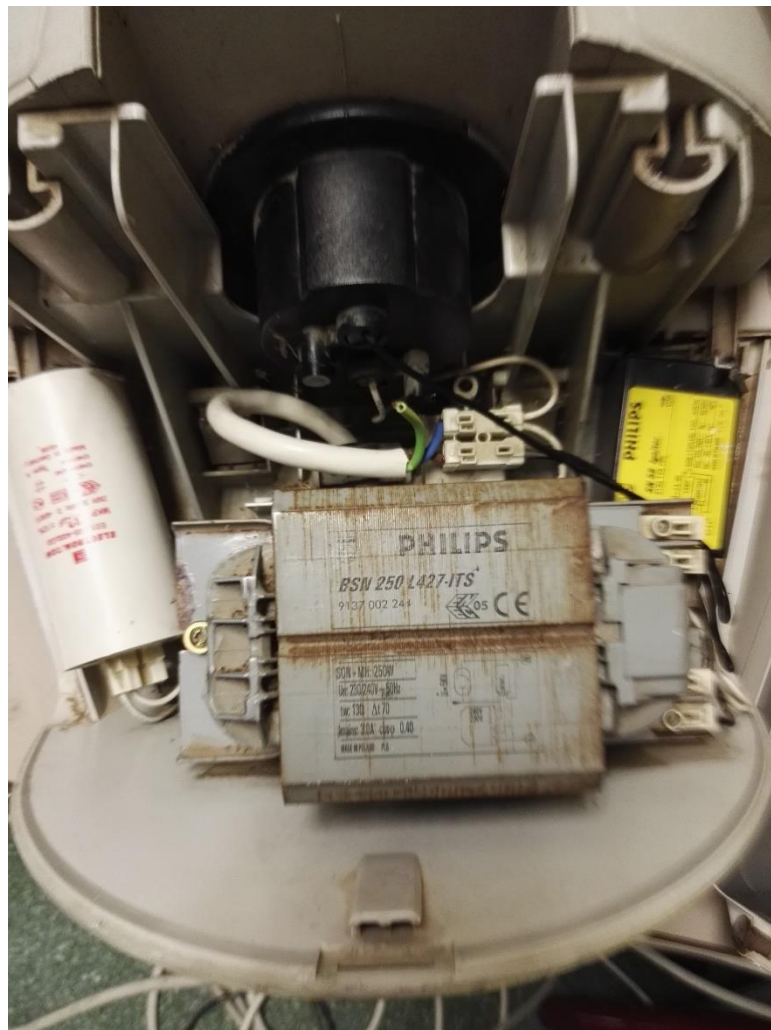


Figura 2.18 Disposición de los arrancadores en la luminaria VSAP

2.2.7 Luminaria de descarga HM

Se trata de una luminaria de descarga de Halogenuros Metálicos de la marca PHILIPS de 100W de potencia nominal, con bombilla exterior tubular transparente. La tabla de características técnicas de dicha luminaria es la siguiente:

Referencia	CDO-TT Plus 100W/828 E40
Consumo	100W
Tensión de entrada	AC 100-240V
Corriente nominal	1,2A
Factor de potencia	0,97
Eficiencia lumínica	108 lm/W
Flujo luminoso	10500lm
Temperatura de color	2800K
CRI	70
Material carcasa	Plástico
Dimensiones del bulbo	47x132x211mm
Longitud del filamento	8,5mm
Vida útil	27000 horas

Tabla 2.17 Características técnicas lámpara HM. Fuente: Catálogo Philips

En la siguiente imagen podemos observar el bulbo de la lámpara, éste fue montado en una carcasa de plástico, dando forma a la luminaria HM.



Figura 2.19 Bulbo luminaria HM. Fuente: Catálogo Philips

En la presente lámpara, el balasto electrónico utilizado es de la marca PHILIPS, modelo HID-PV Base 100 SON/CDO Q 220-240V.



Figura 2.20 Balasto HID lámpara HM. Fuente: Catálogo Philips

Se trata de una familia de controladores electrónicos de gran fiabilidad para lámparas de HM, diseñados para ahorrar energía gracias a una mejor eficacia de la iluminación en comparación con los controladores magnéticos, y para ahorrar costes de mantenimiento gracias a una vida útil de hasta 50.000 horas.

Las especificaciones técnicas, pueden encontrarse en la siguiente tabla:

Parámetros	Mínimo	Típico	Máximo
Tensión de entrada	220V	-	240V
Frecuencia de entrada	50Hz	-	60Hz
Factor de potencia	-	0,95	-
Corriente de entrada nominal	-	0,5A	-
Pico de corriente de irrupción	-	-	35A
Potencia	-	100W	-

Tabla 2.18 Especificaciones técnicas balasto lámpara HM. Fuente: Catálogo Philips

2.3 Características técnicas de los equipos de medida

2.3.1 Analizador de red

Un analizador de red es un aparato de medida capaz de analizar las propiedades de las redes eléctricas, especialmente aquellas relacionadas con la calidad eléctrica (Tensión, corriente, frecuencia, etc) y calidad de energía (Potencia consumida, Armónicos de tensión, armónicos de corriente).

Estos aparatos de medida ayudan a localizar, predecir, evitar y solucionar problemas de calidad eléctrica en sistemas de distribución eléctrica trifásicos y monofásicos. Además, los modelos más avanzados, miden y cuantifican las pérdidas de energía debidas a problemas de armónicos y desequilibrios, lo que permite a los usuarios que lo utilizan, localizar el origen de las pérdidas de energía de un sistema.

El modelo utilizado, para analizar el comportamiento eléctrico y energético de las luminarias, en el presente trabajo, es el Fluke 437 de la gama de productos Serie II.



Figura 2.21 Analizador de red Fluke 437. Fuente: Catálogo Fluke

Las características técnicas de las señales de entrada y de los modos de medida del analizador de red Fluke, se pueden observar en la siguiente tabla resumen, obtenida del catálogo de información:

Entrada	
Entradas de tensión	
Número de entradas	4 (3 fases+ neutro) acopladas en CC
Tensión máxima de entrada	1000 Vrms
Rango de la tensión nominal	Seleccionable 1V a 1000V
Máxima tensión pico de medida	6 kV (solo modo de transitorios)
Impedancia de entrada	4MΩ// 5 pF
Ancho de banda	> 10kHz, hasta 100 kHz para modo de transitorios
Escala	1:1 , 10:1 , 100:1, 1000:1, 10000:1 y variable
Entradas de corriente	
Número de entradas	4 (3 fases+ neutro) acopladas en CC
Tipo	Sonda o transformador de corriente con salida de mV
Rango	De 0,5 Arms a 600Arms (con sensibilidad de 10x) De 5 Arms a 6000 Arms (con sensibilidad de 1x) De 0,1mV/A a 1 V/A para uso con sondas CA o CC
Impedancia de entrada	1MΩ
Ancho de banda	> 10kHz
Escala	1:1 , 10:1 , 100:1, 1000:1, 10000:1 y variable
Sistema de muestreo	
Resolución	Convertidor A/D de 16 bits en 8 canales
Velocidad máxima de muestreo	200 KS/s en cada canal simultáneamente
Muestreo RMS	5000 muestras en 10/12 ciclos
Sincronización de PLL	4096 muestras en 10/12 ciclos
Frecuencia nominal	50Hz, 60Hz y 400 Hz
Modos de medida	
Osciloscopio	Formas de onda Vrms, Vfund, Arms, Afund
V/A/Hz	Vrms fase a fase, Vrms fase a neutro, pico de tensión, factor de cresta de tensión, pico de amperios Arms, factor de cresta amperios, Hz
Armónicos	Armónicos de tensión, armónicos de corriente, armónicos de potencia, interarmónicos y THD
Potencia y Energía	Potencia Activa, Reactiva y Eficaz, PF, cos ϕ , y factor de eficiencia
Corrientes de arranque "inrush"	Amplitud corriente inrush y duración inrush
Monitor	Vrms, Arms, armónicos de tensión, armónicos de corriente, THD, tensión y corriente eficaz, desequilibrio y señales de red

Tabla 2.19 Características técnicas de entrada analizador de red. Fuente: Manual Fluke

Las especificaciones del rango de medida, resolución y precisión son:

Voltios	Rango de medida	Resolución	Precisión
Vrms (CA+CC)	1V a 1000V fase a neutro	0,01V	±0,1% de la tensión nominal
Pico de tensión	1 V pico de tensión a 1400 V pico de tensión	1V	5% de la tensión nominal
Factor de cresta de tensión	1,0 > 2,8	0,01V	5%
Vfund	1V a 1000V fase a neutro	0,1 V	±0,1% de la tensión nominal
Amperios	Rango de medida	Resolución	Precisión
Amperios (CA+CC)	0,5 A a 200A	0,1 A	±0,5%
Pico de corriente	5500 A pico de corriente	1 Arms	±0,5%
Factor de cresta de amperios	1 a 10	0,01	±0,5%
Afund	0,5 A a 200A	0,1A	±0,5%
Hz	Rango de medida	Resolución	Precisión
Frecuencia	42,50 Hz a 69 Hz	0,01 Hz	±0,01 Hz
Alimentación	Rango de medida	Resolución	Precisión
Vatios (VA, var)	máx 2000 MW	0,1 W a 1 MW	±1%
Factor de potencia	De 0 a 1	0,001	±0,1%
Energía	Rango de medida	Resolución	Precisión
kWh(kVAh, kvarh)	Según escala de la sonda de corriente y tensión nominal		±1%
Pérdidas de energía	Según escala de la sonda de corriente y tensión nominal		±1%
Armónicos	Rango de medida	Resolución	Precisión
Tensión	%f	0,10%	±0,01%
	%r	0,10%	±0,01%
	Absoluto	0,1V	±5%
	THD	0,10%	±2,5%
Amperios	%f	0,10%	±0,01%
	%r	0,10%	±0,01%
	Absoluto	0,1A	±5%
	THD	0,10%	±2,5%
Vatios	%f o %r	0,10%	±2%
	Absoluto	-	±5%
	THD	0,10%	±5%
Ángulo de fase	(-)360º a 0º	1º	±1º
Desequilibrios	Rango de medida	Resolución	Precisión
Tensión	0% a 20%	0,10%	±0,1%
Amperios	0% a 20%	0,10%	±1%
Transmisión de señales	Rango de medida	Resolución	Precisión
Niveles de umbral	Programable para las 2 frecuencias de transmisión	-	-
Frecuencia de transmisión	60Hz a 3000Hz	0,1Hz	-
V% relativo	0% a 100%	0,10%	±0,4%

Tabla 2.20 Especificaciones de rango de medida, resolución y precisión. Fuente: Catálogo Fluke

La sonda de corriente utilizada, junto con el analizador de red, es la sonda i430 Flexi-TF, cuyas características técnicas se detallan en la siguiente tabla:

Especificación de la sonda de corriente i430 Flexi-TF	
Especificaciones técnicas	
Rango de corriente	6000 A CA RMS
Salida de tensión (a 1000ARMS , 50Hz)	86,6mV
Precisión	±1% de lectura (25°C, 50Hz)
Linealidad (10% al 100% del rango)	±0,2% de lectura
Ruido (10Hz-7kHz)	1,0 Mv CA RMS
Impedancia de salida	82Ω
Impedancia de carga	50MΩ
Resistencia interna	10,5Ω
Ancho de banda	10Hz a 7kHz
Error de fase	±1º
Sensibilidad de la posición	±2% de lectura máx
Coeficiente de temperatura	±0,08% máx. de lectura por °C
Tensión de servicio	1000V CA RMS o CC, 30V máx salida

Tabla 2.21 Especificaciones técnicas sonda de corriente i430. Fuente: Catálogo Fluke



Figura 2.22 Sonda de corriente i430 Flexi-TF. Fuente: Catálogo Fluke

2.3.2 Espectrorradiómetro

Los espectrorradiómetros son dispositivos diseñados para medir la distribución de la potencia espectral de una fuente. A partir de la distribución espectral de la potencia, la radiometría, fotometría y colorimetría, se pueden caracterizar la mayoría de las fuentes de luz.

Estos aparatos toman medidas de irradiancia espectral y radiancia espectral. Posteriormente estos datos espectrales se utilizan para calcular el espacio de color CIE 1931. Este espacio de color es uno de los primeros espacios definidos matemáticamente y con él se definieron con precisión los tres colores primarios de la síntesis aditiva del color, a partir de los cuales pueden crearse todos los demás.

En este modelo Y significa luminosidad, Z es aproximadamente igual al estímulo de azul y X es una mezcla tendiente a la curva de sensibilidad del rojo al verde. El diagrama de cromaticidad del espacio de color CIE 1931 es el siguiente:

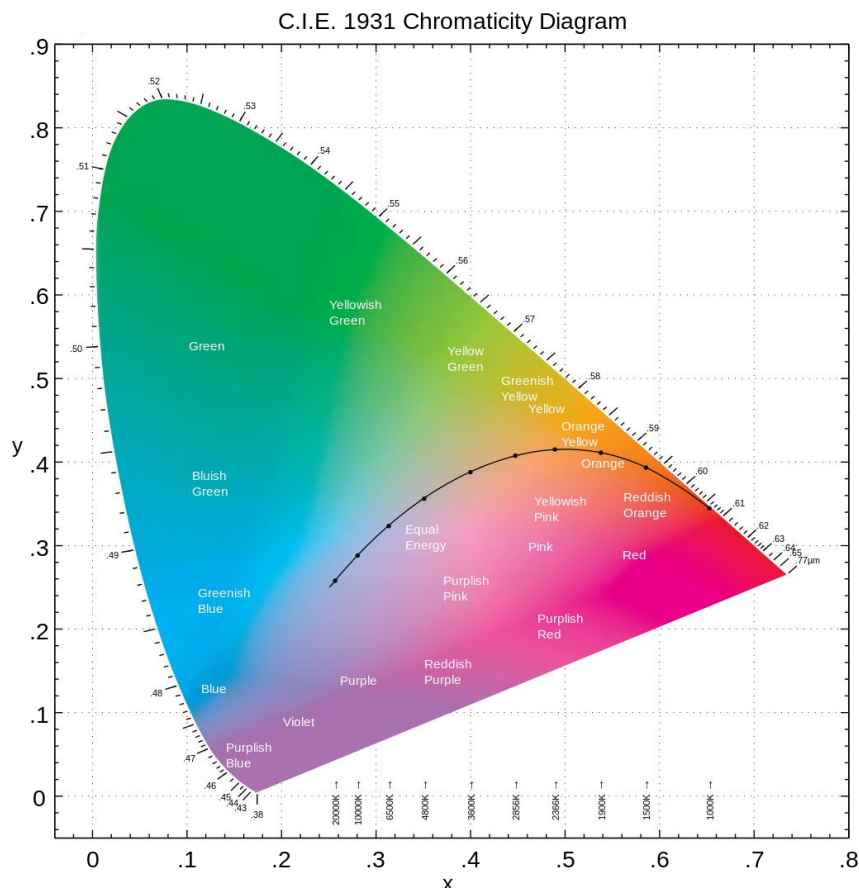


Figura 2.23 Diagrama de cromaticidad XYZ. Fuente: CIE

La frontera externa es el nicho espectral cuyas longitudes de onda se muestran en nanómetros. El diagrama de cromaticidad es una herramienta para especificar como el ojo humano experimentará la luz recibida de un determinado espectro.

El espectrorradiómetro utilizado en el presente trabajo es el modelo CS-1000A de la marca Konica Minolta.



Figura 2.24 Espectrorradiómetro CS-1000A. Fuente: Konica Minolta

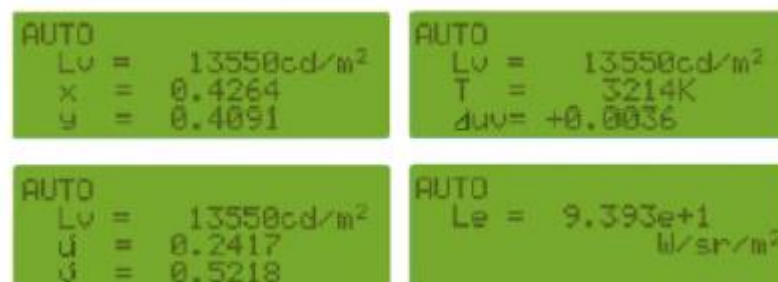


Figura 2.25 Ejemplos de display del espectrorradiómetro. Fuente: Konica Minolta

El software de gestión de datos CS-S1w que viene incorporado como accesorio controla al espectrorradiómetro CS-1000A a través de PC y muestra los datos medidos en forma numérica y gráfica.

Las características y los parámetros de medición del espectrorradiómetro, se pueden observar en la siguiente tabla resumen, obtenida del catálogo de información:

Especificaciones y características
Repetitividad para luminancia: 0,1% + 1 dígito; capacidad de medición de cromaticidad con una precisión de 0,0002
El uso del policromador asegura velocidades de medición cercanas al tiempo real
Mediciones de alta velocidad en tiempos breves como 39 segundos para condiciones de baja luminancia
La reducción de las diferencias de polarización asegura una excelente exactitud para medición de pantallas LCD
La medición puede realizarse en sincronía con los dispositivos de visualización
Precisión garantizada desde bajos valores como 1cd/m ²
El enfriamiento del sensor mejora la relación señal/ruido, lo que permite realizar mediciones de baja luminancia
Se utilizan espejos de apertura para eliminar toda la posible desalineación entre la indicación del visor y el punto de medición real

Tabla 2.22 Especificaciones y características Espectro CS-1000A. Fuente: Konica Minolta

Mediante el software mencionado anteriormente, se puede representar información general, gráfica espectral, datos de espectro y diagrama de cromaticidad XYZ.

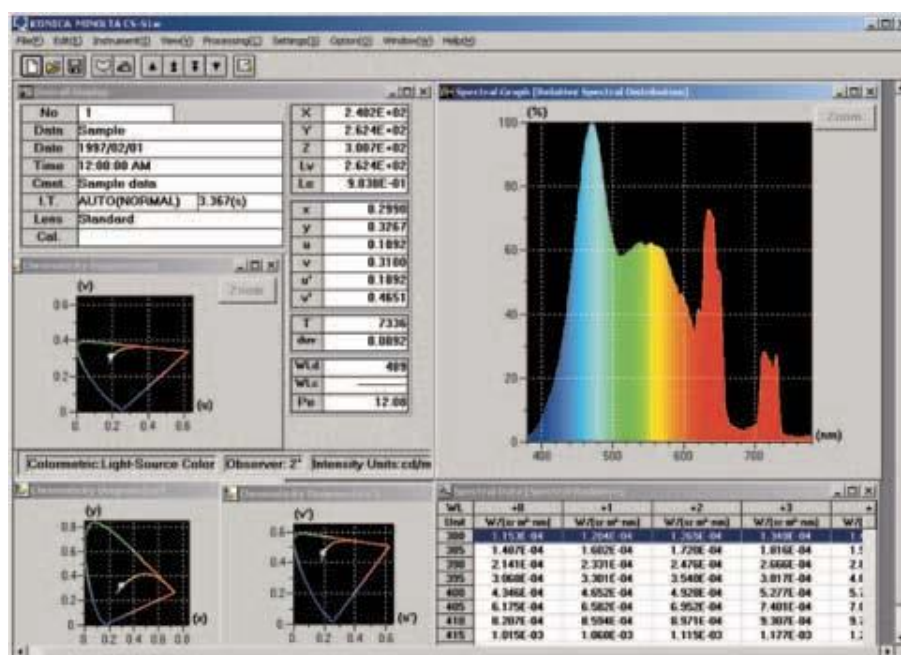


Figura 2.26 Opciones de representación software CS1W. Fuente: Konica Minolta

2.3.3 Cromatógrafo

Un medidor de cromaticidad es un aparato que mide la iluminancia, temperatura de color, cromaticidad, longitud de onda dominante y pureza de excitación de diversas fuentes de iluminación, específicamente de LED, LED orgánicos (OLED) y otras formas de electroluminiscencia orgánica (EL).

Las mediciones de temperatura de color son importantes al determinar la exactitud de una iluminación de LED. El modelo utilizado en el presente trabajo es el CL-200A de la marca Konica Minolta y cuenta con sensores que coinciden de forma precisa con las funciones de igualación de color definidas por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), y los resultados pueden visualizarse en diversas notaciones de color de acuerdo con la aplicación específica.

El CL-200A está diseñado para medición de la temperatura de color de LED blanco ya que tiene la capacidad de medir la cromaticidad desde el fósforo y además inspeccionar la calidad de la luz emitida del LED blanco en su montaje final.



Figura 2.27 Cromatógrafo CL-200A. Fuente: Konica Minolta

La tabla de especificaciones técnicas del medidor de cromatografía se pueden observar en la siguiente tabla obtenida del catálogo de información:

Especificaciones técnicas	
Modelo	CL-200A
Funciones de medida	Valores triestímulo XYZ
	Cromaticidad E_{vxy} ; $E_v u'v'$; E_v ; Forma de onda dominante
	Temperatura de color correlada E_v , T_{cp} , $\Delta u v$
	Diferencia de color $\Delta(XYZ)$, $\Delta(E_v xy)$, $\Delta(E_v u'v')$, $\Delta E_v \Delta u'v'$
Rango de medida	0,1 a 99,990lx, 0,01 a 9,999fcd
Exactitud	E_v : $\pm 2\%$, xy : $\pm 0,002$
Repetitividad	E_v : $\pm 3\%$, xy : $\pm 0,003$
Deriva de humedad	E_v : $\pm 3\%$, xy : $\pm 0,003$
Tiempo de respuesta	0,5s
Temperatura operación	(-)10°C a 40°C

Tabla 2.23 Especificaciones técnicas cromatógrafo CL-200A. Fuente: Konica Minolta

2.3.4 Cámara termográfica

Una cámara térmica es un dispositivo que, a partir de las emisiones de infrarrojos medios del espectro electromagnético de los cuerpos detectados, forma imágenes luminosas visibles por el ojo humano.

Todos los cuerpos por encima del cero absoluto (-273°C) emiten radiación infrarroja, que se traduce en forma de calor. En general, cuanto mayor es la radiación emitida, mayor es la temperatura del cuerpo. Esta radiación es invisible al ojo humano y su rango en el espectro electromagnético se sitúa entre la luz visible y la radiación de microondas. En concreto, la longitud de onda de los infrarrojos se sitúa entre las 0,7 y las 1000 micras. Dentro de este amplio margen, las cámaras térmicas trabajan en un rango conocido como infrarrojo térmico, que es donde se encuentran las temperaturas más habituales en la superficie terrestre, entre las 8 y las 14 micras, que equivale aproximadamente entre los -20 y 350 °C.

La cámara térmica dispone de un sensor térmico llamado microbolómetro que al recibir la radiación infrarroja se calienta y cambia su resistencia eléctrica. Este cambio de resistencia se mide y se equipara a una determinada temperatura, siendo asignado un color para cada temperatura y formando una imagen coloreada que será la que veamos en pantalla.

El modelo de cámara térmica utilizado, para analizar el comportamiento térmico de las luminarias, en el presente trabajo, es el Ti25 de la marca Fluke.



Figura 2.28 Cámara termográfica Ti25. Fuente: Catálogo Fluke

Esta cámara totalmente radiométrica está fabricada para su uso en entornos de trabajo adversos, siendo ideales para la resolución de problemas en sistemas eléctricos y lumínicos, equipos electromecánicos, equipos de procesos, entre otros.

Proporciona una imagen nítida necesaria para detectar problemas con rapidez y gracias a su sensibilidad térmica (NETD), detectan incluso leves diferencias de temperatura que podrían indicar la existencia de un problema.

Las especificaciones generales de la cámara térmica, se pueden observar en la siguiente tabla resumen:

Especificaciones generales	
Temperatura de operación	(-)10°C a 50°C
Temperatura de almacenamiento	(-)20°C a 50°C sin baterías
Temperatura de carga	0°C a 40°C
Humedad relativa	10 al 90% sin condensación
Pantalla	LCD de 640x480 a color, aprox de 2"x3"
Vida útil de la batería	3 a 4 horas de uso continuo

Tabla 2.24 Especificaciones generales cámara térmica Ti25. Fuente: Catálogo Fluke

Las especificaciones detalladas de la cámara termográfica, se pueden observar en la siguiente tabla resumen obtenida como del manual de información:

Especificaciones detalladas	
Rango de temperatura	(-)20°C a 50°C
Precisión	±2°C o 2%
Modos de medición	Smooth Auto-Scaling y Manual Scaling
Campo de visión	23°x17°
Resolución espacial (IFOV)	2,5 mRad
Distancia mínima de enfoque	15 cm
Frecuencia de la imagen	9 Hz de velocidad de actualización
Tipo de detector	Microbolómetro 160x120 sin enfriamiento
Tipo de lente infrarrojo	20 mm EFL, lente F/0,8
Sensibilidad térmica (DTER)	< 0,1 °C a 30°C (100mK)
Banda espectral infrarroja	7,5 µm a 14 µm
Cámara visual	640 x 480 de resolución
Span mínimo (modo manual)	2,5°C
Intervalo mínimo (modo automático)	5°C
Imagen dentro de otra imagen (PIP)	3 niveles de mezcla IR, en la pantalla mostrados en el centro 320 x 240 píxeles
Pantalla completa (PIP desactivado)	3 niveles de mezcla IR, en la pantalla mostrados en el centro 640 x 480 píxeles

Tabla 2.25 Especificaciones detalladas cámara Ti25. Fuente: Catálogo Fluke

2.4 Descripción detallada del método de medición utilizado

En el presente apartado se explicará detalladamente el procedimiento de medición de cada uno de los parámetros de las tres áreas explicadas y en las que se divide el presente trabajo. Todas las mediciones fueron realizadas en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Jaén (EPSJ), en el laboratorio de Iluminación y Domótica, edificio A3, dependencias 269 y 270.

2.4.1 Estudio eléctrico

Para la parte eléctrica, se analizaron las 7 luminarias descritas, durante 4 días consecutivos, con el fin de observar la repetitividad en las mediciones de cada uno de los parámetros. A su vez un día completo de medición se subdividía en intervalos de tiempo, con el fin de observar como afectaba el arranque en frío y en caliente a cada una de las características a estudiar, así de esta manera, los intervalos de medición en un día completo era a los 5 min, a los 10 min, a los 15 min, a los 30 min, a los 45 min y a los 60 min de funcionamiento.

La plantilla de recogida de datos para cada uno de los intervalos de tiempo descritos anteriormente, es la siguiente:

Tecnología	Corriente arranque	Vrms nominal	Arms	Hz	THD Armónicos tensión	THD Armónicos corriente	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén										
Luminaria LED 80W Jaén										
Luminaria LED Philips										
Luminaria LED NaviaP										
Luminaria LED ATP										
Luminaria descarga VSAP										
Luminaria descarga HM										

Tabla 2.26 Plantilla de recogida de datos estudio eléctrico. Fuente: Elaboración propia

Con lo cual, se deduce que en un día completo de medición eléctrica, habrá 6 tablas de datos como la anterior, una por cada intervalo de tiempo estudiado.

Una imagen de un set-up característico de medición eléctrica de una de las luminarias analizadas en las instalaciones de la Escuela Politécnica Superior de Jaén, en el laboratorio de iluminación y domótica, se muestra a continuación:



Figura 2.29 Ejemplo de set-up característico de medición parámetros eléctricos.

La conexión de las sondas de corriente y tensión para medir los parámetros de la red y el consumo de la luminaria, se puede observar en la siguiente imagen. Las sondas de tensión se conectarán directamente a la red para observar las fluctuaciones de la alimentación y la pinza amperimétrica estará conectada a la fase de la luminaria para analizar, que ocurre durante su funcionamiento.

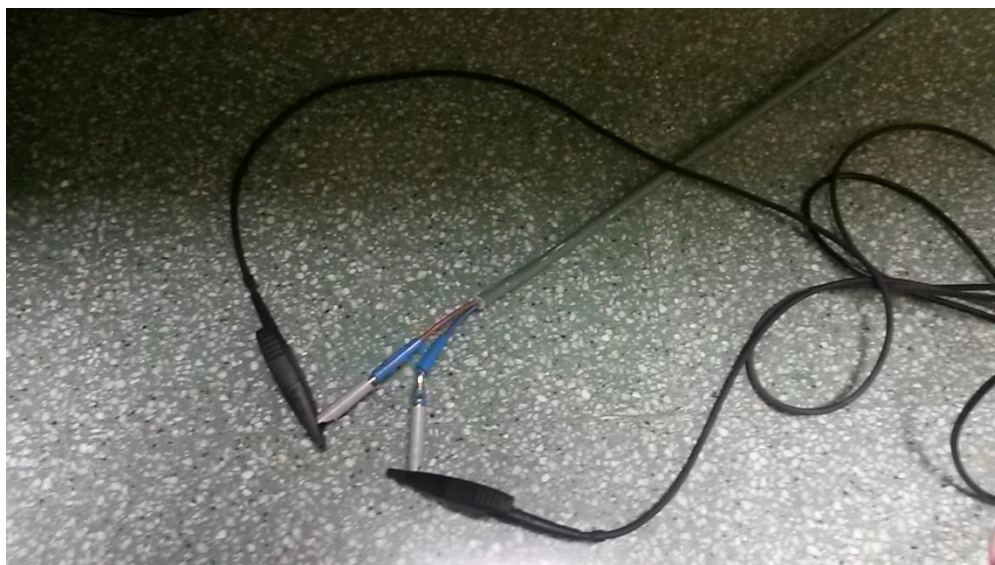


Figura 2.30 Conexión de la sonda de tensión en el set-up eléctrico



Figura 2.31 Conexión pinzas amperimétricas en fase y neutro de la luminaria bajo ensayo

2.4.2 Estudio lumínico

Al igual que ocurrió en el estudio eléctrico, para la parte lumínica se analizaron las luminarias durante 3 días consecutivos, en vez de 4 como ocurría en el caso anterior, con el fin de observar y conseguir una estabilidad en las mediciones y conseguir una situación más realista. En este estudio no hubo intervalos de medida, sino que se realizó una medida lumínica por día que se ensayó a cada una de las luminarias.

La plantilla de recogida de datos, para cada día de medición, es la siguiente:

Luminaria bajo ensayo			
x		v'	
y		Lv	
u		Le	
v		Te	
u'		duv	

Tabla 2.27 Plantilla de recogida de datos estudio lumínico. Fuente: Elaboración propia

Una vez recogidos los datos igual que en la tabla, éstos servirán al espectrorradiómetro para poder representar diversas curvas como pueden ser por ejemplo los diagrama de cromaticidad xy y uv, o la distribución relativa espectral.

Una imagen de un set-up característico de medición lumínica de una de las luminarias estudiadas, en el laboratorio de iluminación y domótica, se muestra a continuación:



Figura 2.32 Ejemplo de set-up característico de medición parámetros lumínicos. Sin luz ambiente



Figura 2.33 Ejemplo de set-up característico de medición parámetros lumínicos. Con luz ambiente

2.4.3 Estudio térmico

Para realizar el estudio térmico, se simulaban condiciones de funcionamiento reales de las luminarias, es decir, se pusieron a funcionar de manera ininterrumpida durante 8 horas seguidas, al igual que le ocurre a una luminaria durante la noche. A diferencia de los dos apartados anteriores, este estudio sólo se llevó a cabo durante un día, es decir, se estudió la disipación de calor durante 8 horas en un día, debido a que había varias luminarias para ensayar y la duración del ensayo, era el más largo de todos los realizados. Por este motivo se decidió realizar el ensayo durante un solo día a cada una de las luminarias.

La plantilla de recogida de datos para cada día de ensayo térmico, es la siguiente:

Tiempo	Temperatura del punto más caliente (°C)	Temperatura del punto más frío (°C)
5min		
10min		
15min		
30min		
45min		
1h		
2h		
3h		
4h		
5h		
6h		
7h		
8h		

Tabla 2.28 Plantilla de recogida de datos estudio térmico. Fuente: Elaboración propia

Una imagen de un set-up característico de medición de la disipación térmica en las luminarias estudiadas, en el laboratorio de iluminación y domótica, se muestra a continuación:



Figura 2.34 Ejemplo de set-up característico para la medición de la disipación térmica

3. RESULTADOS

En este apartado, se reflejarán todos los resultados obtenidos del análisis experimental en los laboratorios de la EPSJ, mediante las plantillas y las tablas de recogida de datos, explicadas anteriormente.

3.1 Resultados eléctricos

El estudio de fenómenos eléctricos de las lámparas viales constó de 4 días de análisis de cada una de las siete luminarias, y debido a su larga extensión fue el primer estudio realizado a lo largo del presente trabajo. Cada día de análisis se estructuraba en seis intervalos de medida para cada lámpara, dichos intervalos de medida son los siguientes: 0-5 min, 5-10 min, 10-15min, 15-30min, 30-45min y 45-60min.

La razón por la cual el día de medición completo se dividió en seis intervalos fue con el objetivo de obtener un muestreo que fuese más representativo de la población de luminarias a analizar.

Dentro de cada intervalo de medida, distinguimos dos tipos de arranques que pueden existir en una luminaria:

- Arranque en frío: Se denomina al tipo de arranque que tiene lugar en las luminarias, después de permanecer un largo período de tiempo sin funcionar, normalmente este período de tiempo de no funcionamiento suele ser de varias horas. Se considera que el arranque en frío de una luminaria dura hasta que alcanza su régimen permanente, con respecto a lo que a fenómenos eléctricos se refiere y el tiempo de funcionamiento de ella es de aproximadamente 5 minutos, luego en el presente trabajo todas las medidas que tuvieron lugar en el intervalo de 0-5min de cada día, las clasificaremos como medidas de arranque en frío.
- Arranque en caliente: Se denomina al tipo de arranque que tiene lugar en las luminarias, después de permanecer un corto período de tiempo sin funcionar, normalmente este período de tiempo de no funcionamiento suele ser de minutos. Se considera como arranque en caliente de la luminaria, a la puesta en funcionamiento de la misma cuando ha pasado un corto período de tiempo (de unos minutos aproximadamente), desde el arranque anterior. Como se

puede deducir entonces, todas las medidas realizadas en los intervalos que van desde 5-10min, 10-15min, 15-30min, 30-45min y 45-60 min, las consideraremos como medidas de arranque en caliente.

Una vez decidido que medidas serán de arranque en frío y cuáles de arranque en caliente, el siguiente paso será la recogida de datos utilizando las plantillas expuestas en el apartado anterior, así de esta manera tendremos 6 intervalos de medida por día y a su vez a las 7 luminarias analizadas. Como se puede observar, el estudio es largo debido a que habrá 6 tablas de datos por día y por 4 días de análisis, lo que hacen un total de 24 tablas de datos. Con el fin de no sobrecargar el presente apartado con muchos datos, expondremos una tabla tipo de recogida de datos, en un día de análisis y en un intervalo determinado. Para observar los datos e intervalos con más detenimiento, se adjuntará un anexo de datos.

Arranque en frío Intervalo 0-5 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	3,7	236,3	0,1	50	2,2	10,8	0,05	0,02	0,05	0,94
Luminaria LED 80W Jaén	4,2	236,8	0,3	49,97	2,3	7,8	0,07	0,02	0,07	0,95
Luminaria LED Philips	0,3	236,2	0,1	49,98	2,6	16,9	0,02	0,01	0,02	0,82
Luminaria LED NaviaP	2,4	233,9	0,2	49,98	2	12,9	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	5,9	237	0,8	50	2,2	6,3	0,19	0,05	0,2	0,97
Luminaria descarga VSAP	6,5	235,1	1,4	49,99	2,1	33,3	0,3	0,02	0,3	1
Luminaria descarga HM	5,8	236,5	0,5	49,98	2,1	10,2	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla 3.1 Tabla de recogida de datos día 1 de medición, intervalo 0-5 min. Fuente: Elaboración propia

A modo de ejemplo también se expondrá las capturas del analizador de red, con la ayuda de su software, para observar los datos recogidos para una luminaria, en este caso la luminaria GL1A 60W Jaén, en este intervalo de media de 0-5 minutos.

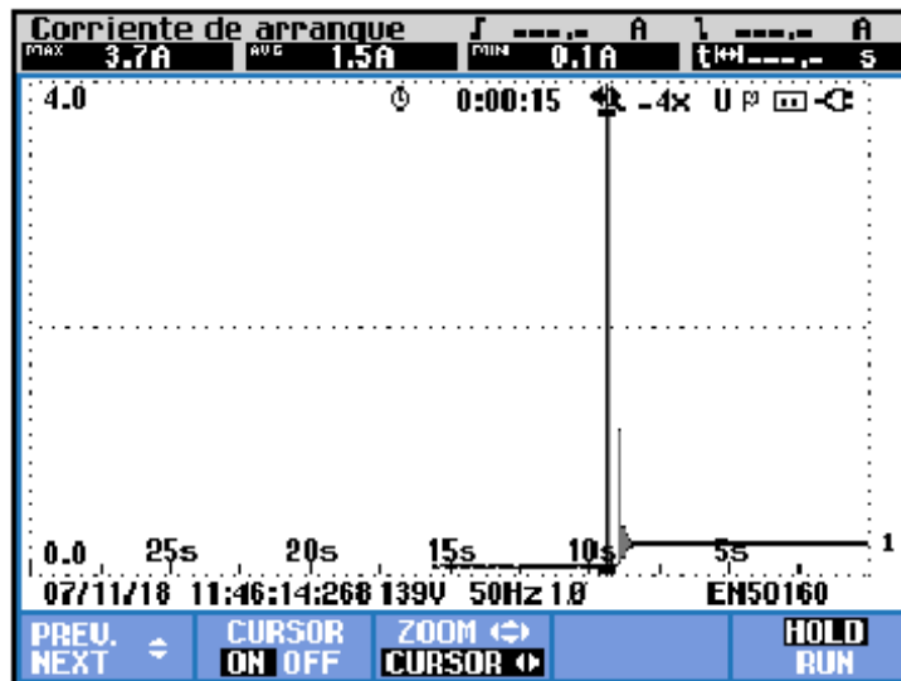


Figura 3.1 Corriente de arranque luminaria GL1A día 1, intervalo 0-5 min. Fuente: Software FlukeView

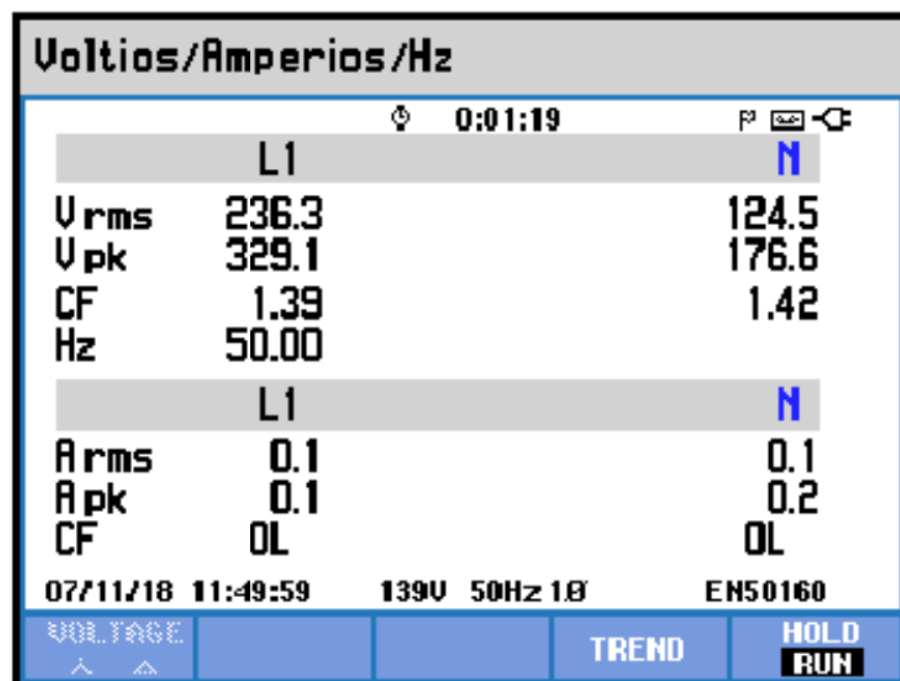


Figura 3.2 Tensión, corriente y frecuencias nominales luminaria GL1A, día 1 intervalo de medida 0-5 min. Fuente: Software FlukeView

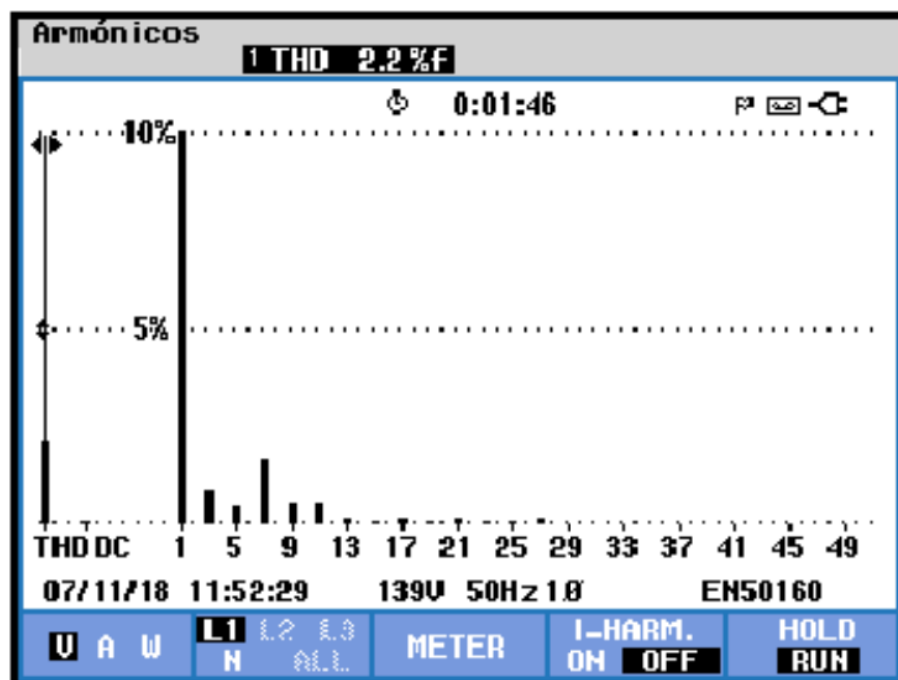


Figura 3.3 THD Armónicos de tensión, luminaria GL1A, día 1 intervalo de media 0-5 min. Fuente: Software FlukeView

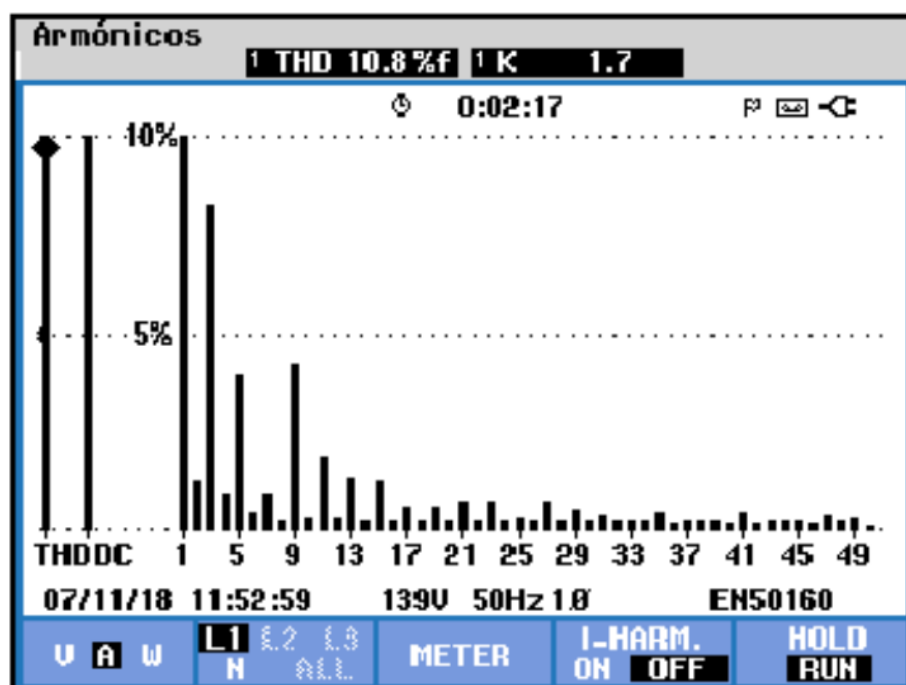


Figura 3.4 THD Armónicos de corriente, luminaria GL1A, día 1 intervalo de medida 0-5 min. Fuente: Software FlukeView

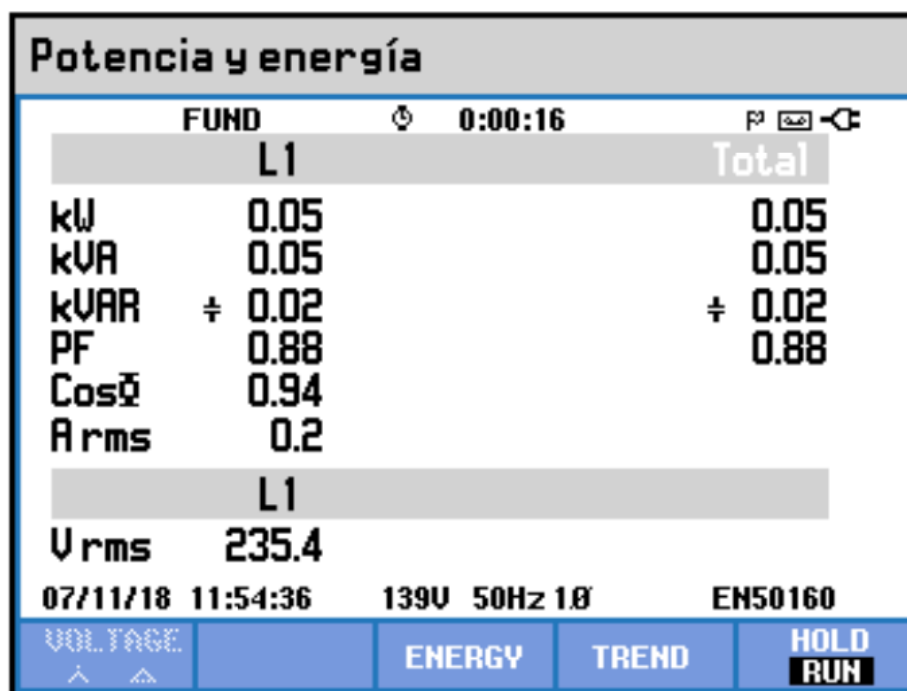


Figura 3.5 Datos de potencia y energía, luminaria GL1A, día 1 intervalo de medida 0-5 min. Fuente: Software FlukeView

Una vez recogidos los datos en las 24 tablas, para los 4 días de medición y por cada luminaria, se realizará un estudio estadístico de cada una de las variables medidas en cada lámpara, con el fin de realizar una discusión y una valoración comparativa de los resultados y de comportamiento, tanto de arranque en frío como de arranque en caliente de cada una de ellas.

Los parámetros que calcularemos para realizar es estudio serán: la media aritmética, la varianza y la desviación típica de cada una de las variables medidas.

Se define la **media aritmética** como un parámetro estadístico que consiste en calcular la suma de todos los datos de una población, dividido por el número de datos que componen dicha población, y se expresa de la siguiente forma:

$$x_{media} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Donde:

x= valor de cada muestra

n= número de elementos de la población

La **varianza** es una medida de dispersión que representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media aritmética. Dicha medida es una variable aleatoria y por lo tanto consiste en una medida vinculada a su dispersión. Se trata de la esperanza del cuadrado de la desviación de esa variable considerada frente su media y se mide en una unidad diferente. Se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{media})^2$$

Donde:

x= valor de cada muestra

x_{media}= valor de la media aritmética de la población

n= número de elementos de la población

Por último, definiremos la **desviación típica o desviación estándar** como una medida que se usa para cuantificar la variación o dispersión de un conjunto de datos numérico.

Una desviación estándar baja indica que la mayor parte de los datos de una población tienden a estar agrupados cerca de su media aritmética, también denominada el valor esperado, mientras que una desviación estándar alta indica que los datos se extienden sobre un rango de valores más amplio. Matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{media})^2} = \sqrt{\sigma^2}$$

Como se puede observar en la fórmula, el valor corresponde a la raíz cuadrada de la varianza.

3.1.1 Arranque en frío

En el estudio del arranque en frío de las luminarias reflejaremos los resultados estadísticos en tablas de media aritmética, varianza y desviación típica de los datos de los intervalos en dicha forma de arranque.

Para calcular dichos parámetros estadísticos utilizaremos todas las tablas de los intervalos que van de 0-5 min en cada uno de los 4 días de medición. De esta manera se utilizaron 4 tablas de datos en los cálculos (Una tabla de arranque en frío, durante 4 días de medición). Se procedió de esta manera para poder diferenciar claramente entre arranque en frío y en caliente y como afecta dichas formas de arranque en las variables eléctricas de cada una de las luminarias.

Los resultados estadísticos del arranque en frío son los siguientes:

Media	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,73	235,00	0,23	50,00	2,10	11,13	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	3,55	235,63	0,30	50,00	2,17	8,08	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,30	235,87	0,10	50,00	2,17	13,90	0,02	0,01	0,02	0,78
Luminaria LED NaviaP	4,30	235,95	0,20	49,99	2,03	13,50	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	5,40	236,10	0,80	49,97	2,03	6,10	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	6,65	235,27	1,43	50,00	2,08	33,00	0,30	0,01	0,30	1,00
Luminaria descarga HM	4,27	235,55	0,50	49,99	2,10	10,23	0,10	0,03	0,11	0,97

Tabla 3.2 Media aritmética de arranque en frío. Fuente: Elaboración propia

Varianza	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	1,02	1,06	0,01	0,00	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED 80W Jaén	0,59	1,01	0,00	0,00	0,02	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED Philips	0,00	0,08	0,00	0,00	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED NaviaP	0,19	2,04	0,00	0,00	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED ATP	4,87	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria descarga VSAP	0,20	2,50	0,00	0,00	0,03	7,75	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria descarga HM	0,04	2,38	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 3.3 Varianza en arranque en frío. Fuente: Elaboración propia

Desviación típica	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	1,01	1,03	0,10	0,02	0,14	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED 80W Jaén	0,77	1,01	0,00	0,02	0,15	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED Philips	0,00	0,29	0,00	0,03	0,15	0,20	0,01	0,00	0,00	0,01
Luminaria LED NaviaP	0,44	1,43	0,00	0,01	0,13	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED ATP	2,21	0,62	0,00	0,03	0,06	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Luminaria descarga VSAP	0,44	1,58	0,06	0,01	0,17	2,78	0,01	0,01	0,01	0,00
Luminaria descarga HM	0,21	1,54	0,00	0,02	0,10	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 3.4 Desviación típica en arranque en frío. Fuente: Elaboración propia

Valores máximos en frío	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	3,90	236,30	0,30	50,02	2,20	11,40	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	4,20	236,70	0,30	50,02	2,30	8,40	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,30	236,20	0,10	50,02	2,30	14,10	0,02	0,01	0,02	0,79
Luminaria LED NaviaP	4,60	237,20	0,20	50,00	2,20	13,70	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	7,70	237,00	0,80	50,01	2,10	6,10	0,19	0,05	0,20	0,97
Luminaria descarga VSAP	7,30	237,00	1,50	50,01	2,30	35,50	0,30	0,02	0,30	1,00
Luminaria descarga HM	4,50	237,20	0,50	50,01	2,20	10,30	0,10	0,03	0,11	0,97

Tabla 3.5 Valores máximos de arranque en frío. Fuente: Elaboración propia

Valores mínimos en frío	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,10	233,80	0,10	49,99	1,90	11,00	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	2,70	234,70	0,30	49,98	2,00	7,80	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,30	235,70	0,10	49,97	2,00	13,70	0,01	0,01	0,02	0,77
Luminaria LED NaviaP	3,80	233,90	0,20	49,98	1,90	13,30	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	3,30	235,60	0,80	49,95	2,00	6,10	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	6,30	233,90	1,40	49,99	1,90	30,00	0,29	0,00	0,29	1,00
Luminaria descarga HM	4,10	234,00	0,50	49,97	2,00	10,20	0,10	0,03	0,11	0,97

Tabla 3.6 Valores mínimos de arranque en frío. Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Arranque en caliente

En el estudio del arranque en caliente de las luminarias reflejaremos, al igual que en el apartado anterior, los resultados estadísticos en tablas de media aritmética, varianza y desviación típica de los datos de los intervalos en dicha forma de arranque.

Para calcular dichos parámetros estadísticos utilizaremos todas las tablas de los intervalos que van de 5-10 min, 10-15 min, 15-30min, 30-45 min y 45-60min en cada uno de los 4 días de medición. De esta manera se utilizaron 20 tablas de datos en los cálculos (Cinco tablas de arranque en caliente, durante 4 días de medición). Se procedió de esta manera, al igual que en el apartado anterior, para poder diferenciar claramente entre arranque en frío y en caliente y como afecta dichas formas de arranque en las variables eléctricas de cada una de las luminarias.

Los resultados estadísticos del arranque en caliente se expondrán en esta tabla:

Media	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	3,12	235,48	0,27	49,99	2,16	11,21	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	3,07	236,29	0,30	49,99	2,22	8,17	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,30	235,91	0,10	49,99	2,13	14,52	0,02	0,01	0,02	0,80
Luminaria LED NaviaP	3,21	236,13	0,20	49,98	2,09	13,76	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	6,03	236,27	0,80	49,99	2,05	6,22	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	5,54	235,13	1,37	49,98	2,16	35,01	0,29	0,00	0,29	1,00
Luminaria descarga HM	5,54	235,80	0,50	49,99	2,00	10,19	0,10	0,03	0,11	0,97

Tabla 3.7 Media aritmética de arranque en caliente. Fuente: Elaboración propia

Varianza	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	0,85	0,85	0,00	0,00	0,02	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED 80W Jaén	1,00	0,98	0,00	0,00	0,03	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED Philips	0,00	0,73	0,00	0,00	0,03	1,35	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED NaviaP	0,78	1,44	0,00	0,00	0,01	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED ATP	3,49	0,35	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria descarga VSAP	2,24	2,19	0,00	0,00	0,09	9,41	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria descarga HM	0,28	1,07	0,00	0,00	0,04	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 3.8 Varianza en arranque en caliente. Fuente: Elaboración propia

Desviación típica	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	0,92	0,92	0,05	0,01	0,14	0,24	0,00	0,00	0,00	0,01
Luminaria LED 80W Jaén	1,00	0,99	0,00	0,01	0,17	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED Philips	0,02	0,85	0,00	0,02	0,18	1,16	0,00	0,00	0,00	0,02
Luminaria LED NaviaP	0,88	1,20	0,00	0,02	0,11	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00
Luminaria LED ATP	1,87	0,59	0,00	0,02	0,11	0,14	0,00	0,00	0,00	0,01
Luminaria descarga VSAP	1,50	1,48	0,05	0,02	0,31	3,07	0,01	0,01	0,01	0,00
Luminaria descarga HM	0,53	1,03	0,00	0,01	0,20	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 3.9 Desviación típica en arranque en caliente. Fuente: Elaboración propia

Valores máximos en caliente	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	4,40	237,10	0,30	50,01	2,40	11,70	0,05	0,02	0,06	0,94
Luminaria LED 80W Jaén	4,80	238,60	0,30	50,01	2,50	8,60	0,07	0,02	0,07	0,95
Luminaria LED Philips	0,30	236,90	0,10	50,01	2,50	17,40	0,02	0,01	0,02	0,84
Luminaria LED NaviaP	4,60	238,20	0,20	50,01	2,30	14,40	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	8,00	237,00	0,80	50,02	2,20	6,50	0,19	0,05	0,20	0,97
Luminaria descarga VSAP	7,70	238,20	1,40	50,01	2,60	39,00	0,30	0,02	0,30	1,00
Luminaria descarga HM	6,00	238,00	0,50	50,02	2,30	10,40	0,10	0,03	0,11	0,97

Tabla 3.10 Valores máximos de arranque en caliente. Fuente: Elaboración propia

Valores mínimos en caliente	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,10	234,30	0,20	49,97	1,90	11,00	0,05	0,02	0,05	0,92
Luminaria LED 80W Jaén	2,10	235,20	0,30	49,96	1,90	7,80	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,30	234,40	0,10	49,95	1,80	13,30	0,01	0,01	0,02	0,77
Luminaria LED NaviaP	1,70	233,70	0,20	49,95	1,90	13,50	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	3,10	235,10	0,80	49,93	1,80	6,00	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	2,90	232,80	1,30	49,93	1,70	30,00	0,29	0,00	0,29	1,00
Luminaria descarga HM	4,30	234,30	0,50	49,96	1,60	9,80	0,10	0,03	0,11	0,97

Tabla 3.11 Valores mínimos de arranque en caliente. Fuente: Elaboración propia

3.2 Resultados térmicos

El estudio de disipación térmica se realizó simulando unas “condiciones de funcionamiento reales” de las luminarias, es decir, se simuló un régimen de funcionamiento nocturno en una habitación totalmente a oscuras a una temperatura ambiente normal del 25°C y con un intervalo de 8h de trabajo continuas de las luminarias, que es normalmente el tiempo que permanecen encendidas durante la noche en un día normal de funcionamiento.

Dicho estudio se realizó en dos tandas, una primera tanda en la que se estudiaron las lámparas de descarga (HM y VSAP), y una segunda y última tanda en la que se estudiaron las 5 luminarias LED.

Para la adquisición de datos reales en dicho estudio se utilizó la cámara termográfica, detallada en anteriores epígrafes, en el laboratorio de iluminación y domótica de la Universidad de Jaén. Las cámaras termográficas son dispositivos que convierten la energía térmica en luz visible para analizar un objeto o escena en particular. La imagen producida se conoce como termograma y se analiza a través de un proceso llamado termografía. Estas imágenes se pueden usar para un diagnóstico inmediato o procesarse a través de un software especializado para una mayor evaluación, precisión y rendimiento del informe.

El diagrama de funcionamiento, de una cámara termográfica es el siguiente:

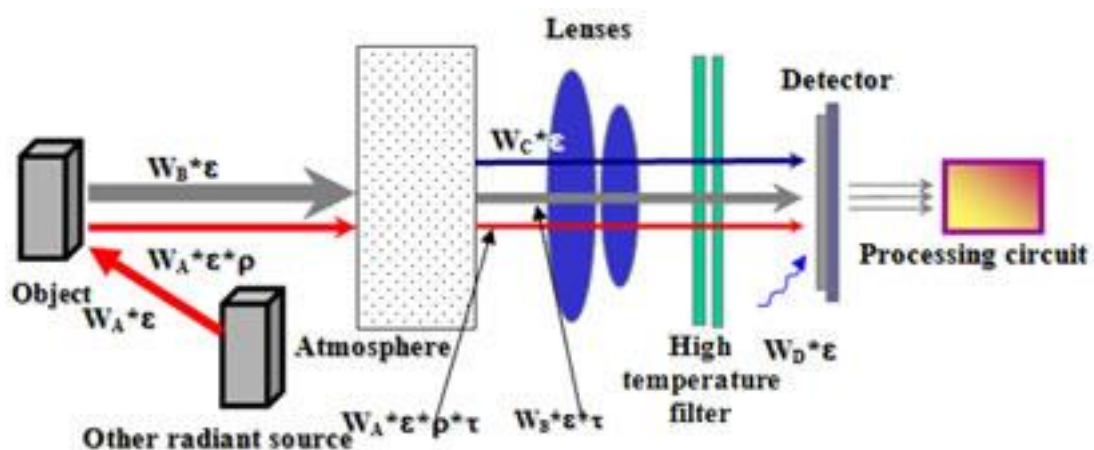


Figura 3.6 Diagrama de funcionamiento cámara termográfica. Fuente: Manual amperis

El parámetro más importante a tener en cuenta a la hora de realizar el estudio con la cámara termográfica y que hay que modificar en el software de análisis, es el valor de la emisividad del material bajo análisis.

Todos los objetos irradian energía infrarroja. La cantidad de energía irradiada se basa en dos factores principales: la temperatura de la superficie del objeto y la emisividad de dicha superficie [18] . La mayoría de los objetos medidos tales como metal pintado, madera, agua, piel y tela son muy eficientes para irradiar energía y es muy fácil obtener mediciones exactas. Para superficies que son eficientes para irradiar energía (alta emisividad), el factor de emisividad se estima en un 95% (o 0.95) [19] . La emisividad varía de 0 a 1, para un cuerpo negro que irradia la máxima energía infrarroja su valor es 1. Sin embargo, esta simplificación no funciona para superficies brillantes o metálicas sin pintar, es necesaria una corrección de la emisividad [20]

La emisividad es un tema muy importante para la medida de temperatura de superficies sin estar en contacto [19] . Dependiendo del material que se va a medir la superficie la emisividad variará [20] . La emisividad determinada para obtener las temperaturas de los materiales se ha obtenido mediante una tabla de emisividades [21] .

Surface Material	Emissivity Coefficient - ϵ -
Alloy 24ST Polished	0.09
Alumina, Flame sprayed	0.8
Aluminum Commercial sheet	0.09
Aluminum Foil	0.04
Aluminum Commercial Sheet	0.09
Aluminum Heavily Oxidized	0.2 - 0.31
Aluminum Highly Polished	0.039 - 0.057
Aluminum Anodized	0.77
Aluminum Rough	0.07
Aluminum paint	0.27 - 0.67
Antimony, polished	0.28 - 0.31
Asbestos board	0.96
Plastics	0.90 - 0.97
Polypropylene	0.97
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	0.92

Tabla 3.12 Coeficientes de emisividad de distintos materiales. Fuente: Referencia [23]

En el presente estudio, utilizaremos las emisividades del Aluminio Anodizado (0,77) y del plástico (se elige un valor típico de 0,92 dentro del intervalo), como se puede observar en la tabla.

3.2.1 Luminaria LED GL1A

La tabla de temperaturas máxima y mínima en la luminaria, son las siguientes:

Material: Aluminio Anodizado		
Tiempo	T _{máx} (°C)	T _{min} (°C)
5 min	26,4	20,7
10 min	29,3	21,4
15 min	30,5	30
30 min	34,6	34
45 min	37,1	36,6
60min	37,2	36,8
120 min	38,8	38,5
180 min	39,6	39,4
240 min	40,2	40
300 min	40,5	40,2
360 min	41,4	41,1
420 min	41,4	41,3
480 min	41,4	41,3
Emisividad 0,77		

Tabla 3.13 Datos de temperatura luminaria GL1A. Fuente: Elaboración propia

La curva de evolución de la temperatura máxima utilizando un código programado en Matlab para su representación es:

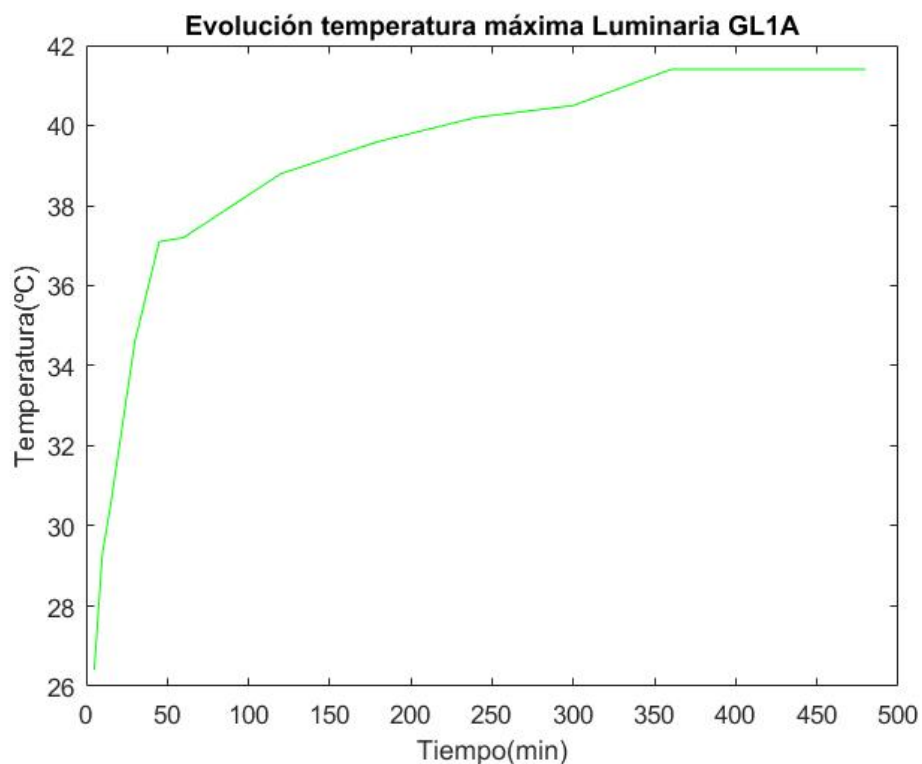


Figura 3.7 Curva evolución temperatura máxima luminaria GL1A. Fuente: Elaboración propia

Una imagen característica tomada de la cámara termográfica es la siguiente:

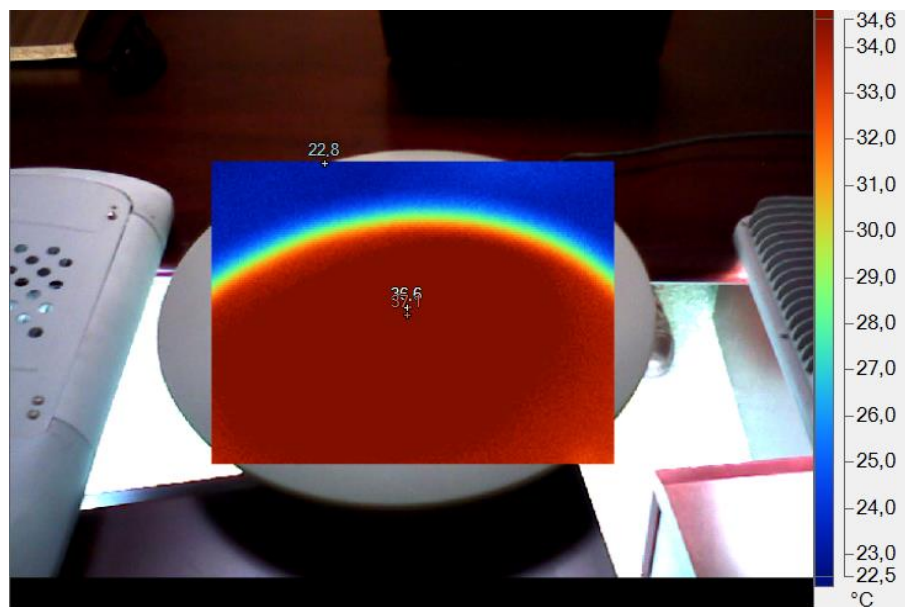


Figura 3.8 Imagen térmica característica luminaria GL1A. Fuente: Software SmartView

Para observar que la disipación de calor se produce de forma segura, representaremos la curva de evolución de la temperatura comparándola con la temperatura límite del material.

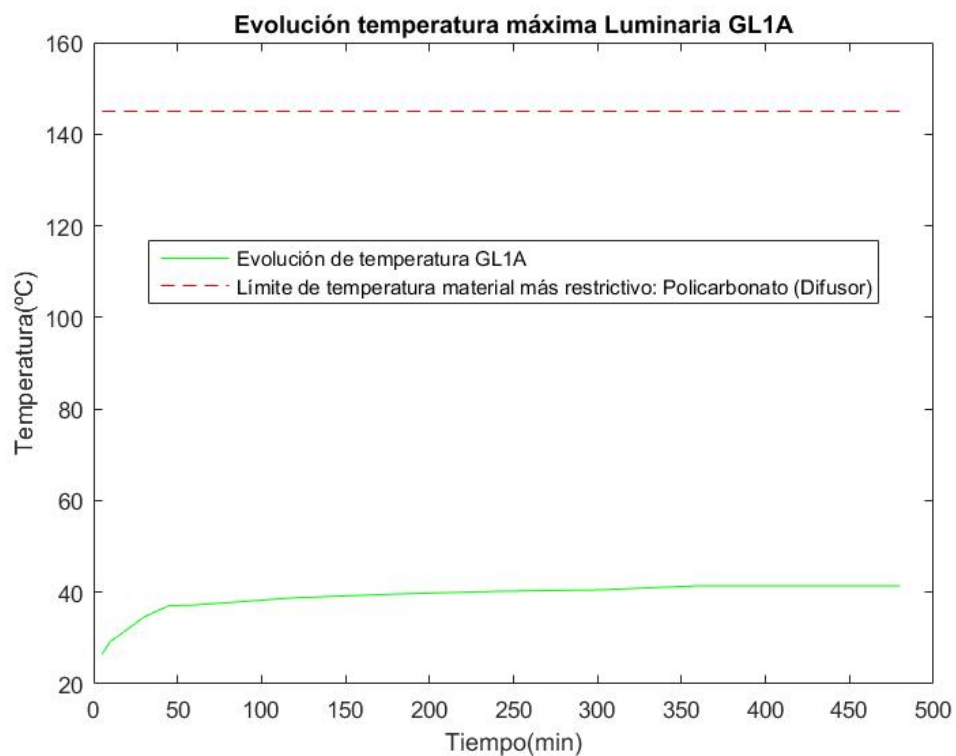


Figura 3.9 Límite de temperatura del material luminaria GL1A. Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Luminaria LED T1A

La tabla de temperaturas máxima y mínima en la luminaria, son las siguientes:

Material: Aluminio Anodizado		
Tiempo	T _{máx} (°C)	T _{min} (°C)
5 min	28,3	27,3
10 min	38,9	27,9
15 min	39,9	36,9
30 min	42,3	37,6
45 min	43,9	40
60min	53,1	40,6
120 min	53,3	45,4
180 min	55,6	50,2
240 min	56,2	53,4
300 min	56,3	55,4
360 min	57,5	57,2
420 min	58,1	57,5
480 min	58,1	57,5
Emisividad 0,77		

Tabla 3.14 Datos de temperatura luminaria T1A. Fuente: Elaboración propia

La curva de evolución de la temperatura máxima es:

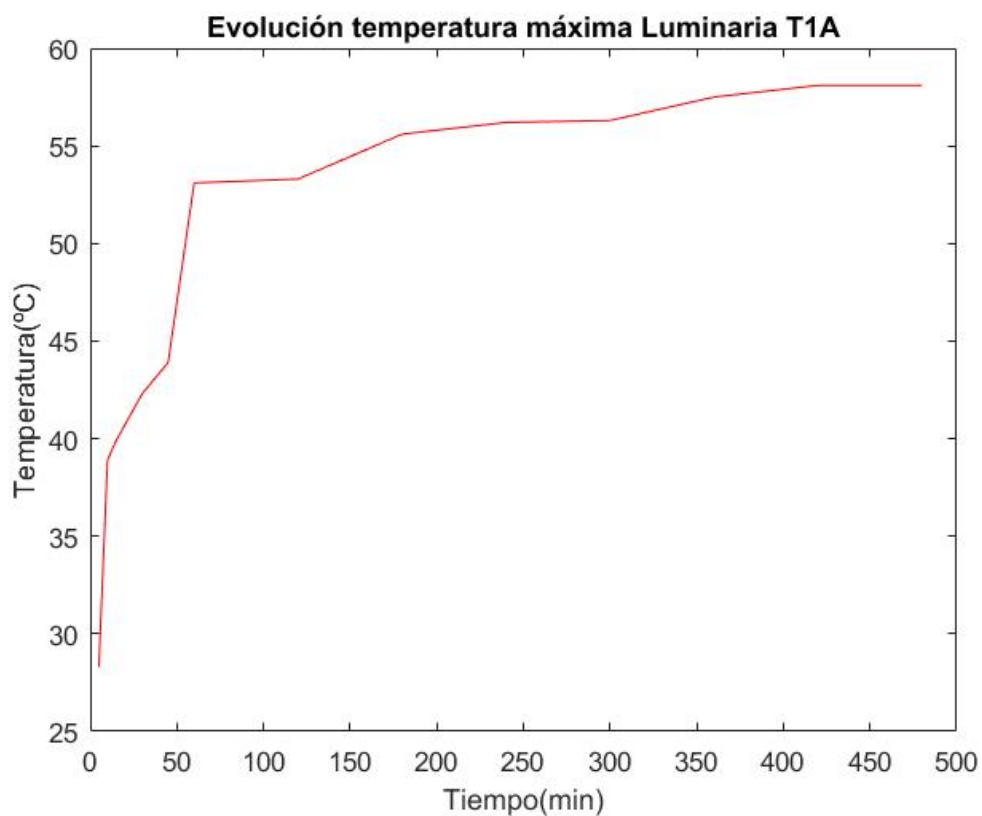


Figura 3.10 Curva evolución temperatura máxima luminaria T1A. Fuente: Elaboración propia

Una imagen tomada con la cámara termográfica en un instante determinado es:

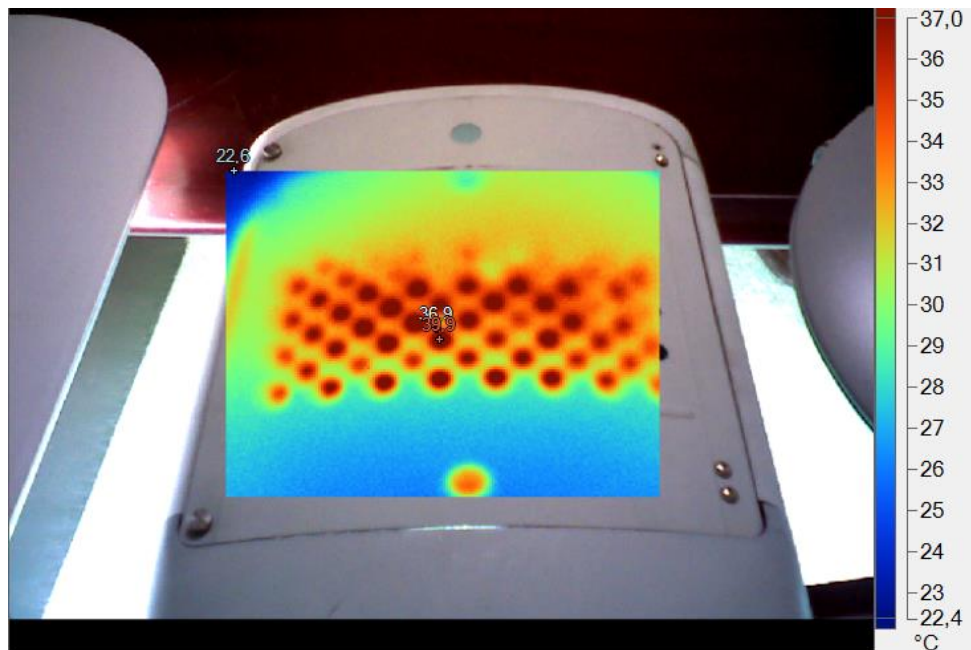


Figura 3.11 Imagen térmica característica luminaria T1A. Fuente: Software SmartView

La curva de evolución de la temperatura comparándola con la temperatura límite del material es la siguiente:

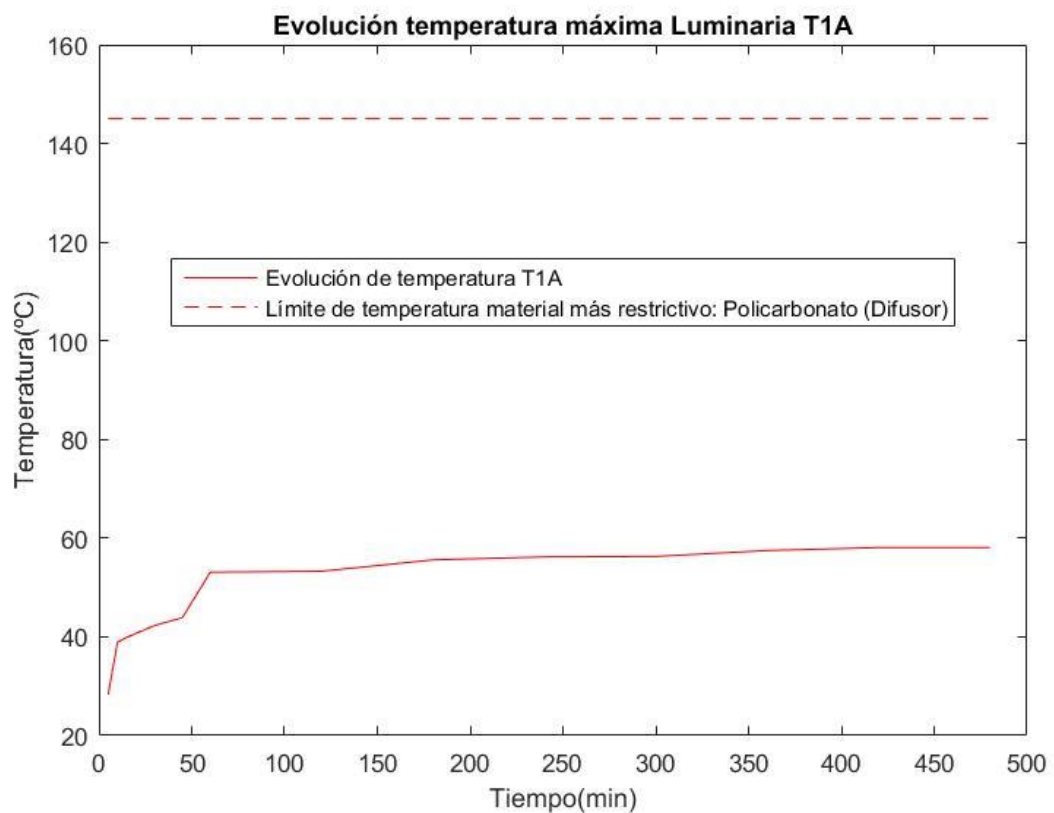


Figura 3.12 Límite de temperatura del material luminaria T1A. Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Luminaria LED Mini-Iridium

La tabla de temperaturas máxima y mínima en la luminaria, son las siguientes:

Material: Aluminio Anodizado		
Tiempo	T _{máx} (°C)	T _{min} (°C)
5 min	23,3	22,1
10 min	25,6	22,3
15 min	27,2	24,8
30 min	27,3	26,7
45 min	30,1	27
60min	31,2	27,6
120 min	33,5	29,6
180 min	34,4	30,3
240 min	34,6	30,7
300 min	35,4	31,8
360 min	36,3	32
420 min	36,3	32
480 min	36,3	32
Emisividad 0,77		

Tabla 3.15 Datos de temperatura luminaria Mini-Iridium. Fuente: Elaboración propia

La curva de evolución de la temperatura máxima es:

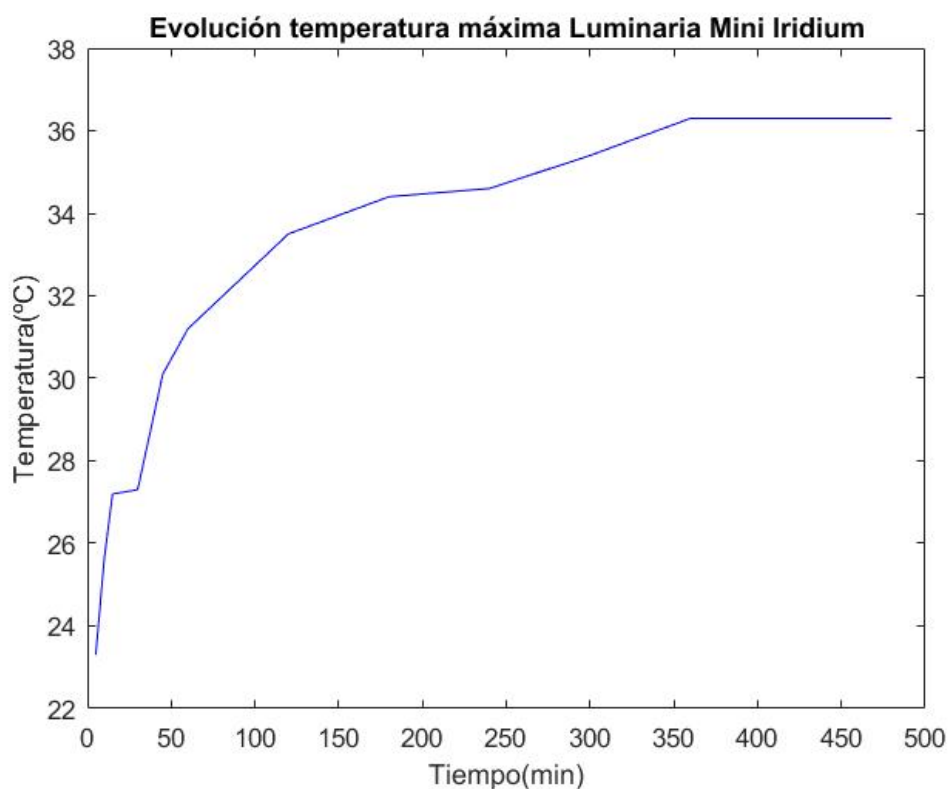


Figura 3.13 Curva evolución temperatura máxima luminaria Mini-Iridium. Fuente: Elaboración propia

Una imagen tomada con la cámara termográfica en un instante determinado es:

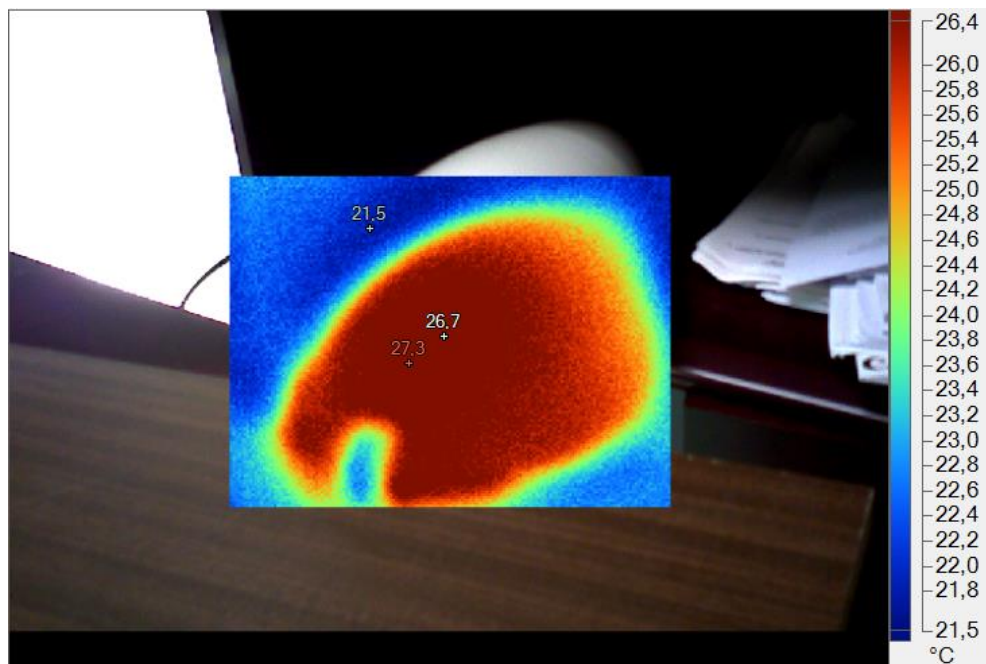


Figura 3.14 Imagen térmica característica luminaria Mini-Iridium. Fuente: Software SmartView

La curva de evolución de la temperatura comparándola con la temperatura límite del material es:

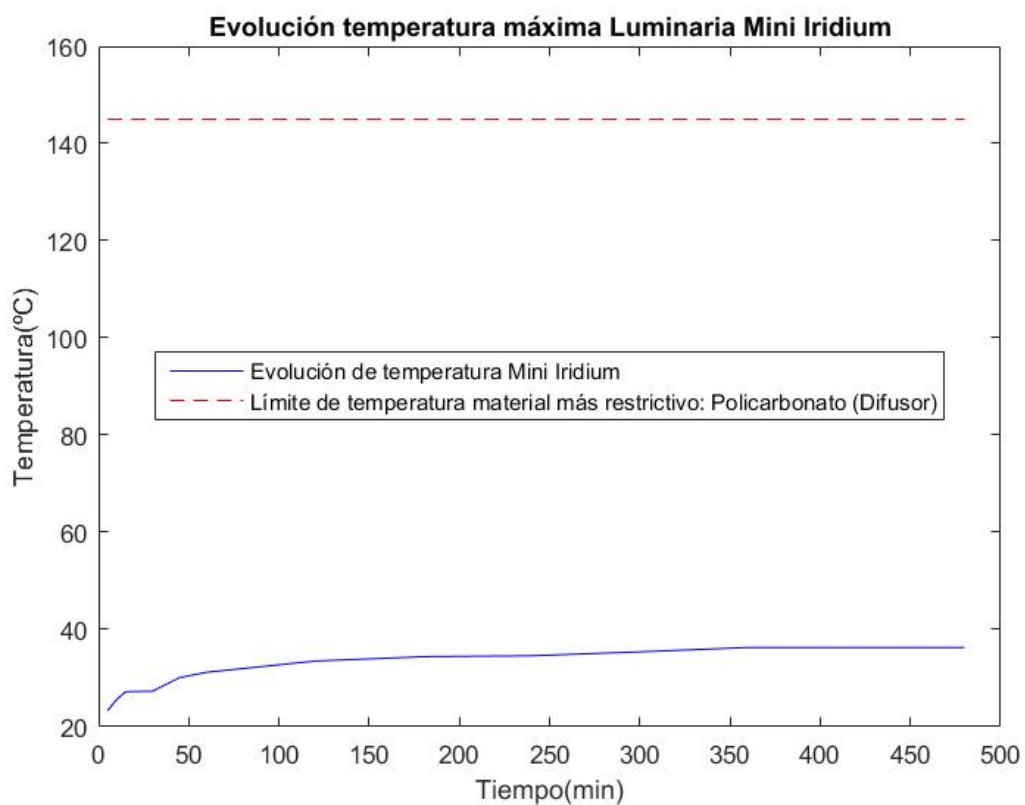


Figura 3.15 Límite de temperatura del material luminaria Mini-Iridium. Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Luminaria LED NaviaP

La tabla de temperaturas máxima y mínima en la luminaria, son las siguientes:

Material: Aluminio Anodizado		
Tiempo	T _{máx} (°C)	T _{min} (°C)
5 min	37,4	33,7
10 min	41,7	39,4
15 min	43,3	42,8
30 min	46,5	46,3
45 min	49,5	49,4
60min	52,1	51,9
120 min	54,4	53,8
180 min	55,5	55,1
240 min	56	55,8
300 min	56,9	56,4
360 min	57,3	56,8
420 min	57,3	56,9
480 min	57,3	57,1
Emisividad 0,77		

Tabla 3.16 Datos de temperatura luminaria NaviaP. Fuente: Elaboración propia

La curva de evolución de la temperatura máxima es:

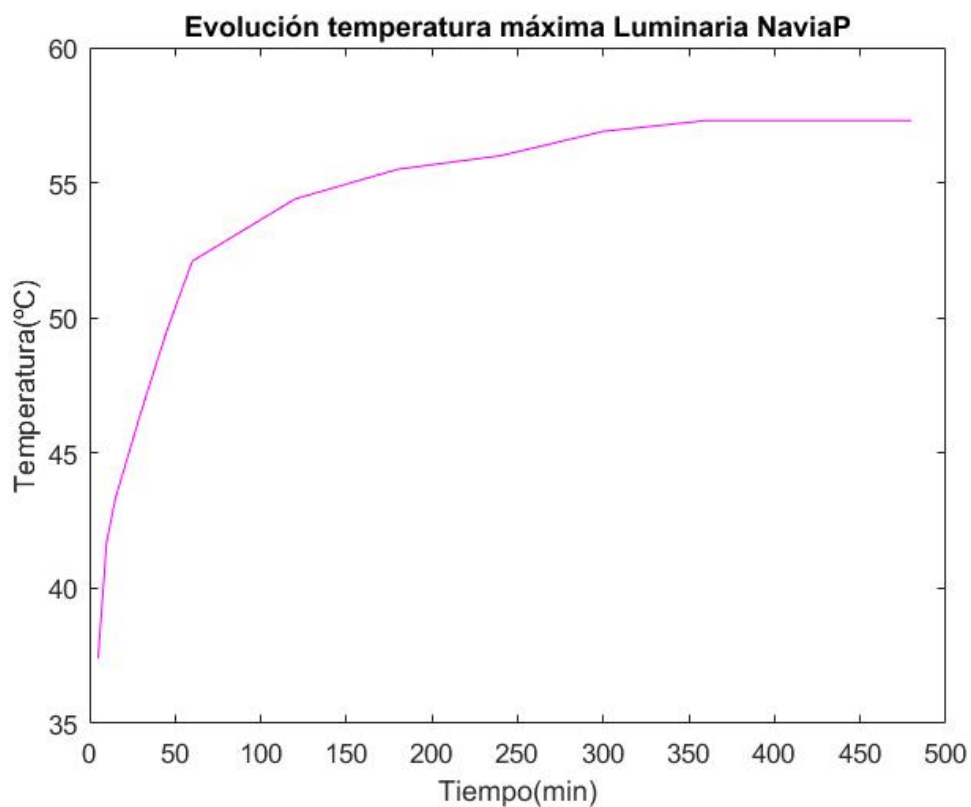


Figura 3.16 Curva evolución temperatura máxima luminaria NaviaP. Fuente: Elaboración propia

Una imagen tomada con la cámara termográfica en un instante determinado es:

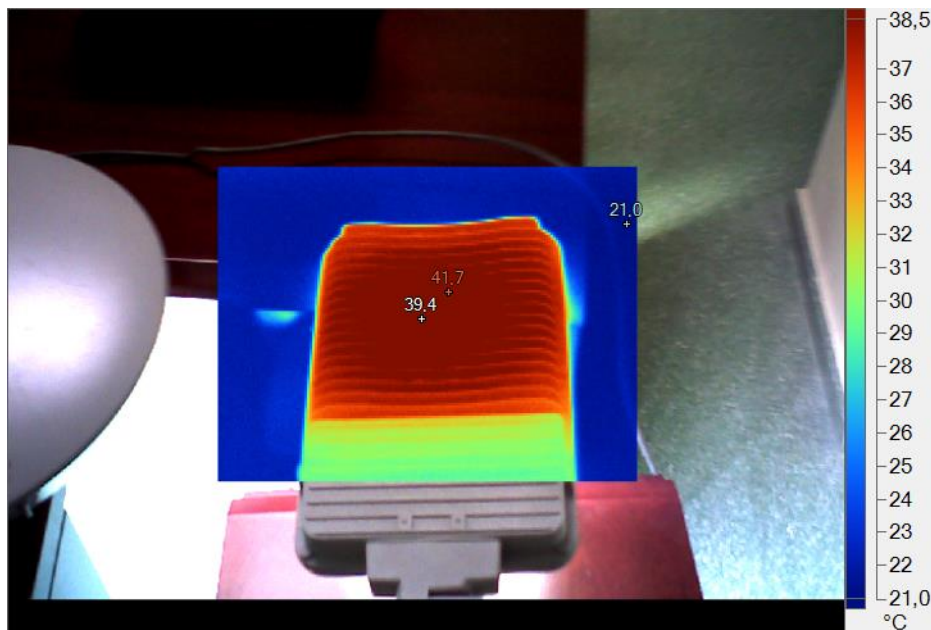


Figura 3.17 Imagen térmica característica luminaria NaviaP. Fuente: Software SmartView

La curva de evolución de la temperatura comparándola con la temperatura límite del material, es la siguiente:

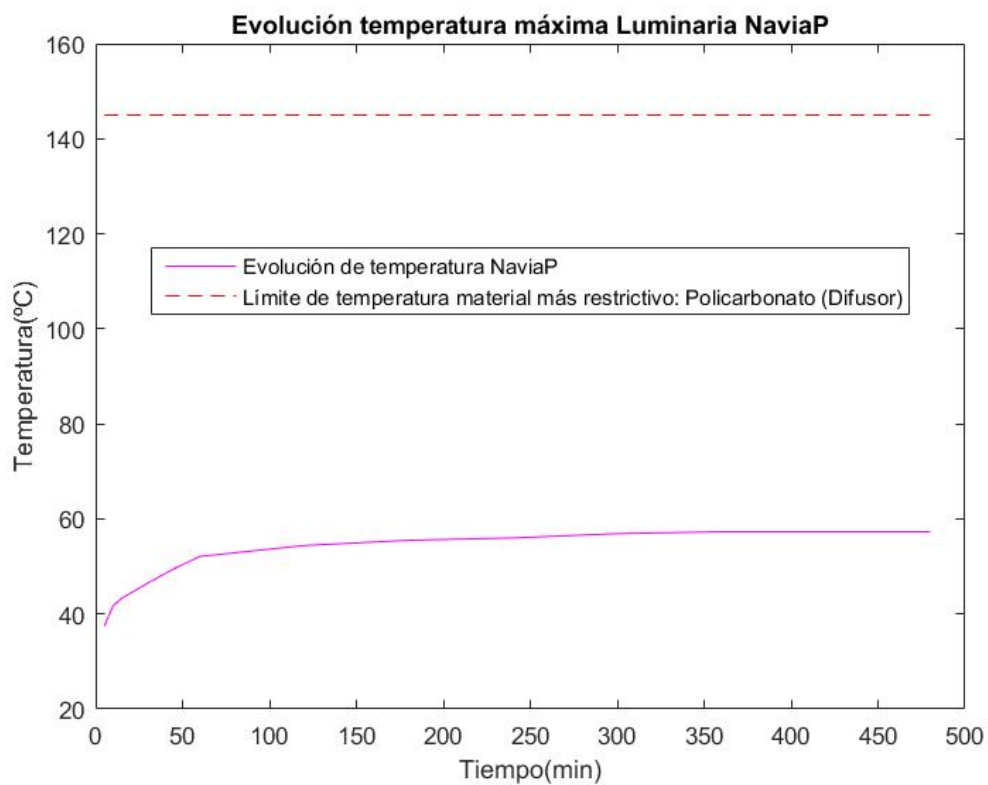


Figura 3.18 Límite de temperatura del material luminaria NaviaP. Fuente: Elaboración propia

3.2.5 Luminaria LED ATP Aire 7

La tabla de temperaturas máxima y mínima en la luminaria, son las siguientes:

Material: Aluminio Anodizado		
Tiempo	T _{máx} (°C)	T _{min} (°C)
5 min	40	38,8
10 min	48,1	47,5
15 min	54,4	53,8
30 min	59,9	58,9
45 min	63,7	62,1
60min	70,1	69
120 min	72,2	71
180 min	74,8	74,5
240 min	75,4	74,6
300 min	75,8	74,7
360 min	75,8	75,5
420 min	76	75,7
480 min	76,1	75,7
Emisividad 0,77		

Tabla 3.17 Datos de temperatura luminaria ATP Aire 7. Fuente: Elaboración propia

La curva de evolución de la temperatura máxima es:

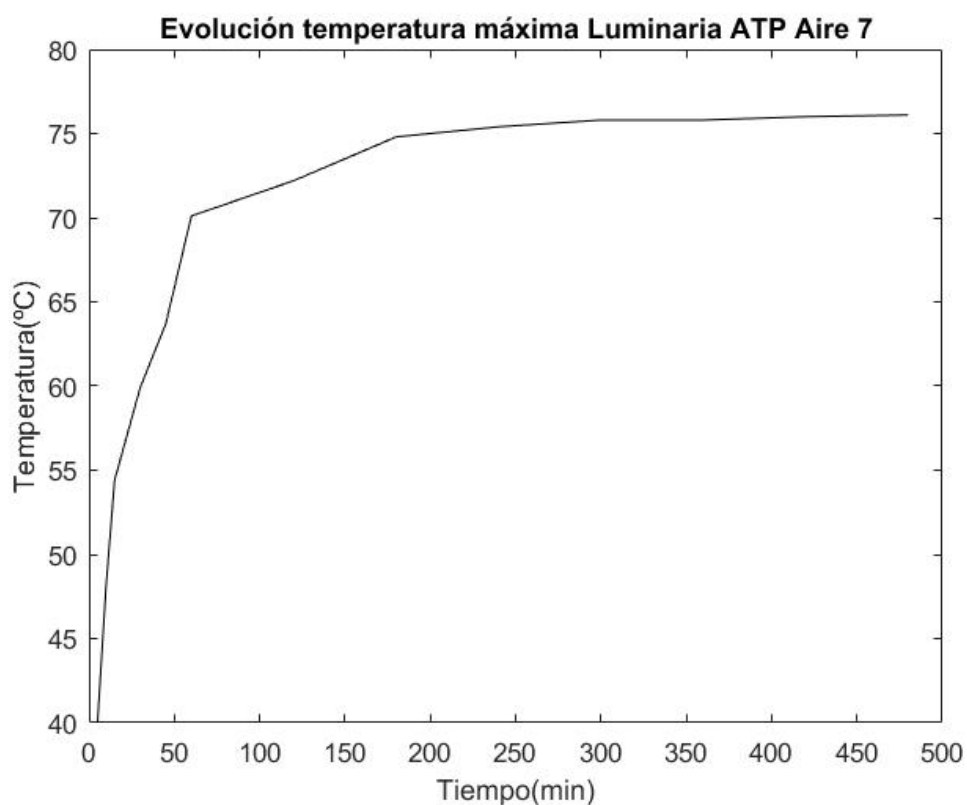


Figura 3.19 Curva evolución temperatura máxima luminaria ATP Aire 7. Fuente: Elaboración propia

Una imagen tomada con la cámara termográfica en un instante determinado es:

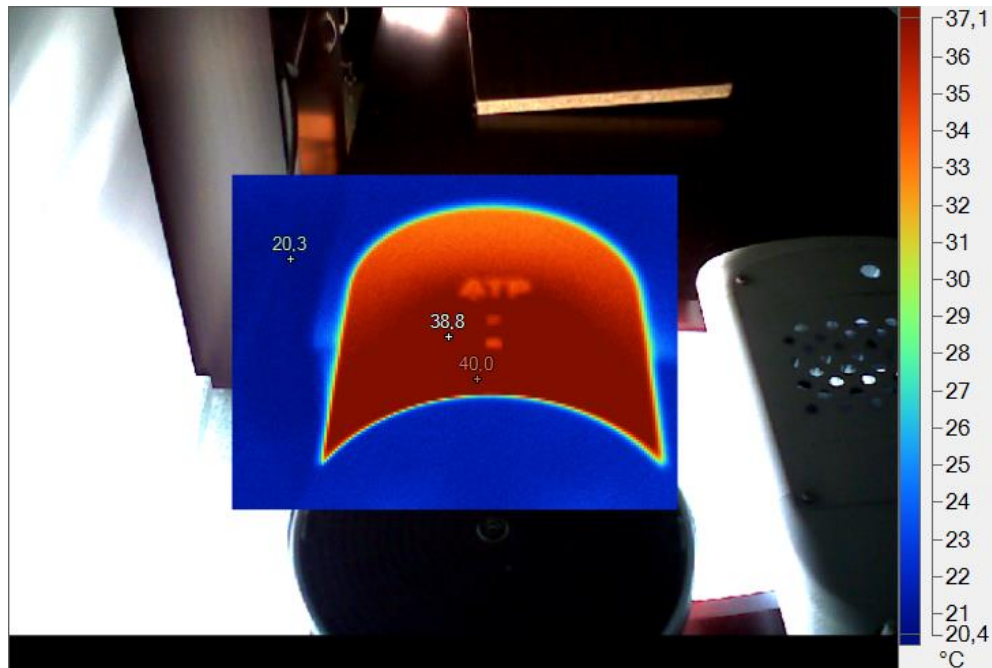


Figura 3.20 Imagen térmica característica luminaria ATP Aire 7. Fuente: Software SmartView

La curva de evolución de la temperatura comparándola con la temperatura límite del material es así:

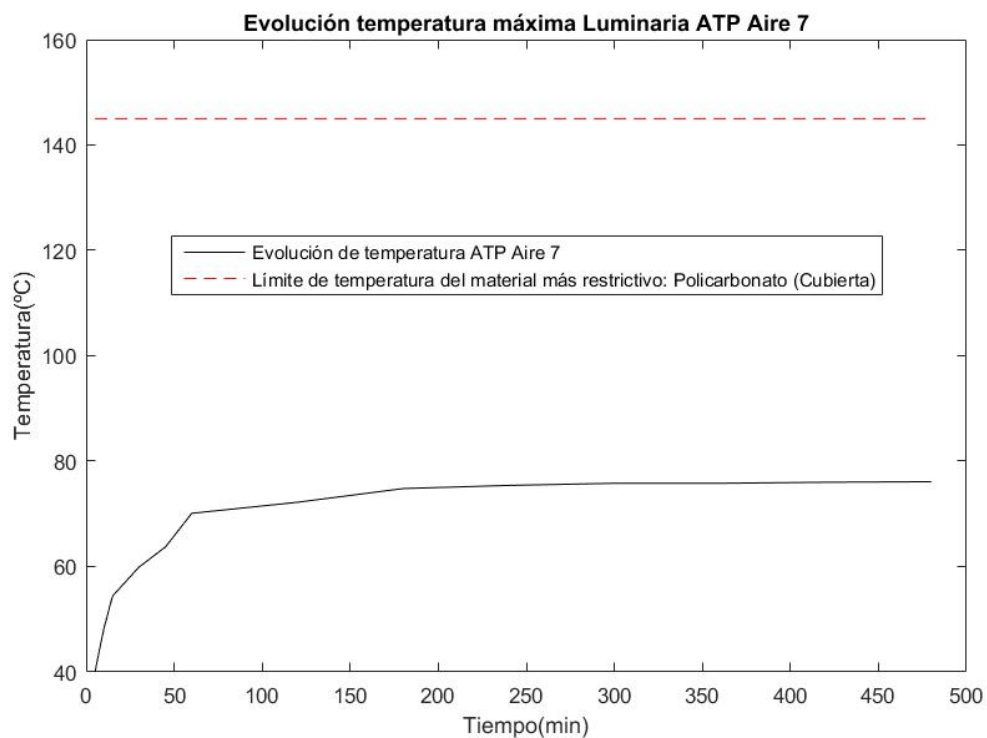


Figura 3.21 Límite de temperatura del material luminaria ATP Aire 7. Fuente: Elaboración propia

3.2.6 Lámpara de descarga VSAP

La tabla de temperaturas máxima y mínima en la luminaria, son las siguientes:

Material: Plástico PTFE		
Tiempo	T _{máx} (°C)	T _{min} (°C)
5 min	47,1	39,7
10 min	55,7	45,5
15 min	60,8	52,4
30 min	65,5	57,3
45 min	70,8	63,6
60min	76,1	67,8
120 min	78,3	73,2
180 min	79,9	78,3
240 min	81	79,2
300 min	81,1	79,6
360 min	81,2	80,2
420 min	81,5	80,6
480 min	81,5	80,8
Emisividad 0,92		

Tabla 3.18 Datos de temperatura luminaria VSAP. Fuente: Elaboración propia

La curva de evolución de la temperatura máxima es:

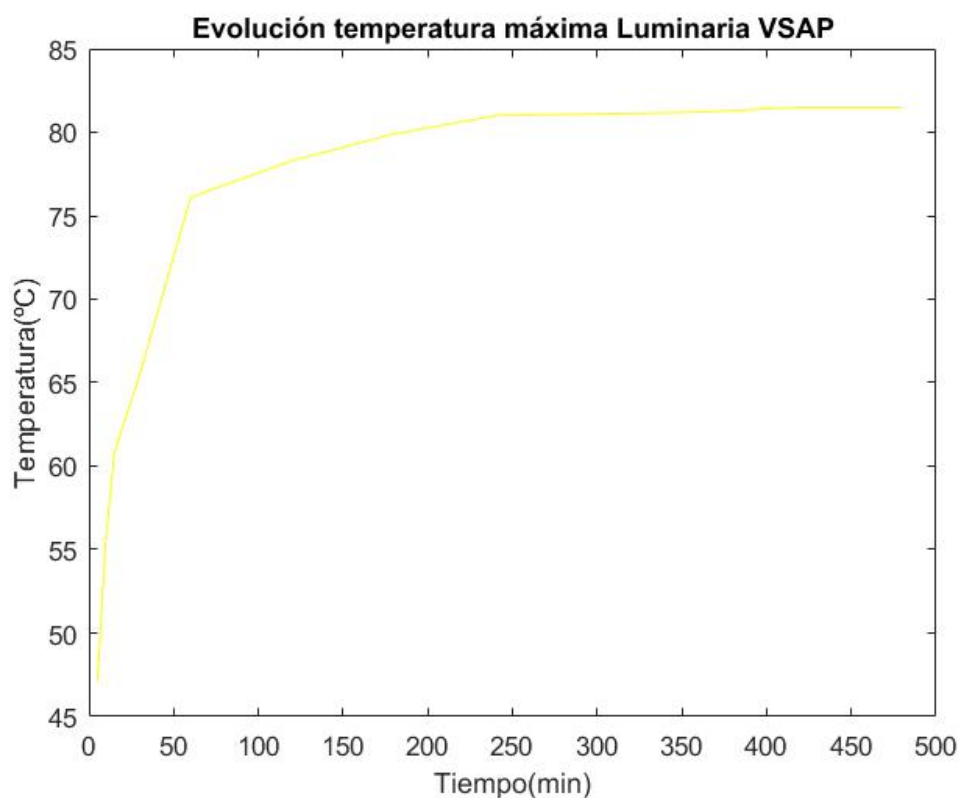


Figura 3.22 Curva evolución temperatura máxima luminaria VSAP. Fuente: Elaboración propia

Una imagen tomada con la cámara termográfica en un instante determinado es:

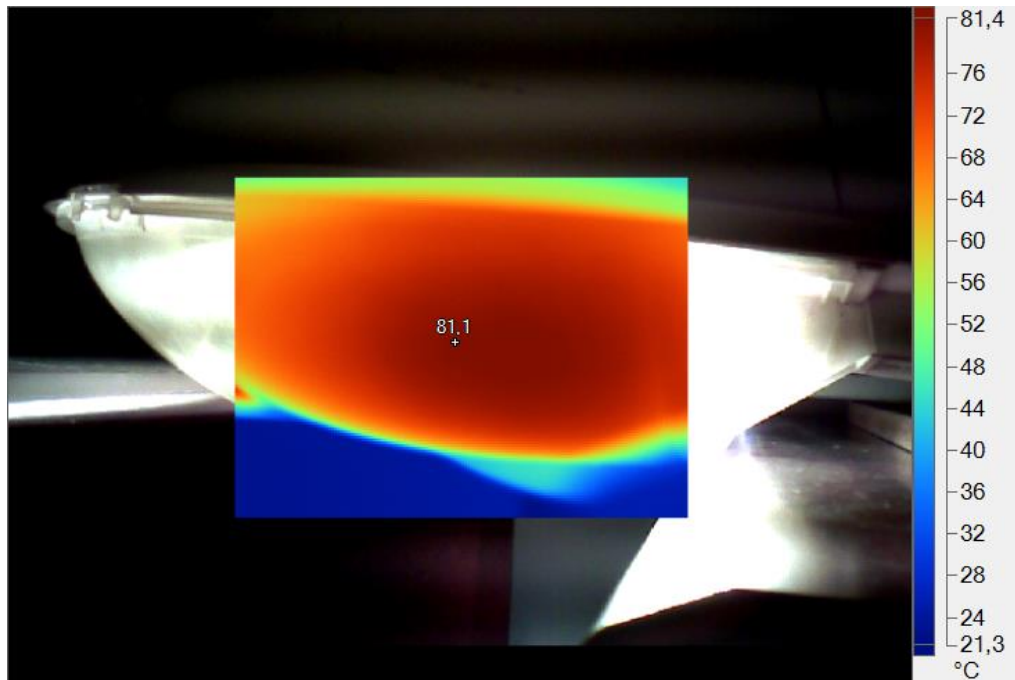


Figura 3.23 Imagen térmica característica luminaria VSAP. Fuente: Software SmartView

La curva de evolución de la temperatura comparándola con la temperatura límite del material es así:

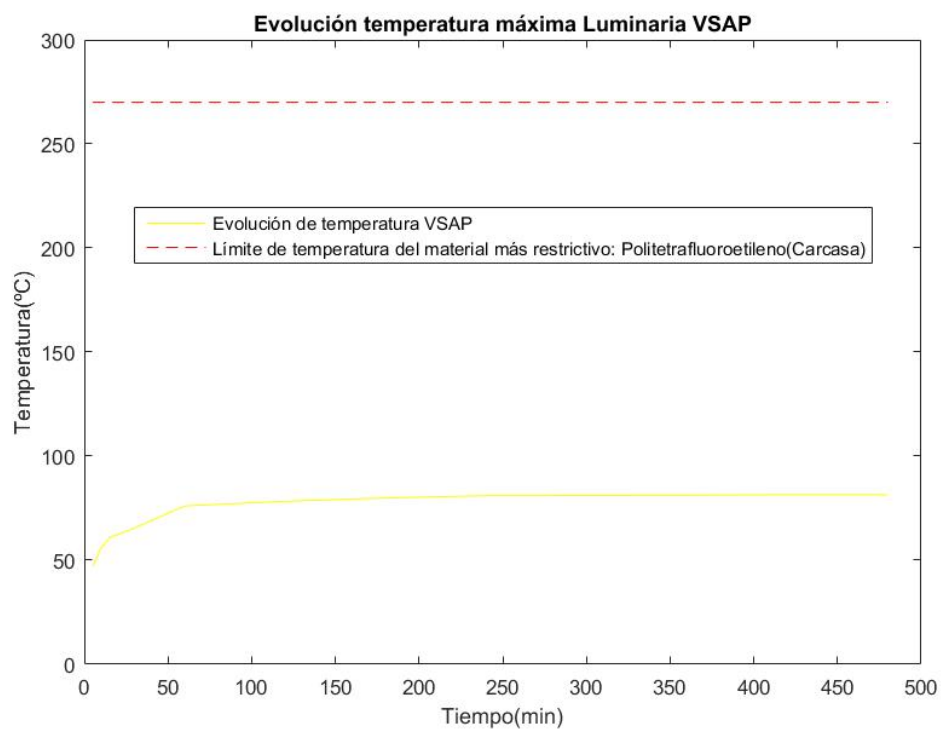


Figura 3.24 Límite de temperatura del material luminaria VSAP. Fuente: Elaboración propia

3.2.7 Lámpara de descarga HM

La tabla de temperaturas máxima y mínima en la luminaria, son las siguientes:

Material: Plástico PTFE		
Tiempo	T _{máx} (°C)	T _{min} (°C)
5 min	30,5	25,4
10 min	33,6	28,8
15 min	37,3	31,7
30 min	40	34,8
45 min	41,5	37,7
60min	42	40,6
120 min	42,3	41,4
180 min	42,5	41,7
240 min	43,2	42,7
300 min	44,7	43,4
360 min	45,2	44,8
420 min	45,9	45
480 min	45,9	45,4
Emisividad 0,92		

Tabla 3.19 Datos de temperatura luminaria HM. Fuente: Elaboración propia

La curva de evolución de la temperatura máxima es:

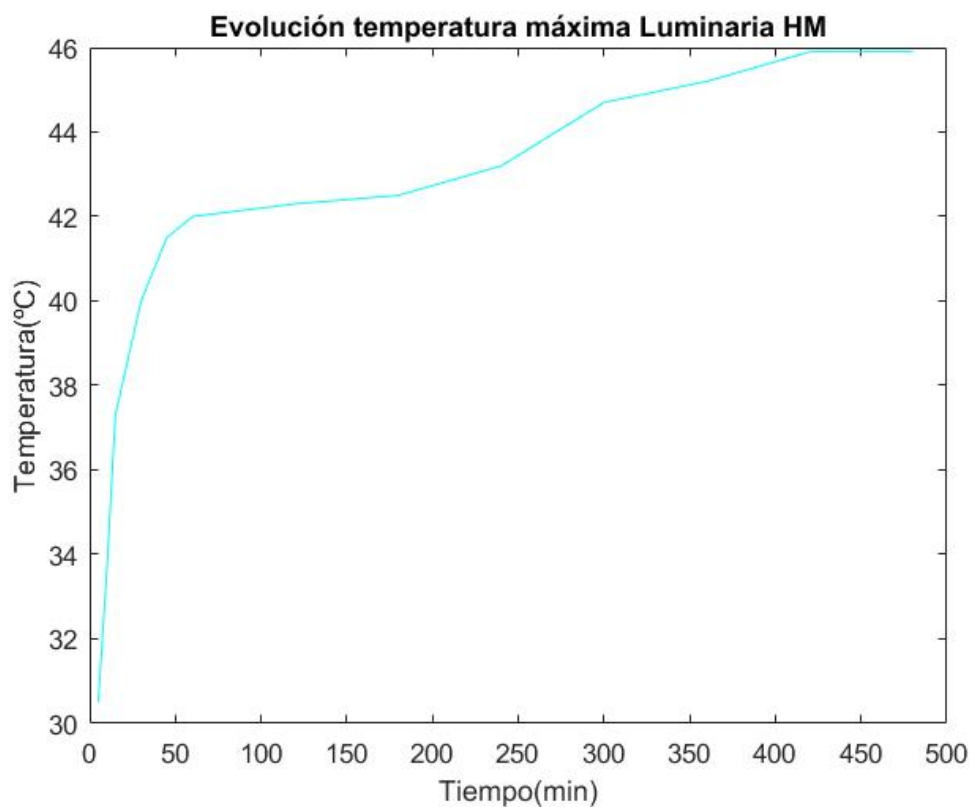


Figura 3.25 Curva evolución temperatura máxima luminaria HM. Fuente: Elaboración propia

Una imagen tomada con la cámara termográfica en un instante determinado es:

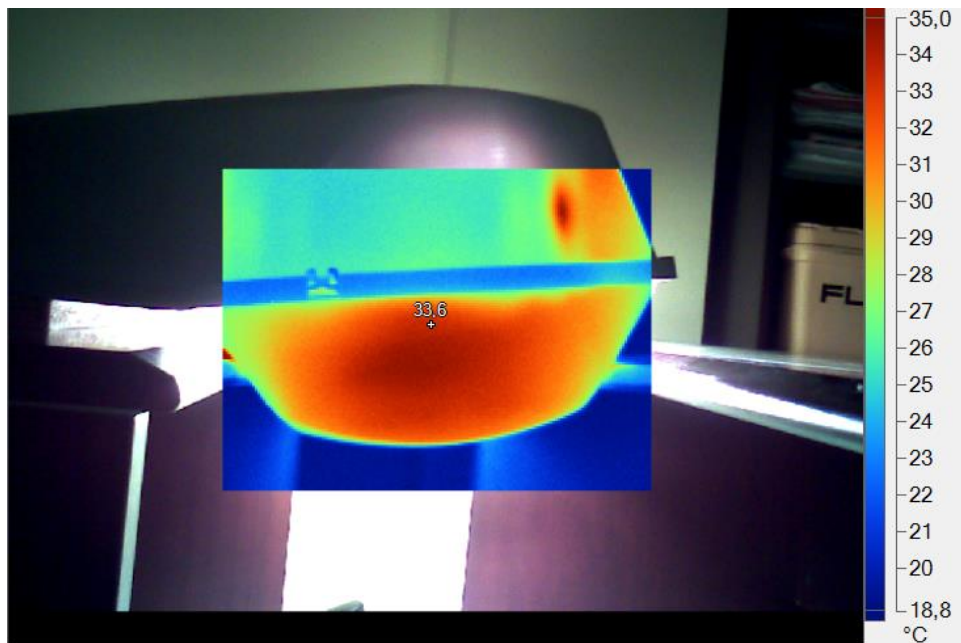


Figura 3.26 Imagen térmica característica luminaria HM. Fuente: Software SmartView

La curva de evolución de la temperatura comparándola con la temperatura límite del material es así:

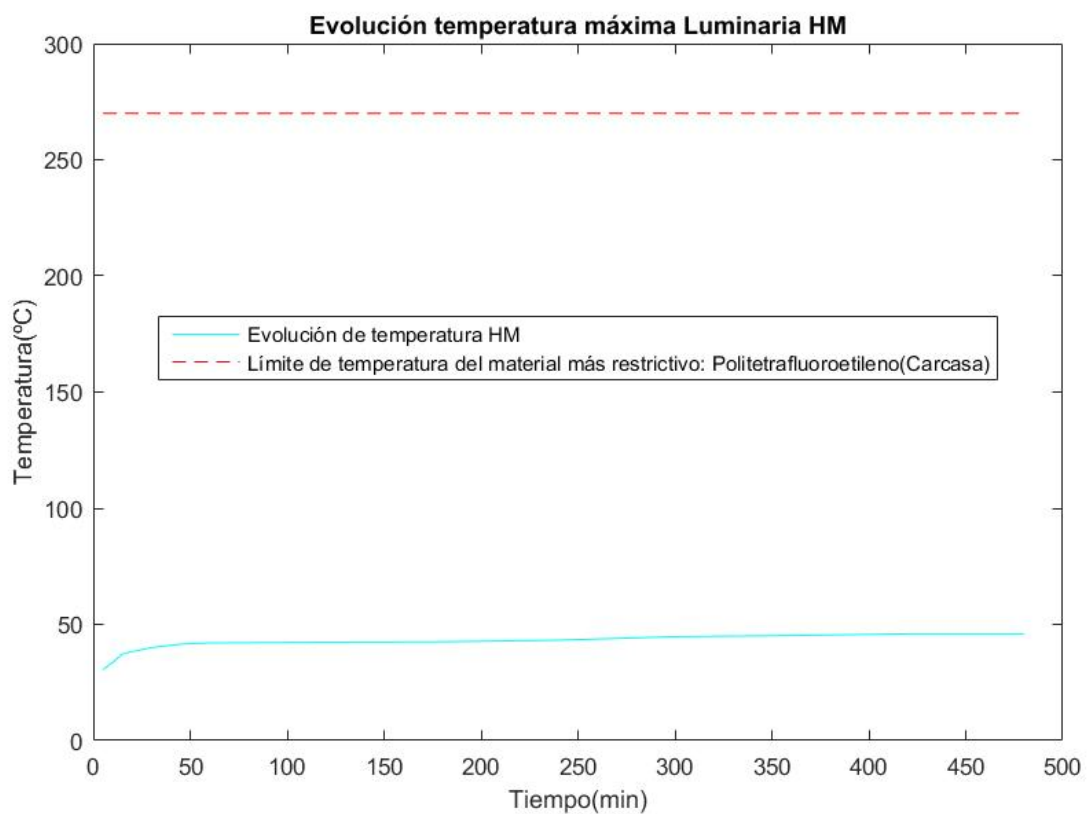


Figura 3.27 Límite de temperatura del material luminaria HM. Fuente: Elaboración propia

3.3 Resultados lumínicos

El estudio lumínico, al igual que ocurrió en el estudio de disipación térmica, se realizó simulando “unas condiciones de funcionamiento reales de las luminarias”, es decir, se analizaron dichas lámparas en un espacio totalmente a oscuras y sin ninguna contaminación lumínica externa que pudiese afectar a los resultados de las mediciones. Estas mediciones, además, se realizaron durante tres días consecutivos, con el fin observar las desviaciones de funcionamiento que podían sufrir las luminarias y la repetitividad de las medidas aportadas por el espectro-radiómetro.

Dicho estudio se realizó en dos tandas, una primera dónde se analizaron las lámparas de descarga (HM y VSAP) y una última donde se analizaron las luminarias con tecnología LED.

Para la adquisición de datos reales en el estudio, se utilizó un espectro-radiómetro, descrito en anteriores epígrafes, en el laboratorio de luminotecnica de la Universidad de Jaén. Un espectro-radiómetro es un instrumento que mide la radiación de luz entrante, así como la reflectancia y la transmitancia en un rango espectral, es decir, permite medir la intensidad cuantitativa o absoluta en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Están diseñados con la facilidad de uso y portabilidad en mente para poder utilizarlos en campo.

El diagrama de funcionamiento, de un espectro-radiómetro es el siguiente:

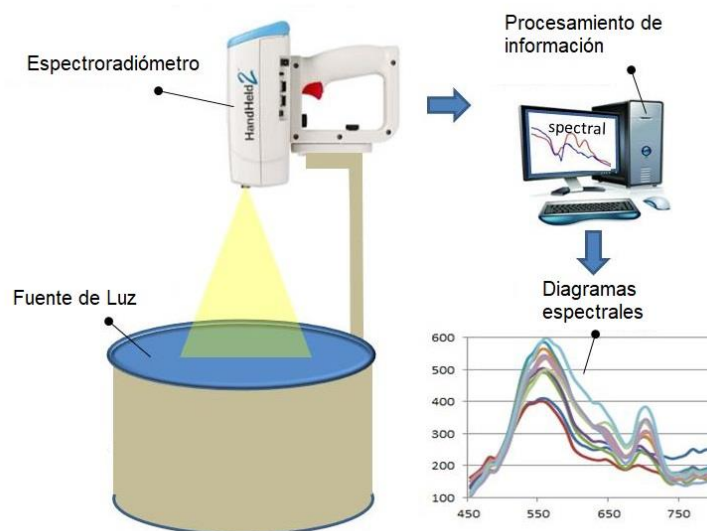


Figura 3.28 Diagrama de funcionamiento espectroradiómetro. Fuente: Elaboración propia

Las mediciones aportadas por el espectro-radiómetro, se basan en los siguientes parámetros:

- **x e y :** Coordenadas de cromaticidad del espacio de color CIE1931.
- **u y v :** Coordenadas de cromaticidad del espacio de color CIE1964.
- **u' y v' :** Coordenadas de cromaticidad del espacio de color CIE1976.
- **L_v (Luminancia):** se define como la densidad angular, rectangular y superficial de flujo luminoso que incide, atraviesa o emerge de una superficie siguiendo una dirección determinada. Alternativamente, también se puede definir como la densidad superficial de intensidad luminosa en una dirección dada.
- **Le (Radiancia):** es el flujo radiante emitido, reflejado, transmitido o recibido por una superficie dada, por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada.
- **Temperatura de color (T):** se define comparando su color dentro del espectro luminoso con el de la luz que emitiría un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada. Por este motivo la temperatura de color se expresa en Kelvin, a pesar de no reflejar expresamente una medida de temperatura, por ser la misma solo una medida relativa.

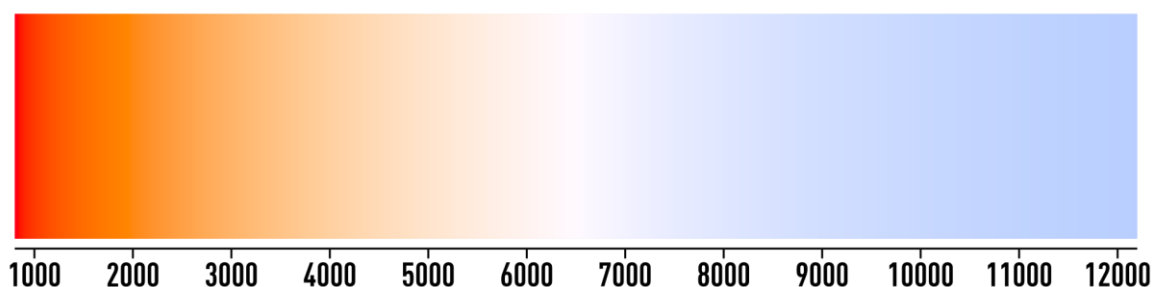


Figura 3.29 Color de un cuerpo negro entre 1000 y 12000K. Fuente: Manual CS1000A Konica Minolta

La temperatura de color no tiene relación directa con la denominación de color cálido y frío, aunque popularmente se relacionen estos términos. A partir de 5000 K se dice que se trata de colores fríos, mientras que con temperaturas más bajas (2700-3000 K) se les consideran colores cálidos.

Al igual que ocurrió en el estudio eléctrico, se presentarán los cálculos estadísticos (máximos, mínimos, media, varianza y desviación típica) de los datos recogidos en el laboratorio, con el fin de realizar la discusión de los mismos.

Media	x	y	u	v	u'	v'	Lv(cd/m ²)	Le(W/sr m ²)	T(K)
Luminaria LED 60W Jaén	0,35	0,37	0,20	0,33	0,20	0,50	16130,33	47,64	5008,00
Luminaria LED 80W Jaén	0,34	0,35	0,21	0,32	0,21	0,49	60701,00	186,93	5114,33
Luminaria LED Philips	0,41	0,36	0,25	0,33	0,25	0,50	29051,33	109,53	3150,00
Luminaria LED NaviaP	0,39	0,38	0,23	0,34	0,23	0,50	28870,00	84,69	3715,00
Luminaria LED ATP	0,37	0,36	0,22	0,33	0,22	0,49	52101,33	159,20	4260,67
Luminaria descarga VSAP	0,52	0,44	0,28	0,36	0,28	0,55	35529,33	109,85	2100,67
Luminaria descarga HM	0,46	0,40	0,27	0,35	0,27	0,52	35200,33	123,27	2542,33

Tabla 3.20 Media aritmética de parámetros lumínicos. Fuente: Elaboración propia

Varianza	x	y	u	v	u'	v'	Lv(cd/m ²)	Le(W/sr m ²)	T(K)
Luminaria LED 60W Jaén	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,01	0,00
Luminaria LED 80W Jaén	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,33
Luminaria LED Philips	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33	1,36	0,00
Luminaria LED NaviaP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	1,00
Luminaria LED ATP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33	0,04	0,33
Luminaria descarga VSAP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,14	1,33
Luminaria descarga HM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,01	1,33

Tabla 3.21 Varianza de parámetros lumínicos. Fuente: Elaboración propia

Desviación típica	x	y	u	v	u'	v'	Lv(cd/m ²)	Le(W/sr m ²)	T(K)
Luminaria LED 60W Jaén	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	0,09	0,00
Luminaria LED 80W Jaén	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,06	0,58
Luminaria LED Philips	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,15	1,17	0,00
Luminaria LED NaviaP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	1,00
Luminaria LED ATP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,15	0,20	0,58
Luminaria descarga VSAP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	0,38	1,15
Luminaria descarga HM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	0,12	1,15

Tabla 3.22 Desviación típica de parámetros lumínicos. Fuente: Elaboración propia

Valores máximos	x	y	u	v	u'	v'	Lv(cd/m ²)	Le(W/sr m ²)	T(K)
Luminaria LED 60W Jaén	0,35	0,37	0,20	0,33	0,20	0,50	16131,00	47,70	5008,00
Luminaria LED 80W Jaén	0,34	0,35	0,21	0,32	0,21	0,49	60702,00	187,00	5115,00
Luminaria LED Philips	0,41	0,36	0,25	0,33	0,25	0,50	29052,00	110,80	3150,00
Luminaria LED NaviaP	0,39	0,38	0,23	0,34	0,23	0,50	28870,00	84,81	3716,00
Luminaria LED ATP	0,37	0,36	0,22	0,33	0,22	0,49	52102,00	159,40	4261,00
Luminaria descarga VSAP	0,52	0,44	0,28	0,36	0,28	0,55	35530,00	110,25	2102,00
Luminaria descarga HM	0,46	0,40	0,27	0,35	0,27	0,52	35201,00	123,40	2543,00

Tabla 3.23 Valores máximos de parámetros lumínicos. Fuente: Elaboración propia

Valores mínimos	x	y	u	v	u'	v'	Lv(cd/m ²)	Le(W/sr m ²)	T(K)
Luminaria LED 60W Jaén	0,35	0,37	0,20	0,33	0,20	0,50	16130,00	47,54	5008,00
Luminaria LED 80W Jaén	0,34	0,35	0,21	0,32	0,21	0,49	60700,00	186,90	5114,00
Luminaria LED Philips	0,41	0,36	0,25	0,33	0,25	0,50	29050,00	108,50	3150,00
Luminaria LED NaviaP	0,39	0,38	0,23	0,34	0,23	0,50	28870,00	84,51	3714,00
Luminaria LED ATP	0,37	0,36	0,22	0,33	0,22	0,49	52100,00	159,00	4260,00
Luminaria descarga VSAP	0,52	0,44	0,28	0,36	0,28	0,55	35529,00	109,50	2100,00
Luminaria descarga HM	0,46	0,40	0,27	0,35	0,27	0,52	35200,00	123,20	2541,00

Tabla 3.24 Valores mínimos de parámetros lumínicos. Fuente: Elaboración propia

A modo de ejemplo también expondremos las capturas de pantalla del espectro-radiómetro, con la ayuda de su software CS-S1w, para observar los datos recogidos para una luminaria, en este caso la luminaria GL1A 60W Jaén, en el día 1 de medición.

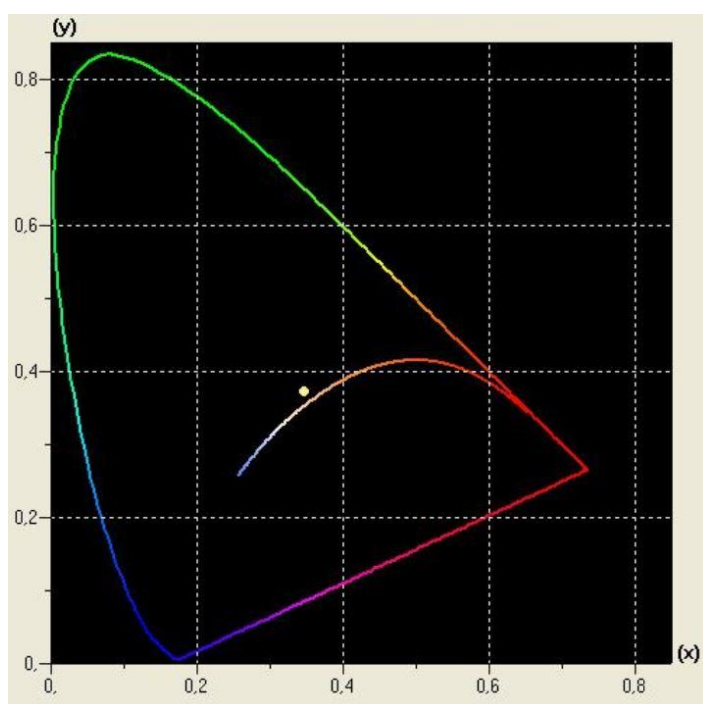


Figura 3.30 Diagrama de cromaticidad xy, día 1 de medición. Fuente: Software CS-S1w

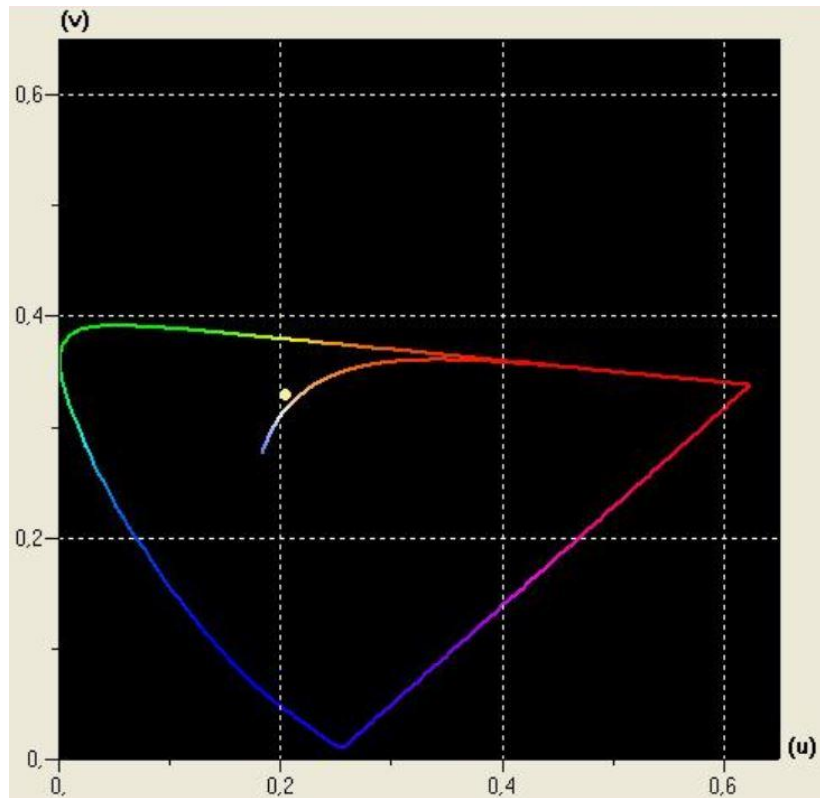


Figura 3.31 Diagrama de cromaticidad uv , día 1 de medición. Fuente: Software CS-S1w

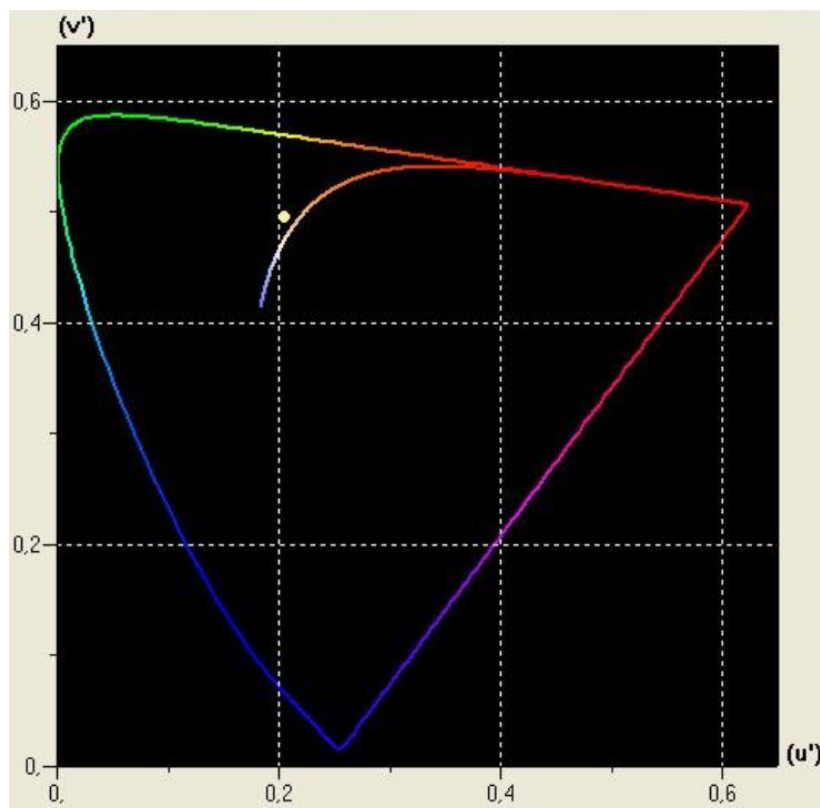


Figura 3.32 Diagrama de cromaticidad $u'v'$, día 1 de medición. Fuente: Software CS-S1w

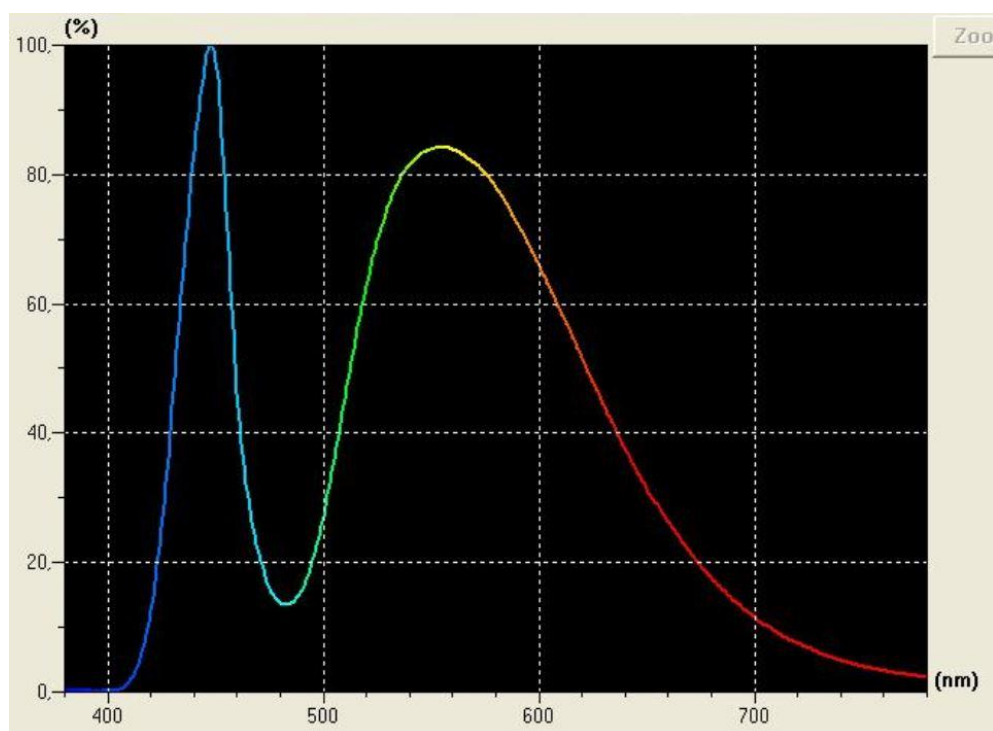


Figura 3.33 Distribución relativa espectral, día 1 de medición. Fuente: Software CS-S1w

4. DISCUSIÓN

4.1 Resultados eléctricos

Para el buen funcionamiento eléctrico de las luminarias LED, tal y como se ha analizado a lo largo del presente estudio, es clave tener controlados los parámetros de corriente de arranque y generación de armónicos dentro de un rango de operación aceptable. La alta generación armónica y los picos de corriente altos en el momento del arranque no son adecuados y por lo tanto es fundamental amortiguar dicho impacto en la luminaria.

En la primera parte del presente trabajo se ha realizado un análisis de las variables eléctricas en cada una de las siete lámparas bajo estudio (VSAP, HM y LED), para ver la generación armónica durante su funcionamiento y la corriente de pico que producen en el arranque. Este estudio, se dividió en dos partes: arranque en frío y arranque en caliente, como bien se detalló en el epígrafe del estudio eléctrico.

El arranque en frío consiste en arrancar las luminarias en un intervalo de tiempo, en el que la luminaria no haya alcanzado su régimen permanente (menos de 5 minutos de funcionamiento) y el arranque en caliente se produce una vez que la luminaria ya haya alcanzado su régimen permanente (más de 5 minutos de funcionamiento).

La finalidad de realizar una distinción entre arranque en frío y en caliente, es simular distintos escenarios en los que se puede producir el arranque de las luminarias. Un arranque en frío, por ejemplo, se produce cuando se encienden las luminarias por primera vez cuando empieza a anochecer. Un arranque en caliente se origina cuando por ejemplo, las luminarias públicas se apagan debido a una caída de tensión y posteriormente se produce el encendido de las mismas, debido al rearme automático de los cuadros.

Se ha procedido a realizar mediciones durante 4 días de análisis y distintos intervalos de funcionamiento en cada día. Cada día se componía de un arranque en frío (0-5 min) y 5 arranques en caliente (5-10min, 10-15min, 15-30min, 30-45min y 45-60 min), permitiendo una comparación muy clara del comportamiento de cada luminaria en cada tipo de arranque.

La primera comparación que se hará, será del pico de corriente en cada tipo de arranque. Compararemos los valores medios, máximos y mínimos de la corriente de arranque en cada situación.

Además para calcular la severidad de éstas corrientes de arranque en cada caso, calcularemos un factor de pico que simboliza el número de veces que la corriente de pico supera al valor eficaz nominal del consumo de corriente en cada luminaria, y se define así:

$$\text{Factor de pico} = \frac{I_{\text{pico arranque}}}{I_{\text{RMS nominal}}}$$

Donde:

$I_{\text{pico arranque}}$ = Corriente de pico mínima, máxima y media en el arranque

$I_{\text{RMS nominal}}$ = Corriente eficaz nominal consumida por la luminaria

La comparativa de resultados medios, muestran que el factor multiplicador de corriente es mayor en frío que en caliente, para casi la mayoría de las luminarias, excepto para las de grandes potencias como la de descarga VSAP y la LED ATP Aire7 Ver tabla 3.25

Corriente de Arranque Media (A)	Arranque en frío	Arranque en caliente	Arms en frío	Arms en caliente	Factor de pico de corriente arranque en frío	Factor de pico de corriente arranque en caliente
Luminaria LED 60W Jaén	2,73	3,12	0,23	0,27	12,1	11,5
Luminaria LED 80W Jaén	3,55	3,07	0,30	0,30	11,8	10,2
Luminaria LED Philips	0,30	0,30	0,10	0,10	3,0	3,0
Luminaria LED NaviaP	4,30	3,21	0,20	0,20	21,5	16,0
Luminaria LED ATP	5,40	6,03	0,80	0,80	6,8	7,5
Luminaria descarga VSAP	6,65	5,54	1,43	1,37	4,6	4,0
Luminaria descarga HM	4,27	5,54	0,50	0,50	8,5	11,1

Tabla 3.25 Comparación valores de corriente de arranque medios. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.25 se observa, que el mayor factor de pico de corriente media, ocurre en la luminaria NaviaP de 60W, superando a las demás con mucha diferencia, luego será una luminaria que habrá que observar detenidamente en las siguientes comparaciones de corrientes de arranque máximas y mínimas.

Además se puede observar como después de la NaviaP, los dos siguientes factores de pico más altos ocurren en las luminarias de 60W y 80W de Jaén (GL1A y T1A respectivamente), obteniendo factores muy parecidos tanto en frío como en caliente, lo cual nos permite afirmar, que con respecto a la corriente de arranque, se comportan de forma muy parecida tanto en frío como en caliente.

Por otro lado se puede ver como la luminaria LED Mini-Iridium de Philips, tiene un factor de pico tanto en frío como en caliente exactamente igual. Al ser una luminaria de baja potencia (20W) con respecto a las demás, no distingue entre arranque en frío y en caliente, debido a su circuito de baja potencia.

Con respecto a la luminaria ATP Aire 7, se comprobará como su factor de pico es más grande en caliente que en frío, aunque presenta valores próximos en ambos casos. Se puede observar además como a pesar de ser una luminaria de alta potencia (200W), se comporta mejor en el arranque que la NaviaP, ya que son las dos luminarias de última generación tecnológica.

Finalmente observando los datos comparativos medios de las luminarias de descarga (VSAP y HM) vemos como presenta unos valores del factor de pico de corriente más bajos que todas las luminarias LED, excepto que la Mini-Iridium de Philips.

Esta comparativa resulta muy interesante ya que las lámparas de descarga al no tener apenas componentes electrónicos o fuentes electrónicas que controlen la luminaria hace que no metan una corriente de pico tan grande con respecto a su valor nominal en el circuito eléctrico como si lo hacen la mayoría de las luminarias LED como se ha podido observar en la tabla 3.25.

La comparativa de resultados máximos, muestran que el factor de pico de corriente es mayor en caliente que en frío, para todas las luminarias, excepto para la luminaria Mini-Iridium, que se comporta de igual forma tanto en caliente como en frío.

Ver tabla 3.26

Corriente máxima de Arranque (A)	Arranque en frío	Arranque en caliente	Arms en frío	Arms en caliente	Factor de pico de corriente arranque en frío	Factor de pico de corriente arranque en caliente
Luminaria LED 60W Jaén	3,90	4,40	0,30	0,30	13,00	14,67
Luminaria LED 80W Jaén	4,20	4,80	0,30	0,30	14,00	16,00
Luminaria LED Philips	0,30	0,30	0,10	0,10	3,00	3,00
Luminaria LED NaviaP	4,60	4,60	0,20	0,20	23,00	23,00
Luminaria LED ATP	7,70	8,00	0,80	0,80	9,63	10,00
Luminaria descarga VSAP	7,30	7,70	1,50	1,40	4,87	5,50
Luminaria descarga HM	4,50	6,00	0,50	0,50	9,00	12,00

Tabla 3.26 Comparación valores de corriente de arranque máximos. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.26, se sigue observando, al igual que en el valor medio de la tabla 3.25, como el factor de pico de corriente de la luminaria NaviaP de 60W sigue siendo mucho más grande en comparación con el resto de luminarias, así como la luminaria Mini-Iridium de Philips, se sigue comportando igual tanto en valores máximos como medios y tanto en arranque en frío como en caliente.

Comparando las tablas 3.25 y 3.26 de manera generalizada, se puede observar como si arrancando las luminarias en corriente máxima de arranque, tabla 3.26, el factor de pico de corriente más grande se produce en el arranque en caliente en vez de en frío, como si ocurría arrancando las luminarias en corriente media de arranque, tabla 3.25.

Esto indica que para todas las luminarias, sin distinción entre descarga o LED, en corriente máxima, el arranque en caliente es más peligroso que el arranque en frío.

La comparativa de resultados mínimos, muestran que el factor de pico de corriente es mayor en frío que en caliente, para todas las luminarias, excepto para la luminaria Mini-Iridium, que se comporta de igual forma tanto en caliente como en frío y para la lámpara de descarga de HM. Ver tabla 3.27

Corriente mínima de Arranque (A)	Arranque en frío	Arranque en caliente	Arms en frío	Arms en caliente	Factor de pico de corriente arranque en frío	Factor de pico de corriente arranque en caliente
Luminaria LED 60W Jaén	2,10	2,10	0,10	0,20	21,00	10,50
Luminaria LED 80W Jaén	2,70	2,10	0,30	0,30	9,00	7,00
Luminaria LED Philips	0,30	0,30	0,10	0,10	3,00	3,00
Luminaria LED NaviaP	3,80	1,70	0,20	0,20	19,00	8,50
Luminaria LED ATP	3,30	3,10	0,80	0,80	4,13	3,88
Luminaria descarga VSAP	6,30	2,90	1,40	1,30	4,50	2,23
Luminaria descarga HM	4,10	4,30	0,50	0,50	8,20	8,60

Tabla 3.27 Comparación valores de corriente de arranque mínimos. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.27, se observa una diferencia con respecto a las anteriores, y es que el factor de pico de corriente más grande se produce ahora en la luminaria de 60W de Jaén seguido de la NaviaP de 60W que sigue siendo mucho más grande en comparación con el resto de luminarias. Además la luminaria Mini-Iridium de Philips, se sigue comportando igual tanto en valores máximos como medios como mínimos y tanto en arranque en frío como en caliente.

Comparando las tablas 3.26 y 3.27 de manera generalizada, podemos observar como si arrancando las luminarias en corriente mínima de arranque, tabla 3.27, el factor de pico de corriente más grande se produce en el arranque en frío en vez de en caliente, como si ocurría arrancando las luminarias en corriente máxima de arranque, tabla 3.26.

Esto indica que para todas las luminarias, prácticamente sin distinción entre descarga o LED, en corriente mínima, el arranque en frío es más peligroso que el arranque en caliente.

La segunda y última comparación que se hará será de la distorsión armónica total de corriente. Se comprobará los valores medios de la generación armónica que produce cada luminaria y la diferencia entre generación en frío y generación en caliente. Ver tabla 3.28

THD Armónicos de corriente medios (%)	Arranque en frío	Arranque en caliente	Diferencia
Luminaria LED 60W Jaén	11,13	11,21	0,08
Luminaria LED 80W Jaén	8,08	8,17	0,09
Luminaria LED Philips	13,90	14,52	0,62
Luminaria LED NaviaP	13,50	13,76	0,26
Luminaria LED ATP	6,10	6,22	0,12
Luminaria descarga VSAP	33,00	35,01	2,01
Luminaria descarga HM	10,23	10,19	0,04

Tabla 3.28 THD Armónicos de corrientes medios. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.28 se observa como para todas las luminarias, excepto para la de descarga HM, la generación armónica mayor se produce en el arranque en caliente en vez de en el frío, pero con unas diferencias muy pequeñas entre THD en frío y THD en caliente para todas las luminarias (entre 0% y 2%), lo cual nos permite afirmar que la generación de armónicos es independiente del tipo de arranque de la luminaria.

Además realizando una comparativa entre todas las luminarias, se observa, como la que peor se comporta armónicamente es la de descarga VSAP, seguidas de la Mini-Iridium de Philips y la NaviaP.

Un dato muy interesante que se puede extraer de la tabla 3.8, es siendo las luminarias ATP Aire 7 y NaviaP de última generación, la ATP Aire 7 es la que mejor comportamiento armónico tiene de todas y la NaviaP es de las que peores comportamientos armónicos tiene respecto a todas las luminarias LED.

Finalmente y como dato también interesante a observar en la tabla 3.28, la lámpara de HM, a pesar de montar una tecnología de descarga se comporta mejor armónicamente que todas las luminarias que montan tecnología LED, excepto que la ATP Aire 7, lo cual nos permite afirmar que su balasto de arranque filtra bien los armónicos de corriente que se producen durante el funcionamiento.

4.2 Resultados térmicos/lumínicos

Para el buen funcionamiento de las luminarias LED, tal y como se ha analizado a largo del presente trabajo, es clave mantener la temperatura de disipación térmica en los LED, dentro de un rango de operación. Las temperaturas altas en los componentes electrónicos no son adecuadas y por lo tanto es fundamental disipar el calor generado.

En el presente trabajo se ha realizado un estudio experimental de la disipación térmica de varias luminarias, tanto de tecnología LED como de descarga, y se han analizado los datos obtenidos a través de una cámara termográfica FLUKE TI 25 en el laboratorio de luminotecnia de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Jaén.

Se ha realizado una toma de datos progresiva desde el encendido hasta la estabilización térmica de los equipos. Tomando datos de manera periódica hasta que la temperatura se ha mantenido estable, pasado un tiempo desde su conexión a la red eléctrica.

Una vez realizadas las curvas de evolución térmica de cada luminaria durante las 8 horas nominales de funcionamiento, mostradas en el apartado de resultados térmicos, el primer paso era analizar si se producía una disipación térmica segura, es decir, que la temperatura máxima de disipación no sobrepasara la temperatura límite del material más restrictivo de los que se compone cada una de las luminarias. Como se puede observar en dicho apartado (figuras 3.9, 3.12, 3.15, 3.18, 3.21, 3.24, 3.27), se produce una disipación térmica segura en todas las luminarias, ya que su temperatura máxima está lejos de la temperatura límite del material.

Con el fin de observar la curva de disipación térmica de unas luminarias con respecto de las otras y para comprobar la influencia de la potencia de la luminaria en la temperatura máxima de disipación, se realizó un gráfico a modo de comparación, donde se muestran todas las curvas de evolución de la temperatura, representadas en el mismo gráfico. Ver figura 3.34

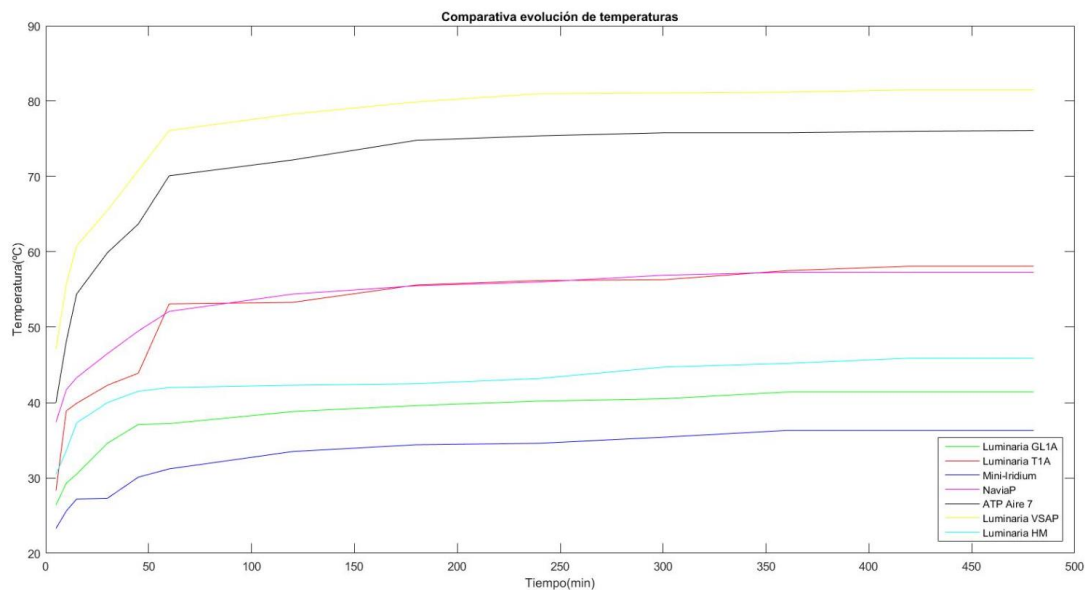


Figura 3.34 Comparativa evolución de temperatura máxima de las luminarias. Fuente: Elaboración propia

La temperatura se mantiene estable aproximadamente a partir de las 5 horas de funcionamiento, como se observa en la figura. Se aprecia que las luminarias de ATP y VSAP alcanzan mayor temperatura debido a la potencia nominal de funcionamiento de las mismas que son de 200W y 250W respectivamente, sensiblemente mayor que el resto de luminarias. Tal y como se podía imaginar.

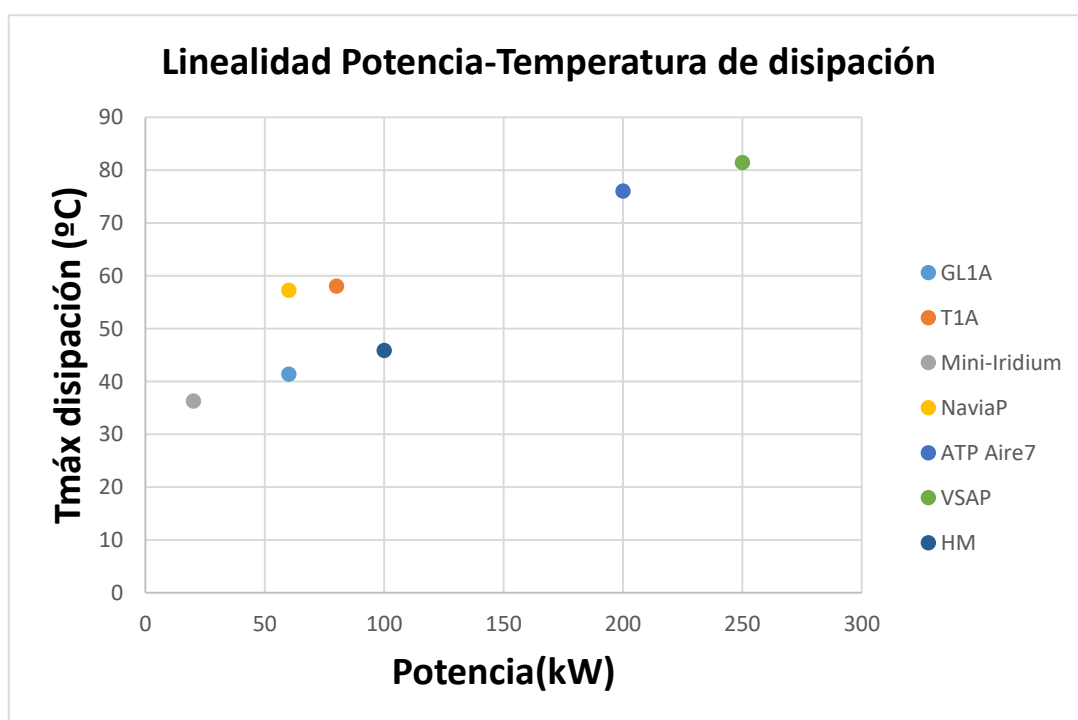


Figura 3.35 Linealidad Potencia-Temperatura de disipación. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.35 se representa la potencia nominal de cada luminaria frente a la temperatura máxima de disipación alcanzada de cada luminaria cuando se ha estabilizado la temperatura. Se observa que no hay linealidad de la potencia nominal respecto a la temperatura máxima alcanzada debido a los diferentes diseños de las propias luminarias y de los materiales característicos que forman las mismas. Con un diseño apropiado de la luminaria, teniendo una superficie de contacto del disipador suficiente y una selección de materiales donde la conductividad térmica es alta, se mejorarán los resultados de la disipación térmica.

Como se ha comentado en el inicio del presente epígrafe, las altas temperaturas de disipación en las luminarias no son adecuadas y pueden reducir la vida útil del LED del que se compone la luminaria, así como la degradación de las propiedades lumínicas de los mismos [22] , luego el problema de la disipación térmica es un gran hándicap para las lámparas con tecnología LED y no tanto para las de descarga ya que a éstas no les afecta la disipación del calor en lo que a propiedades lumínicas se refiere, pero si al tiempo de vida útil ya que pueden afectar a los balastos de arranque.

Para estudiar cómo afecta la temperatura máxima que se alcanza en la luminaria tras su estabilidad térmica, a las propiedades lumínicas de los LED que la componen, situaremos en un diagrama de cromaticidad xy del espacio de color CIE1931, explicado en epígrafes anteriores, la posición de cada lámpara, en una situación ideal de funcionamiento, es decir, cuando la temperatura de unión de los LED se sitúa en 0°C. Esto se produce en el instante inicial del arranque de la luminaria.

Posteriormente, mediante las hojas de características del fabricante LED de cada luminaria, se realizará una gráfica de la evolución de las coordenadas lumínicas Cx, Cy, en función de la temperatura de unión, para finalmente obtener cuanto se han disminuido dichas coordenadas, sabiendo la temperatura máxima de disipación y obtener el impacto real de la temperatura sobre las propiedades lumínicas.

Para asegurar el tiempo de vida útil, la eficiencia y el color de los LED, la temperatura de unión de los LED debe de ser mantenida en un rango específico.

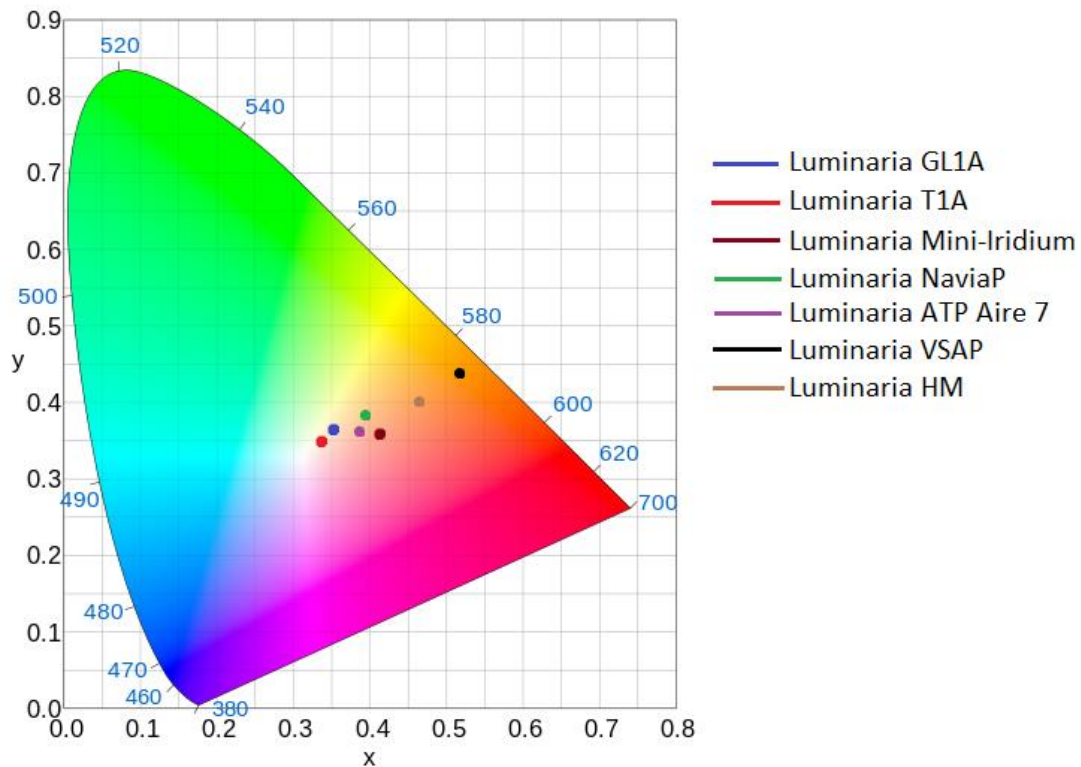


Figura 3.36 Coordenadas Cx, Cy en las luminarias, condición ideal de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia y hojas de características

La luminaria GL1A, monta un LED LUXEON T de la marca LUMILED, y su curva de evolución del incremento de las coordenadas de cromaticidad x e y con respecto a la temperatura de unión del LED, es la siguiente:

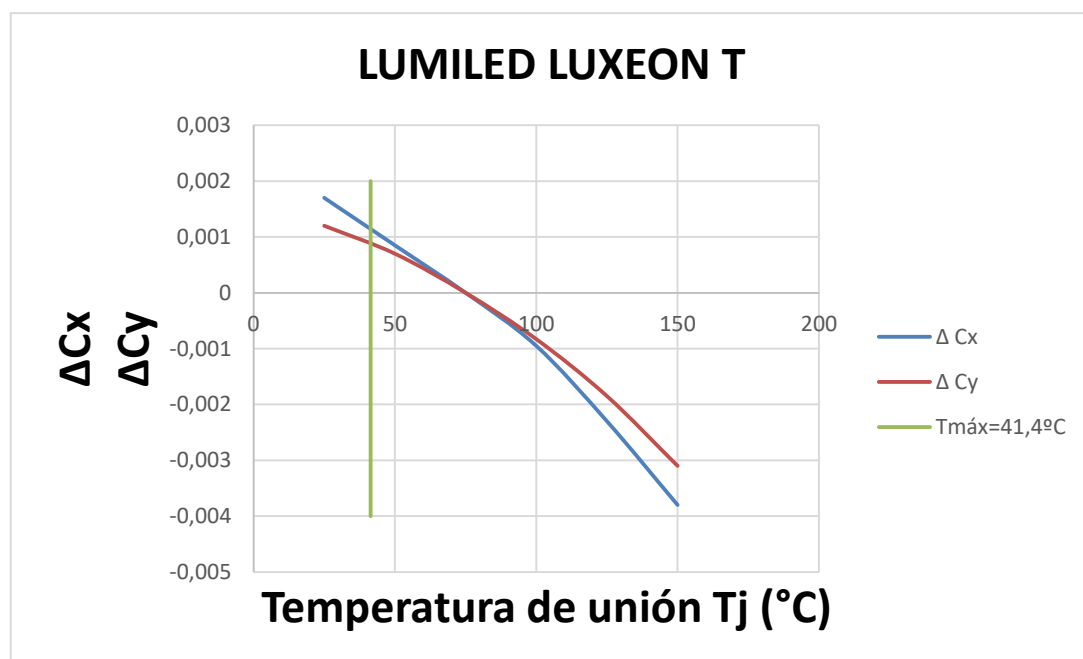


Figura 3.37 Temperatura de unión (T_j) vs cambio de coordenadas de cromaticidad lámpara GL1A. Fuente: Elaboración propia y catálogo LUMILED

Como se puede observar, el incremento de las coordenadas de cromaticidad, según la máxima temperatura de disipación alcanzada en la luminaria es:

$$\Delta C_x = 0,0013 \rightarrow C_{x \text{ límite}} - C_{x \text{ inicial}} = 0,0013 \rightarrow C_{x \text{ límite}} = \mathbf{0,3513}$$

$$\Delta C_y = 0,0009 \rightarrow C_{y \text{ límite}} - C_{y \text{ inicial}} = 0,0009 \rightarrow C_{y \text{ límite}} = \mathbf{0,371}$$

La luminaria T1A, también monta un LED LUXEON T de la marca LUMILED, y su curva de evolución del incremento de las coordenadas de cromaticidad x e y con respecto a la temperatura de unión del LED, es la siguiente:

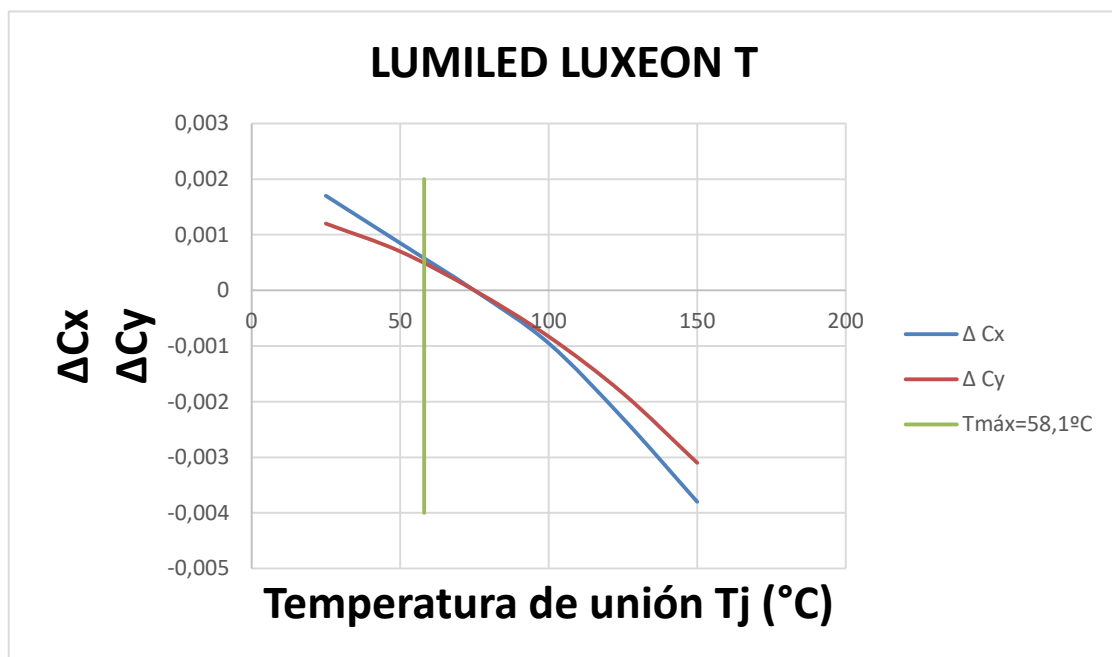


Figura 3.38 Temperatura de unión (Tj) vs cambio de coordenadas de cromaticidad lámpara T1A. Fuente: Elaboración propia y catálogo LUMILED

Como se puede observar, el incremento de las coordenadas de cromaticidad, según la máxima temperatura de disipación alcanzada en la luminaria es:

$$\Delta C_x = 0,0005 \rightarrow C_{x \text{ límite}} - C_{x \text{ inicial}} = 0,0005 \rightarrow C_{x \text{ límite}} = \mathbf{0,3405}$$

$$\Delta C_y = 0,0005 \rightarrow C_{y \text{ límite}} - C_{y \text{ inicial}} = 0,0005 \rightarrow C_{y \text{ límite}} = \mathbf{0,3505}$$

La luminaria Mini-Iridium de Philips, monta un LED LEDGINE, y su curva de evolución del incremento de las coordenadas de cromaticidad x e y con respecto a la temperatura de unión del LED, es la siguiente:

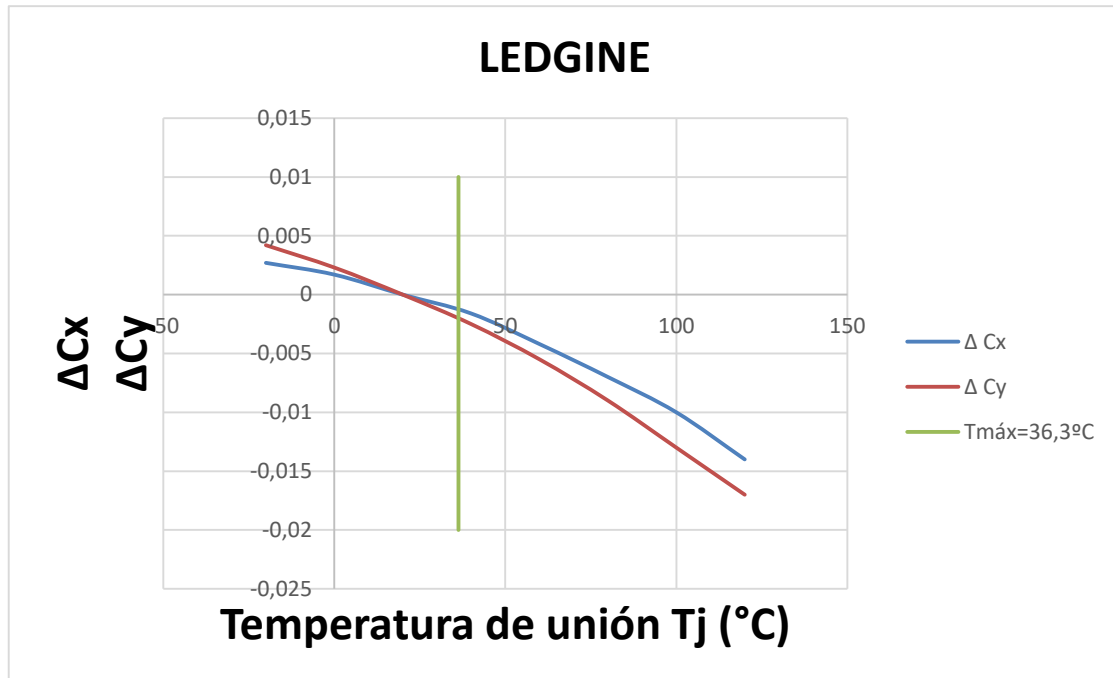


Figura 3.39 Temperatura de unión (Tj) vs cambio de coordenadas de cromaticidad lámpara Mini-Iridium.
Fuente: Elaboración propia y catálogo LEDGINE

Como se puede observar, el incremento de las coordenadas de cromaticidad, según la máxima temperatura de disipación alcanzada en la luminaria es:

$$\Delta C_x = -0,002 \rightarrow C_{x \text{ límite}} - C_{x \text{ inicial}} = -0,002 \rightarrow C_{x \text{ límite}} = \mathbf{0,408}$$

$$\Delta C_y = -0,003 \rightarrow C_{y \text{ límite}} - C_{y \text{ inicial}} = -0,003 \rightarrow C_{y \text{ límite}} = \mathbf{0,357}$$

La luminaria NaviaP, monta un LED XLamp XP-G3 White, de la marca CREE y su curva de evolución del incremento de las coordenadas de cromaticidad x e y con respecto a la temperatura de unión del LED, es la siguiente:

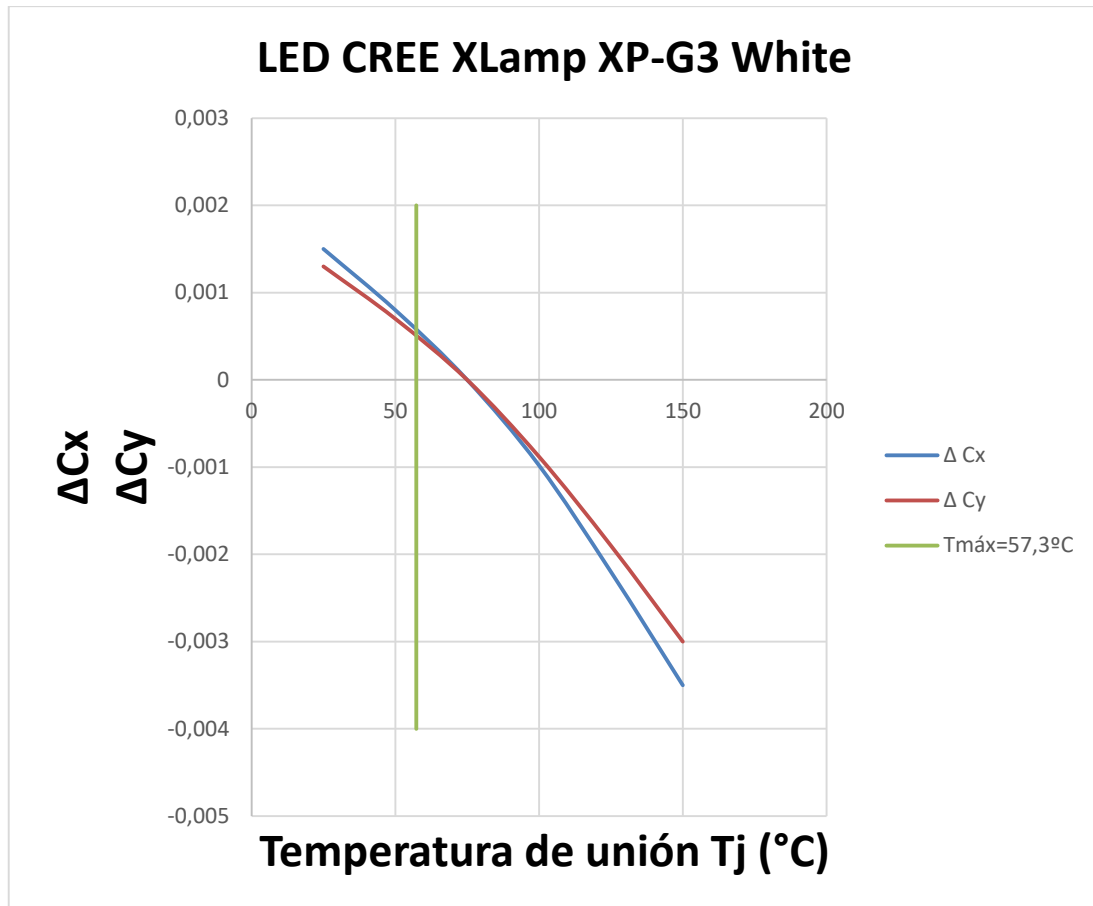


Figura 3.40 Temperatura de unión (Tj) vs cambio de coordenadas de cromaticidad lámpara NaviaP.
Fuente: Elaboración propia y catálogo CREE

Como se puede observar, el incremento de las coordenadas de cromaticidad, según la máxima temperatura de disipación alcanzada en la luminaria es:

$$\Delta C_x = 0,0005 \rightarrow C_{x \text{ límite}} - C_{x \text{ inicial}} = 0,0005 \rightarrow C_{x \text{ límite}} = \mathbf{0,3905}$$

$$\Delta C_y = 0,0005 \rightarrow C_{y \text{ límite}} - C_{y \text{ inicial}} = 0,0005 \rightarrow C_{y \text{ límite}} = \mathbf{0,3805}$$

La luminaria ATP Aire 7, monta un LED CQAR Street White, de la marca LUW y su curva de evolución del incremento de las coordenadas de cromaticidad x e y con respecto a la temperatura de unión del LED, es la siguiente:

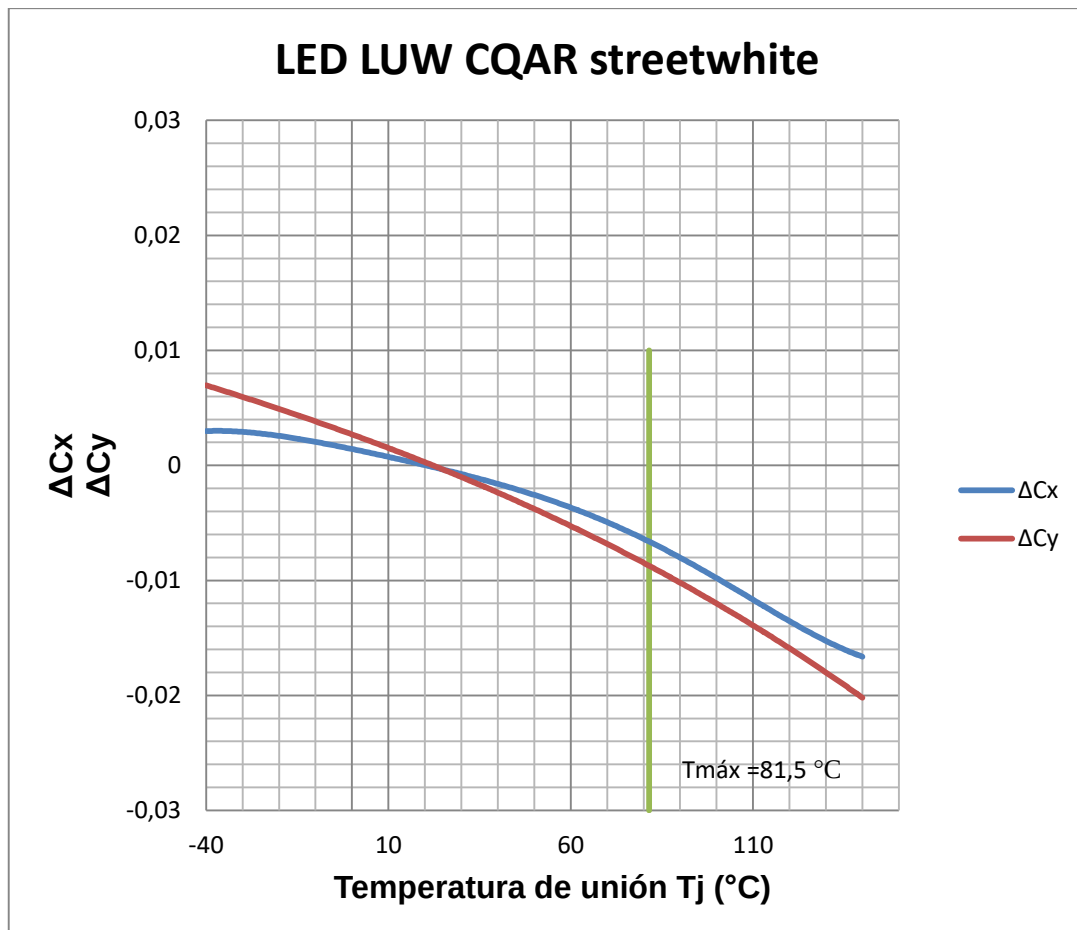


Figura 3.41 Temperatura de unión (Tj) vs cambio de coordenadas de cromaticidad lámpara ATP Aire 7.
Fuente: Elaboración propia y catálogo LUW

Como se puede observar, el incremento de las coordenadas de cromaticidad, según la máxima temperatura de disipación alcanzada en la luminaria es:

$$\Delta C_x = -0,0055 \rightarrow C_{x \text{ límite}} - C_{x \text{ inicial}} = -0,0055 \rightarrow C_{x \text{ límite}} = 0,3645$$

$$\Delta C_y = -0,009 \rightarrow C_{y \text{ límite}} - C_{y \text{ inicial}} = -0,009 \rightarrow C_{y \text{ límite}} = 0,351$$

En las anteriores gráficas se puede observar como importantes parámetros del LED, como las coordenadas de cromaticidad, varían con la temperatura de unión que viene recogidos en la hoja de características proporcionada por el fabricante.

Alterando la temperatura de unión del LED la variación de las coordenadas de cromaticidad están presentes, donde la calidad de color de la luz empeora. Para cuantificar como la calidad del color de la luz empeora, realizaremos una tabla comparativa, entre todas las luminarias LED, de la evolución de sus coordenadas de cromaticidad debido al efecto de la temperatura.

Comparación	x	y	x límite	y límite	ΔCx	ΔCy
Luminaria LED 60W Jaén	0,35	0,37	0,3513	0,371	0,0013	0,001
Luminaria LED 80W Jaén	0,34	0,35	0,3405	0,3505	0,0005	0,001
Luminaria LED Philips	0,41	0,36	0,408	0,357	-0,0020	-0,003
Luminaria LED NaviaP	0,39	0,38	0,3905	0,3805	0,0005	0,001
Luminaria LED ATP	0,37	0,36	0,3645	0,351	-0,0055	-0,009

Tabla 3.29 Comparación de coordenadas de cromaticidad debido al efecto de la temperatura máxima.
Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 3.29, las luminarias GL1A, T1A y NaviaP sufren un deterioro de las propiedades lumínicas (coordenadas de cromaticidad) debido a la temperatura máxima de disipación, sin embargo, también se ve como las luminarias LED de Philips y la ATP Aire 7, son menos vulnerables a los efectos de las altas temperaturas de disipación térmica y prácticamente mantienen constantes sus coordenadas de cromaticidad.

Además se observa en la tabla como la luminaria GL1A, es la que tiene mayor velocidad de deterioro de sus propiedades lumínicas, debido al mayor valor de sus coordenadas límite con respecto a las demás.

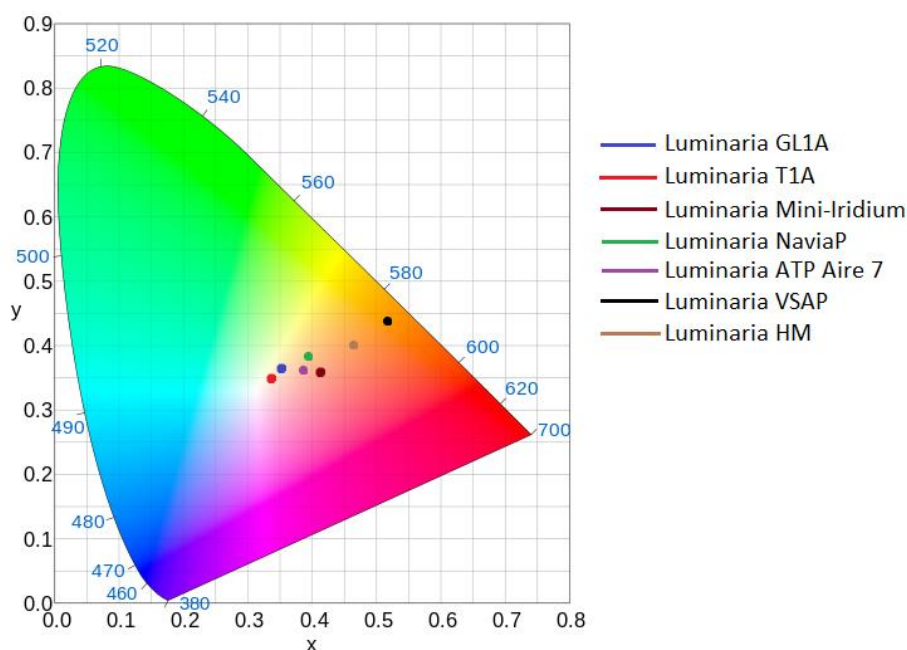


Figura 3.42 Coordenadas Cx, Cy en las luminarias, condición límite de funcionamiento. Fuente: Elaboración propia

En lo que a las luminarias de descarga se refiere, la temperatura máxima de disipación no afecta a las coordenadas de cromaticidad de la lámpara, por el hecho de que implementa una tecnología de descarga y no existen temperaturas de unión como en el caso de la tecnología LED.

La comparativa que puede llevarse a cabo con respecto a estas lámparas es la evolución del flujo luminoso, en función de las horas de funcionamiento de cada luminaria, datos aportados por el fabricante.

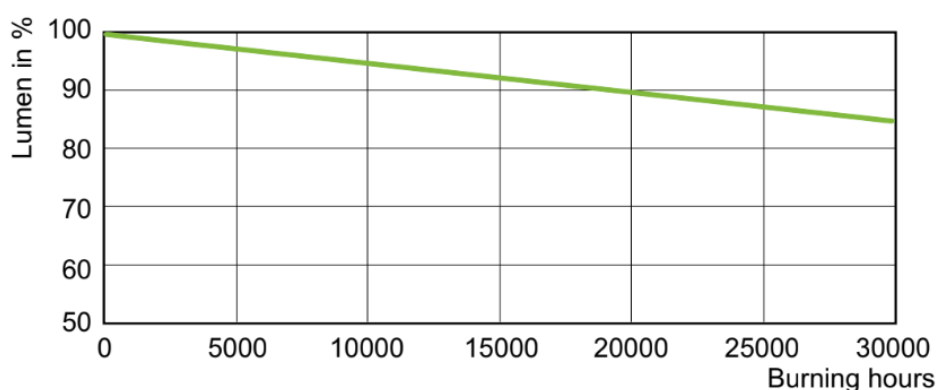


Figura 3.43 Flujo luminoso vs horas de funcionamiento luminaria VSAP. Fuente: Catálogo de Philips

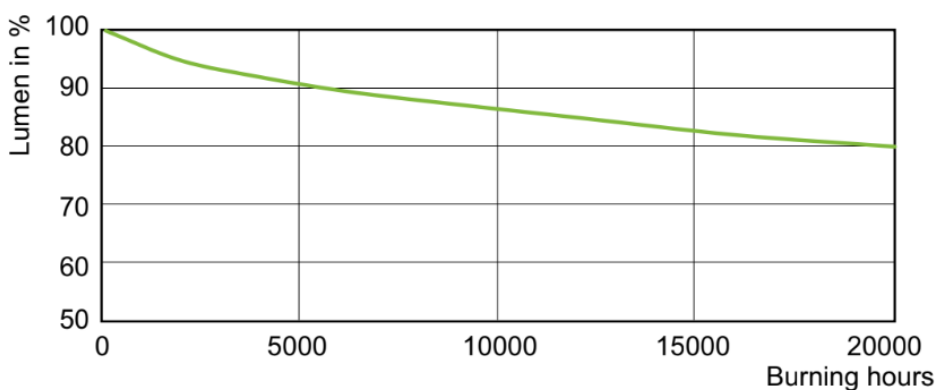


Figura 3.44 Flujo luminoso vs horas de funcionamiento luminaria HM. Fuente: Catálogo de Philips

Realizando una comparativa de eficiencia lumínica con respecto a las horas de funcionamiento, en las figuras 3.43 y 3.44 se observa como la luminaria VSAP es más eficiente debido a que el flujo luminoso se disminuye en un 10% a las 20.000h de funcionamiento frente al 20% que se reduce la luminaria de HM en el mismo tiempo.

Se observa además también como la pendiente de la curva de flujo luminoso frente a horas de funcionamiento de la lámpara de HM es más pronunciada con respecto a la de VSAP, dato que reafirma el hecho anterior.

Para las luminarias que montan tecnología LED, también existe una disminución del flujo luminoso, pero a diferencia de lo que ocurría en la tecnología de descarga que esta disminución venía provocada por las horas de funcionamiento de la luminaria, en las lámparas LED, dicha disminución del flujo viene provocada por la temperatura de unión, al igual que ocurría con las coordenadas de cromaticidad.

Para la luminaria GL1A, que monta un LED LUXEON T de la marca LUMILED, la curva de evolución del flujo luminoso con respecto a la temperatura de unión del LED, es la siguiente:

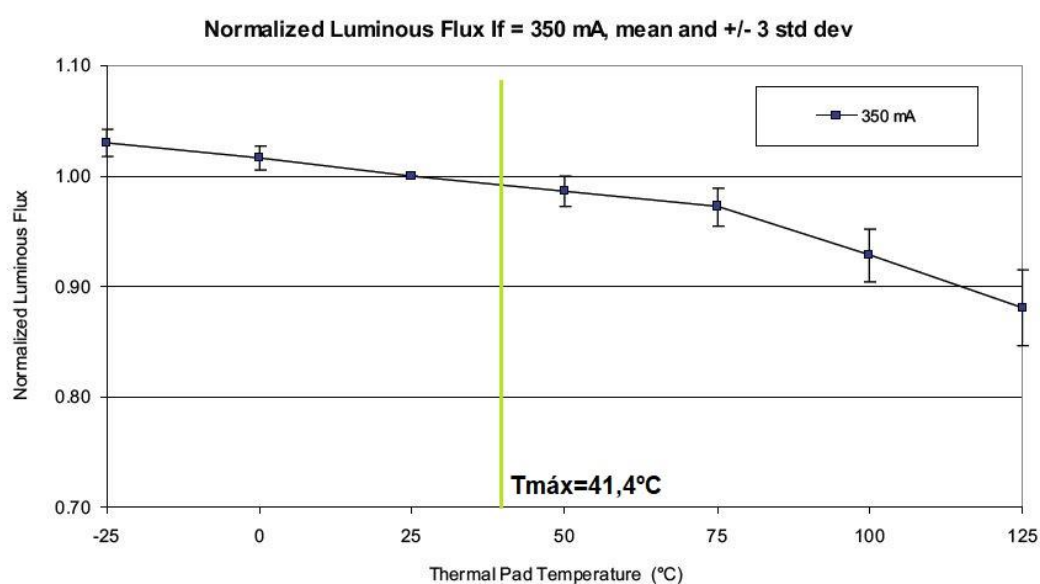


Figura 3.45 Temperatura de unión (T_j) vs flujo luminoso relativo lámpara GL1A. Fuente: Catálogo LUMILED

Se puede observar en la imagen 3.45 como trabajando la luminaria en régimen permanente, cuando alcanza los $41,4^\circ\text{C}$, se produce una disminución de aproximadamente un 5% del flujo luminoso.

La luminaria T1A, también monta un LED LUXEON T de la marca LUMILED, y su curva de evolución del flujo luminoso con respecto a la temperatura de unión del LED, es la siguiente:

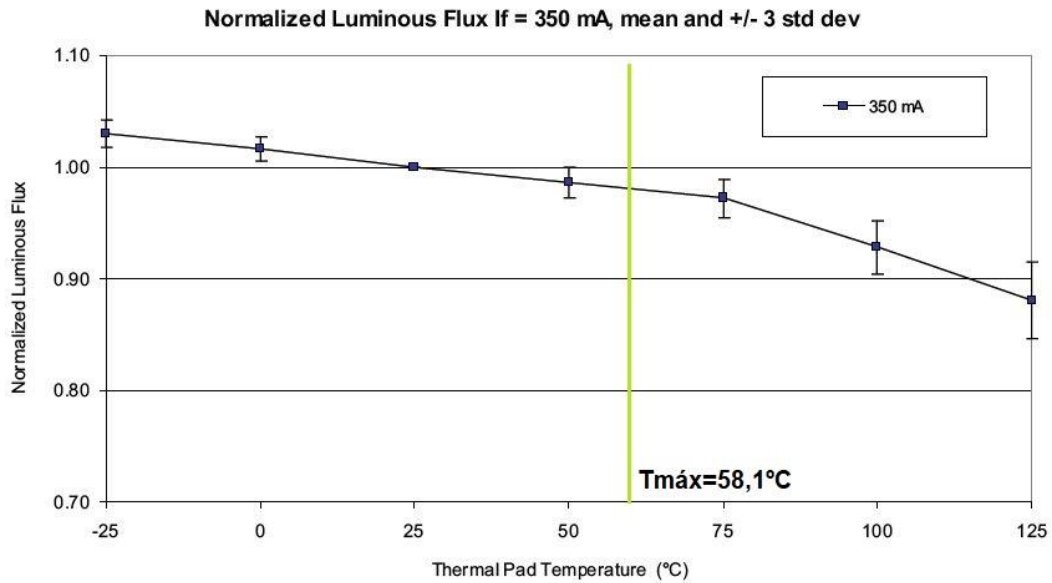


Figura 3.46 Temperatura de unión (Tj) vs flujo luminoso relativo lámpara T1A. Fuente: Catálogo LUMILED

Como se puede observar en la presente gráfica, aunque la luminaria T1A monte el mismo LED que la G1A, al ser su régimen permanente a una temperatura más alta (58,1°C), se produce una mayor reducción del flujo luminoso, que aproximadamente será de un 8% en este caso

La luminaria Mini-Iridium de Philips, monta un LED LEDGINE, y su curva de evolución del flujo luminoso con respecto a la temperatura de unión del LED, es la siguiente:

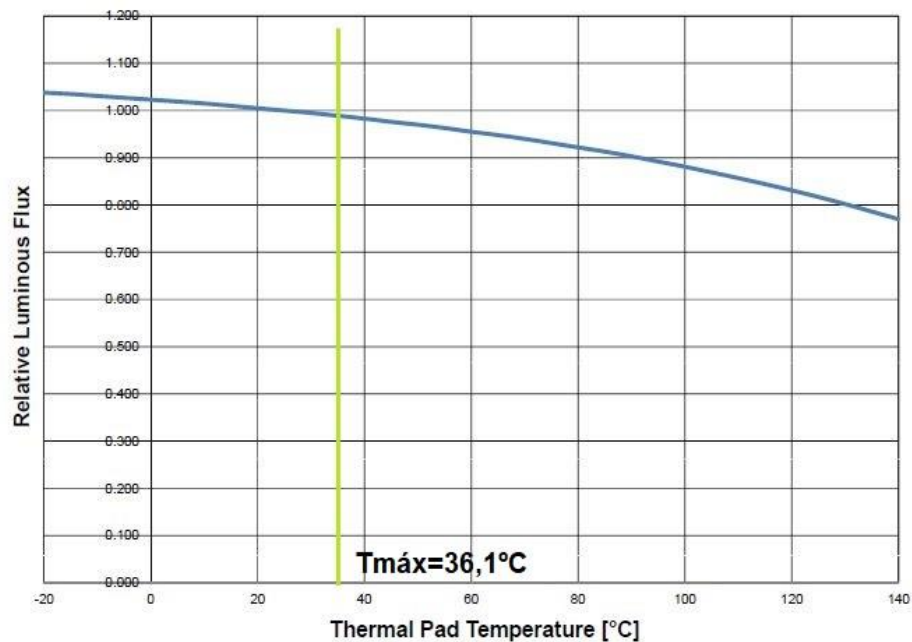


Figura 3.47 Temperatura de unión (Tj) vs flujo luminoso relativo lámpara Mini-Iridium. Fuente: Catálogo LEDGINE

Se puede observar en la imagen 3.47 como trabajando la luminaria en régimen permanente, cuando alcanza los 36,1°C, se produce una disminución de aproximadamente un 2% del flujo luminoso.

La luminaria NaviaP, monta un LED XLamp XP-G3 White, de la marca CREE y su curva de evolución del flujo luminoso con respecto a la temperatura de unión del LED, es la siguiente:

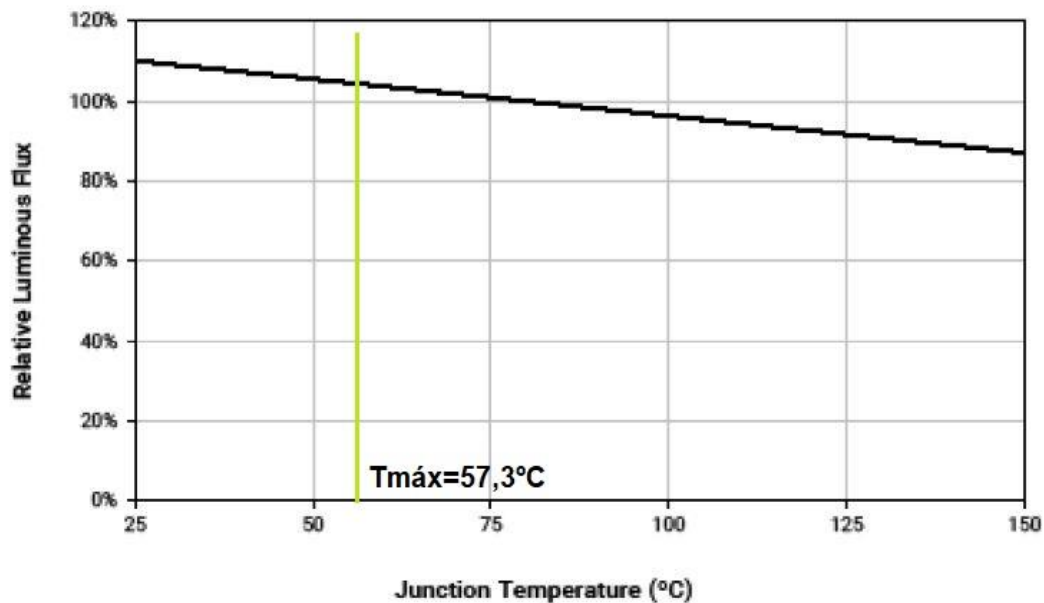


Figura 3.48 Temperatura de unión (Tj) vs flujo luminoso relativo lámpara NaviaP. Fuente: Catálogo CREE

Se puede observar en la imagen 3.48 como trabajando la luminaria en régimen permanente, cuando alcanza los 57,3°C, se produce una disminución de aproximadamente un 5% del flujo luminoso.

La luminaria ATP Aire 7, monta un LED CQAR Street White, de la marca LUW y su curva de evolución del flujo luminoso con respecto a la temperatura de unión del LED, es la siguiente:

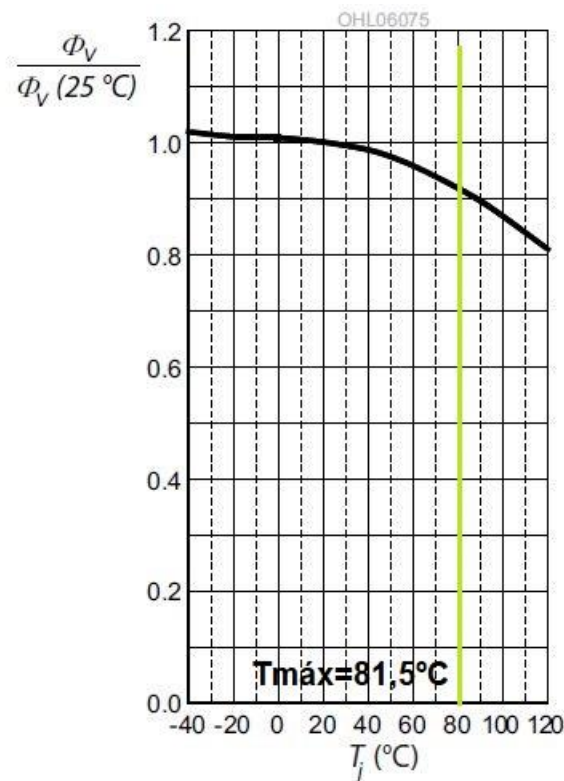


Figura 3.49 Temperatura de unión (T_j) vs flujo luminoso relativo lámpara ATP Aire 7. Fuente: Catálogo LUW

Se puede observar en la imagen 3.49 como trabajando la luminaria en régimen permanente, cuando alcanza los $81,5^\circ\text{C}$, se produce una disminución de aproximadamente un 10% del flujo luminoso.

Comparando estos cinco resultados entre sí, y las curvas de evolución del flujo luminoso con respecto a la temperatura de unión del LED, nos permite afirmar que la luminaria más sensible a la reducción del flujo luminoso es la ATP Aire 7, debido que en su régimen de funcionamiento permanente, posee un mayor porcentaje de disminución.

5. CONCLUSIONES

5.1 Resultados eléctricos

La finalidad del estudio eléctrico es detectar posibles efectos adversos de tipo eléctrico durante el funcionamiento nominal que pueden ocurrir tanto arranque en frío como arranque en caliente que puedan afectar tanto a las luminarias como a los elementos de protección y control que conforman el sistema de alumbrado público (cuadros de protección y encendido, tendido eléctrico, etc.)

El estudio se dividió, como se ha explicado en anteriores apartados, en dos: arranque en frío y arranque en caliente; y dentro de esos dos apartados se han estudiado dos parámetros eléctricos para detectar y subsanar los efectos adversos: corriente de pico en el arranque y emisión de armónicos a la red.

El inconveniente que se presenta con el cambio a luminarias de menor consumo como las LED es el aumento del THD de corriente [23] , [24] y de las altas corrientes de pico en al arranque [7]

El arranque en frío para los LED multiplica peligrosamente la corriente nominal. La causa podría estar en que los condensadores de los driver se encuentren cargados o descargados dependiendo del instante de arranque. El problema se evidencia y se acentúa aún más si suponemos un caso real de un circuito de encendido compuesto por ejemplo de 100 luminarias LED. Si se arrancan a la vez todas ellas, se corre el peligro de que salten automáticamente las protecciones contra sobre-corrientes e impidan un encendido normal del sistema.

Se proponen dos soluciones para el arranque en frío de las luminarias LED, una de ellas muy barata ya que apenas repercute en términos económicos y otra más cara ya que supone una evolución tecnológica del driver: la primera solución y la más barata para solucionar este problema es arrancar de forma sincronizada los distintos circuitos del cuadro eléctrico con el fin no sobrepasar la corriente máxima que aguantan los magnetotérmicos, y la segunda solución y la más cara consiste en diseñar un circuito de arranque progresivo en los drivers de las luminarias de forma que empiece encendiendo un 30% de la potencia nominal de la lámpara y se vaya

subiendo progresivamente la potencia hasta alcanzar el 100% de la potencia nominal de la luminaria en cuestión.

Otro de los casos más desfavorables también se produce suponiendo que en el arranque en frío, todas las luminarias arranquen con la corriente mínima de pico calculadas anteriormente, en ese caso no habría un cuadro eléctrico capaz de soportar tan alto valor del factor pico de corriente y provocaría una cadena de desconexiones, lo cual impediría el encendido normal del circuito.

Analizando por último el arranque en caliente, la situación más peligrosa se da cuando las luminarias arrancan con una corriente máxima de pico, ya que el factor multiplicador de corriente es muy alto. Este caso es muy usual pues se produce por diversos factores como rayo, caída de tensión en red, etc. Se produce una desconexión y los cuadros con dispositivos rearmables volverían a conectar y ahora el peligro es que aparezcan estas corrientes de pico máximas en caliente, pues podrían provocar una segunda desconexión o una cadena viciosa de desconexiones que impedirían un encendido normal, luego las soluciones aplicables, como hemos explicado anteriormente son el arranque sectorizado de cada uno de los circuitos o instalar un driver programable en cada una de las luminarias para subsanar estos problemas.

Con respecto a la distorsión armónica, de los resultados del presente estudio se puede extraer como conclusión que la emisión armónica de las lámparas LED será mayor que de las lámparas incandescentes [25] [26] [27], que dibujan una corriente cercana a sinusoidal cuando es alimentado por una forma de onda de voltaje sinusoidal, además se ha podido comprobar también como en cada una de las luminarias se produce prácticamente la misma distorsión armónica tanto en arranque en frío como en arranque en caliente, lo cual nos permite afirmar que la generación armónica es independiente del tipo de arranque al que esté sometido la luminaria y dependiente de su driver electrónico.

Como bien es conocido, la alta generación de armónicos es peligrosa para los componentes que componen el sistema, ya que se pueden producir calentamiento en los conductores. Para solucionar este problema se propone un driver capaz de filtrar

los armónicos más altos en las frecuencias en los que aparezcan presentando como inconveniente el aumento del precio de la luminaria.

5.2 Resultados térmicos/lumínicos

Este estudio está enfocado en el análisis térmico para realizar la verificación de los materiales de las luminarias y comprobar que la temperatura de los LED no es demasiado alta para el buen funcionamiento de estos diodos emisores de luz, provocando una variación de las propiedades lumínicas de los LED. Todos los dispositivos electrónicos y los circuitos generan un exceso de calor y requieren una mayor atención para evitar fallos prematuros. Los LED convierten el 15% de la energía aplicada en luz y el 85% restante en calor, este calor debe ser disipado para que la durabilidad y propiedades de los LED no se vean afectadas por el incremento de temperatura [10] .

En este estudio, se han adquirido datos experimentales de 5 luminarias LED y 2 luminarias de descarga de distintas potencias en las condiciones del laboratorio de iluminación y domótica, con la cámara térmica FLUKE Ti 25, se indica que efectivamente el diseño es importante debido a la disipación de calor de las luminarias para el efectivo funcionamiento de los dispositivos electrónicos.

En el momento de favorecer la disipación de calor, el disipador es el componente más importante para reducir la temperatura de unión. La mayoría de los disipadores son diseñados con aletas para aumentar su superficie de contacto con el aire y disipar mayor cantidad de calor [28] . Será necesario mejorar el diseño de los componentes de la luminaria para facilitar la disipación de calor y favorecer el paso del aire a través del disipador de las luminarias para disminuir la temperatura de los dispositivos electrónicos. Para mejorar la refrigeración se pueden incorporar ventilaciones para mejorar el flujo del aire del interior y que pueda ir hacia el exterior.

Un problema importante con las luminarias LED de alta potencia es el calor que se genera en el interior. La distribución de los LED y el efecto del número de LED encendidos afectan a la temperatura de unión y participa fuertemente en la degradación del LED [22] . La mayoría de luminarias contienen disipadores de aluminio como una solución. Actualmente se está investigando materiales con nuevas aleaciones y formulaciones para una efectiva disipación térmica, por ejemplo, se ha

desarrollado nitrato de aluminio para aplicarlo como una fina capa en los disipadores que tiene ciertas ventajas sobre los convencionales dieléctricos basados en polímeros o substratos cerámicos tales como una excelente disipación térmica y una baja resistencia térmica [29] . El tema de la disipación térmica está a la orden del día, se están investigando materiales para ser utilizados como disipadores de calor que fomentan una mayor durabilidad de los LED debido a una mejora de la disipación térmica [30] .

Debido a lo cual, hay que tener en cuenta que las luminarias de alumbrado público de descarga y donde son sustituidas por tecnología LED, dejando la carcasa de las luminarias previamente instaladas, acaba afectando a los dispositivos electrónicos si no hay buena disipación térmica. Como se ha comentado previamente en este apartado, la utilización de ventilaciones ya sean naturales o forzadas favorecería a la disipación de calor de los componentes electrónicos.

Los dispositivos electrónicos se ven afectados por las altas temperaturas. Una temperatura de unión de los LED elevada varía la cromaticidad y disminuye el flujo lumínico, reduciendo las propiedades lumínicas, siendo la luminaria ATP Aire 7 a la que más le afecta la alta temperatura, en lo que al flujo luminoso se refiere ya que se reduce un 10% en la situación de régimen permanente y la luminaria GL1A a la que más le afecta las grandes temperaturas, en lo que a variación de coordenadas de cromaticidad se refiere, ya que es la que mayor valor de variación de éstas presenta.

Un buen diseño de la luminaria donde se favorezca la circulación de aire para el beneficio de la disipación de la temperatura de unión de los LED favorecerá a la vida útil y mejora la eficiencia y confiabilidad de los LED teniendo mejores propiedades lumínicas. Aparte del diseño, una buena selección de materiales de los componentes de la luminaria donde la conductividad térmica sea elevada favorece a la disipación térmica de la luminaria.

Para resumir, se ha demostrado que la potencia de entrada es el calor que la luminaria genera y dependiendo del diseño y la elección de los materiales de las mismas, la temperatura de unión de los LED es más elevada por la poca disipación de calor que se produce en ellas, siendo perjudicial para el buen funcionamiento de los LED. La elección de un LED, el cual tiene una temperatura de unión más baja de

la que se puede alcanzar en la luminaria, podría disminuir sus propiedades hasta un 100%, convirtiéndose este LED en inservible para lo que corresponde a su funcionamiento.

Bibliografía

[1] Manual de Iluminación INDAL

[2] Cheng-Hung Huang; Guan-Jie Wang. A design problem to estimate the optimal fin shape of LED lighting heat sinks. *International journal of heat and mass transfer*. 2017, 1205-1217. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.101

[3] Cheng, HH; Huang, DS; Lin, MT. Heat dissipation design and analysis of high power LED array using the finite element method. *Microelectronics reliability*. 2012, 5, 905-911. DOI: 10.1016/j.microrel.2011.05.009

[4] Daeseok Jang; Se-Jin Yook; Kwan-Soo Lee. Optimum design of a radial heat sink with a fin-height profile for high-power LED lighting applications. *Applied energy*. 2014, 260-268. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.11.063

[5] Hermoso-Orzáez, MJ; Rojas-Sola, JI; Gago Calderón, A. Electrical consequences of large-scale replacement of metal halide by LED luminaires. *Lighting research and technology*. 2018, 2, 282-293. DOI: 10.1177/1477153516645647

[6] Aurora Gil de Castro; Sarah K.Ronnberg; Math H.J. Bollen. Light intensity variation (flicker) and harmonic emission related to LED lamps. *Electric power systems research*. 2017, 107-114. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.01.026

[7] Markiewicz P; Sikora R; Pabjanczyk W; Statistical analysis of peak inrush current: a case study. *Compel-the international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*.2018, 3, 1069-1084. DOI: 10.1108/Compel-07-2017-0312

[8] Joaquín Garrido; Antonio Moreno Muñoz; Aurora Gil de Castro; Víctor Pallares López; Tomás Morales Leal. Supraharmonics emission from LED lamps: A reduction proposal based on random pulse-width modulation. *Electric power systems research*. 2018, 11-19. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.07.032

[9] Thuy Ong. The unfortunate side effect of LED lighting. *The Verge*. 2017.

[10] Piyush Verma; Nitish Patel; Nirmal-Kumar C. Nair. Light-Emitting Diode Electronics, Harmonic Issues, and Augmenting Standards. *IEEE Consumer Electronics Magazine*. 2017, 4,150-156. DOI: 10.1109/MCE.2017.2714280

[11] Hermoso Orzáez, MJ; Gago Calderón, A; Rojas-Sola, JI. Power Quality and Energy Efficiency in the Pre-Evaluation of an Outdoor Lightning Renewal with Light-Emitting Diode Technology: Experimental Study and Amortization Analysis. *Energies*. 2017, 7. DOI: 10.3390/en10070836

[12] Wu, CN; Chen, YL; Chen YM. Primary-Side Peak Current Measurement Strategy for High-Precision Constant Output Current Control. *IEE Transactions on power electronics*. 2015, 2, 967-975. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2312955

[13] Gil-de-Castro, A.; Moreno-Muñoz, A.; Larsson, A.; de la Rosa, J.J.G.; Bollen, M.H.J. LED Street lighting: A power quality comparison among street light technologies. *Lighting Research and Technology*. 2013, 6, 710–728. DOI: 10.1177/1477153512450866

- [14] Verma, P; Patel, N; Nair, NKC. Light-Emitting Diode Electronics, Harmonic Issues, and Augmenting Standards. *IEEE Consumer Electronics Magazine*. 2017, 6, 150-156. DOI: 10.1109/MCE.2017.2714280
- [15] Yoomak, S; Jettanasen, C; Ngaopitakkul, A; Bunjongjit, S; Leelajindakrairerk, M. Comparative study of lighting quality and power quality for LED and HPS luminaires in a roadway lighting system. *Energy and Buildings*. 2018, 159, 542-557. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.11.060
- [16] Huang, CH; Wang, GJ. A design problem to estimate the optimal fin shape of LED lighting heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, 106, 1205-1217. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.101
- [17] Jang, H; Lee, JH; Byon, C; Lee, BJ. Innovative analytic and experimental methods for thermal management of SMD-type LED chips. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, 124, 36-45. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.055
- [18] Manual de uso. Cámara Termográfica Ti25 FLUKE
- [19] Chen HY, Chen CC. Determining the emissivity and temperature of building materials by infrared thermometer. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*. 126 (2016) 130 – 137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.027.
- [20] When CD, Chai TY. Experimental investigation of emissivity of aluminum alloys and application of multispectral radiation thermometry. *APPLIED THERMAL ENGINEERING*. 31 (14 – 15) (2011) 2414 – 2421. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.04.005.
- [21] Emissivity Coefficients Materials. The Engineering Toolbox.
- [22] Ben Abdelmlek K, Araoud Z, Ghay R, Abderrazak K, Charrada K, Zissis G. Effect of thermal conduction path deficiency on thermal properties of LED package. *APPLIED THERMAL ENGINEERING*. 102(2016) 251- 260t. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.100.
- [23] I. Mohd, C. Noor, S. Abdul, K. Amith, I. Atif and A.-R. Haitham. Power Quality Effect of Using Incandescent, Fluorescent, CFL and LED Lamps on Utility Grid. *IEEE Firts Workshop on SmartGrid and Renewable Energy (SGRE)* vol. I, pp. 1-5, 2015.
- [24] R.-D. Pentiuc, C.-D. Popa, A. Dascalu and P. Atanosoae, The Influence of LED Street Lighting Upon Power Quality in Electrical Networks, *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, pp. 1092-1098, 2014.
- [25] A.M. Blanco, R. Stiegler, J. Meyer. Power quality disturbances caused by modern lighting equipment (CFL and LED), *2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech*, POWERTECH 2013 (2013).
- [26] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, M.A. Hannan. An analysis of harmonics from LED lamps, *cccc2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, APEMC 2012—Proceedings* (2012) 837–840.
- [27] M.M.U. Rehman, H. Shabbir, S.A. Rehman, S.K. Sheikh, N. Zaffar. A comparative analysis of electrical and photo characteristics of LED lights, *Proceedings—10th International Conference on Frontiers of Information Technology, FIT 2012* (2012) 219–224.

- [28] Karatekin C, Kokkaya O. Comparative analysis of different cooling fin types for countering LED luminaires heat problems. *TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCES*. 26 (1) (2018) 454 – 466. DOI: 10.3906/elk-1602-121.
- [29] Hahn BD, Kim Y, Choi JJ, Ryu JH, Kim JW, Yoon WH, Park DS, Yoon SY, Ma BJ. Fabrication and characterization of aluminum nitride thick film coated on aluminum substrate for heat dissipation. *CERAMICS INTERNATIONAL*. 42 (16) (2016) 18141 – 18147. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.08.128.
- [30] Cho EC, Huang JH, Li CP, Chang-Jian CW, Lee KC, Hsiao YS, Huang JH. Graphene-based thermoplastic composites and their application for LED thermal management. *CARBON*. 102 (2016) 66 – 73. DOI: 10.1016/j.carbon.2016.01.097.

ANEXOS

Anexo 1

Medidas de campo para el cálculo de variables estadísticas del estudio de resultados eléctricos

En este anexo se mostrarán los datos de medidas eléctricas en cada uno de los intervalos y diferentes días de medida en las que nos hemos basado para calcular las variables estadísticas del estudio de resultados eléctricos, apartado 3.1 del presente trabajo.

DÍA 1

Arranque en frío Intervalo 0-5 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	3,7	236,3	0,1	50	2,2	10,8	0,05	0,02	0,05	0,94
Luminaria LED 80W Jaén	4,2	236,8	0,3	49,97	2,3	7,8	0,07	0,02	0,07	0,95
Luminaria LED Philips	0,3	236,2	0,1	49,98	2,6	16,9	0,02	0,01	0,02	0,82
Luminaria LED NaviaP	2,4	233,9	0,2	49,98	2	12,9	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	5,9	237	0,8	50	2,2	6,3	0,19	0,05	0,2	0,97
Luminaria descarga VSAP	6,5	235,1	1,4	49,99	2,1	33,3	0,3	0,02	0,3	1
Luminaria descarga HM	5,8	236,5	0,5	49,98	2,1	10,2	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.1 Datos eléctricos día 1 de medición, intervalo 0-5 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 5-10 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2	235,8	0,2	49,99	2,2	10,9	0,05	0,02	0,05	0,94
Luminaria LED 80W Jaén	2,2	236,4	0,3	50	2,3	7,8	0,07	0,02	0,07	0,95
Luminaria LED Philips	0,2	236,2	0,1	50	2,4	15,3	0,02	0,01	0,02	0,82
Luminaria LED NaviaP	2,8	233,8	0,2	49,99	2,2	13	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	4,6	236,7	0,8	50,01	2,2	6,2	0,19	0,05	0,2	0,97
Luminaria descarga VSAP	7,7	236,5	1,4	50	2,5	36,7	0,3	0,01	0,3	1
Luminaria descarga HM	4,4	235,5	0,5	49,98	2,1	10,1	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.2 Datos eléctricos día 1 de medición, intervalo 5-10 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 10-15 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,2	235,8	0,2	50	2,3	11,1	0,05	0,02	0,05	0,94
Luminaria LED 80W Jaén	2,5	236,2	0,3	50,01	2,4	7,8	0,07	0,02	0,07	0,95
Luminaria LED Philips	0,3	236,6	0,1	50,01	2,5	15,7	0,02	0,01	0,02	0,82
Luminaria LED NaviaP	4,2	236,9	0,2	49,96	2,1	13,5	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	3,1	236,4	0,8	49,99	2	6,1	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	5,7	238,2	1,3	50	2,3	35,2	0,29	0	0,29	1
Luminaria descarga HM	5,8	235,4	0,5	49,98	2,3	10,1	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.3 Datos eléctricos día 1 de medición, intervalo 10-15 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 15-30 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	3,4	235,1	0,3	49,99	2,2	11,1	0,05	0,02	0,05	0,94
Luminaria LED 80W Jaén	2,2	236,5	0,3	49,96	2,4	7,8	0,07	0,02	0,07	0,95
Luminaria LED Philips	0,3	236,6	0,1	50,01	2,3	16,2	0,02	0,01	0,02	0,83
Luminaria LED NaviaP	4,3	236,3	0,2	49,99	2,1	13,7	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	6,5	236,6	0,8	49,98	2,2	6,3	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	6,5	234,6	1,4	50	2,6	39	0,29	0	0,29	1
Luminaria descarga HM	5,6	234,6	0,5	49,99	2,2	10	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.4 Datos eléctricos día 1 de medición, intervalo 15-30 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 30-45 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	4,2	235,4	0,2	50,01	2,4	11,2	0,05	0,02	0,05	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	2,2	236,9	0,3	49,98	2,1	7,8	0,07	0,02	0,07	0,95
Luminaria LED Philips	0,3	236,8	0,1	49,99	2,2	16,6	0,02	0,01	0,02	0,84
Luminaria LED NaviaP	2	236,8	0,2	49,97	2,3	13,6	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	7,7	236,9	0,8	49,97	2,1	6,4	0,19	0,05	0,19	0,97
Luminaria descarga VSAP	7,4	235,7	1,3	50,01	2,5	36,9	0,3	0,01	0,3	1
Luminaria descarga HM	5,9	235,6	0,5	49,99	2,1	10,4	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.5 Datos eléctricos día 1 de medición, intervalo 30-45 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 45-60 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,1	235,8	0,2	49,99	2,3	11,2	0,05	0,02	0,05	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	2,5	236,6	0,3	49,98	2,2	7,8	0,07	0,02	0,07	0,95
Luminaria LED Philips	0,3	236,9	0,1	50	2,2	17,4	0,02	0,01	0,02	0,84
Luminaria LED NaviaP	3,6	236,4	0,2	49,99	2,1	13,8	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	6,1	237	0,8	49,98	2	6,5	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	6,1	235,3	1,4	49,97	2,6	37,9	0,29	0	0,29	1
Luminaria descarga HM	6	235,4	0,5	49,99	2,2	10,4	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.6 Datos eléctricos día 1 de medición, intervalo 45-60 min. Fuente: Elaboración propia

DÍA 2

Arranque en frío Intervalo 0-5 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVar)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,2	233,8	0,3	49,99	1,9	11	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	2,7	236,7	0,3	49,98	2	8,2	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	235,7	0,1	49,97	2	14,1	0,02	0,01	0,02	0,79
Luminaria LED NaviaP	3,8	236,2	0,2	49,98	1,9	13,7	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	3,3	236	0,8	49,96	2	6,1	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	7,3	237	1,5	50,01	1,9	30	0,3	0,01	0,3	1
Luminaria descarga HM	4,1	234	0,5	49,98	2	10,3	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.7 Datos eléctricos día 2 de medición, intervalo 0-5 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 5-10 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVar)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	3,9	233,5	0,3	49,99	1,9	10,9	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	3,5	237,2	0,3	49,98	2,1	8,3	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	235,3	0,1	49,98	1,9	14,5	0,02	0,01	0,02	0,8
Luminaria LED NaviaP	1,9	236,2	0,2	49,96	2	14,2	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	6,4	235,7	0,8	49,99	1,9	6,3	0,19	0,05	0,2	0,97
Luminaria descarga VSAP	6,8	236,4	1,4	49,97	1,8	30,7	0,3	0	0,3	1
Luminaria descarga HM	5,8	237,1	0,5	50	2	10,3	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.8 Datos eléctricos día 2 de medición, intervalo 5-10 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 10-15 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,1	236,2	0,3	50	2,1	11,3	0,05	0,02	0,06	0,92
Luminaria LED 80W Jaén	2,2	237,4	0,3	49,99	2,1	8,1	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	234,4	0,1	49,97	1,9	14,7	0,02	0,01	0,02	0,8
Luminaria LED NaviaP	3,9	236,7	0,2	49,95	1,9	14,3	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	8	236,3	0,8	50	2	6,4	0,19	0,05	0,19	0,97
Luminaria descarga VSAP	4,3	236,8	1,4	49,99	1,8	30,3	0,3	0,02	0,3	1
Luminaria descarga HM	5,7	236,6	0,5	49,98	1,9	10,4	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.9 Datos eléctricos día 2 de medición, intervalo 10-15 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 15-30 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,6	235,8	0,3	49,99	2	11	0,05	0,02	0,06	0,92
Luminaria LED 80W Jaén	4	238	0,3	49,99	1,9	8,5	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	234,7	0,1	50	1,9	14,7	0,02	0,01	0,02	0,8
Luminaria LED NaviaP	1,7	236,6	0,2	49,97	1,9	14,2	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	3,1	236,3	0,8	49,93	1,9	6,3	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	3,4	236,9	1,4	50	1,8	30,5	0,3	0	0,3	1
Luminaria descarga HM	5,9	236,1	0,5	50	1,7	10,3	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.10 Datos eléctricos día 2 de medición, intervalo 15-30 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 30-45 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	4	236	0,3	49,98	1,9	11,3	0,05	0,02	0,06	0,92
Luminaria LED 80W Jaén	3,8	238,6	0,3	50	1,9	8,4	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	234,6	0,1	50	1,8	14,4	0,02	0,01	0,02	0,8
Luminaria LED NaviaP	2,8	237,2	0,2	49,97	2	14,2	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	8	236,8	0,8	49,98	1,9	6,3	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	2,9	236,7	1,4	50	1,7	30	0,3	0,01	0,3	1
Luminaria descarga HM	5,9	235,9	0,5	50	1,6	10,3	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.11 Datos eléctricos día 2 de medición, intervalo 30-45 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 45-60 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,1	237,1	0,3	50	2	11,4	0,05	0,02	0,06	0,92
Luminaria LED 80W Jaén	2,2	235,3	0,3	49,98	2	8,2	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	234,4	0,1	49,98	2	14,5	0,02	0,01	0,02	0,8
Luminaria LED NaviaP	2,3	236,5	0,2	49,99	2	14,4	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	7,7	236,6	0,8	50	1,8	6,3	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	6,8	236,6	1,4	49,98	1,7	31,6	0,3	0,01	0,3	1
Luminaria descarga HM	5,9	237,3	0,5	50	1,6	10,4	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.12 Datos eléctricos día 2 de medición, intervalo 45-60 min. Fuente: Elaboración propia

DÍA 3

Arranque en frío Intervalo 0-5 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,1	234,8	0,3	50	2,1	11,4	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	3,1	234,7	0,3	50,02	2,2	8,4	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	236,2	0,1	50,02	2,3	13,9	0,02	0,01	0,02	0,78
Luminaria LED NaviaP	4,6	236,5	0,2	50	2	13,5	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	5,2	235,6	0,8	50,01	2,1	6,1	0,19	0,05	0,2	0,96
Luminaria descarga VSAP	6,3	233,9	1,4	50,01	2,3	35,5	0,3	0,02	0,3	1
Luminaria descarga HM	4,5	234,5	0,5	49,97	2,2	10,2	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.13 Datos eléctricos día 3 de medición, intervalo 0-5 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 5-10 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	3,7	234,5	0,3	49,96	2	11,2	0,05	0,02	0,06	0,92
Luminaria LED 80W Jaén	2,2	235,6	0,3	49,98	2,2	8,1	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	235,3	0,1	49,98	2,3	13,9	0,02	0,01	0,02	0,78
Luminaria LED NaviaP	3,1	236,4	0,2	49,99	2,1	13,6	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	7,8	235,6	0,8	50,02	2,1	6,1	0,19	0,05	0,2	0,97
Luminaria descarga VSAP	4	234	1,4	50	2,3	38,3	0,29	0	0,29	1
Luminaria descarga HM	5,6	235	0,5	49,99	2,1	10,3	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.14 Datos eléctricos día 3 de medición, intervalo 5-10 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 10-15 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	4,1	234,9	0,3	50,01	2,2	11,5	0,05	0,02	0,06	0,92
Luminaria LED 80W Jaén	4,1	235,3	0,3	49,99	2,3	8,5	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	235,9	0,1	50	2,2	13,3	0,02	0,01	0,02	0,78
Luminaria LED NaviaP	3,8	234,5	0,2	49,99	1,9	13,5	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	3,9	235,7	0,8	50,02	2,2	6,1	0,19	0,05	0,2	0,97
Luminaria descarga VSAP	3,6	234,2	1,4	49,94	2,4	37,1	0,29	0	0,29	1
Luminaria descarga HM	4,6	235,8	0,5	49,98	2	10,3	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.15 Datos eléctricos día 3 de medición, intervalo 10-15 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 15-30 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,3	235,2	0,3	49,99	2,2	11,6	0,05	0,02	0,06	0,92
Luminaria LED 80W Jaén	2,4	235,2	0,3	49,99	2,3	8,5	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	236	0,1	50	2,2	13,4	0,02	0,01	0,02	0,78
Luminaria LED NaviaP	4	235,1	0,2	49,97	2,1	13,9	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	3,2	235,3	0,8	49,97	2,1	6,2	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	6,7	233,5	1,3	49,98	2,4	38,5	0,29	0	0,29	1
Luminaria descarga HM	5,9	235,2	0,5	50,01	1,9	10,2	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.16 Datos eléctricos día 3 de medición, intervalo 15-30 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 30-45 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	4,3	234,7	0,3	50	2,2	11,6	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	4,7	236	0,3	50,01	2,4	8,6	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	235,9	0,1	50	2,1	13,7	0,02	0,01	0,02	0,78
Luminaria LED NaviaP	3,3	235,3	0,2	50	2,1	13,8	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	7,9	236,4	0,8	50	2,2	6,2	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	4,8	232,8	1,4	50,01	2,3	37,2	0,29	0	0,29	1
Luminaria descarga HM	5,7	237,2	0,5	50	1,9	10,3	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.17 Datos eléctricos día 3 de medición, intervalo 30-45 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 45-60 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	3,9	234,6	0,3	49,98	2,3	11,7	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	4,8	235,7	0,3	49,99	2,2	8,4	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	235,7	0,1	49,96	2,1	13,5	0,02	0,01	0,02	0,77
Luminaria LED NaviaP	2,5	233,7	0,2	49,97	2,1	13,7	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	4,2	236,8	0,8	49,99	2,1	6,3	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	6,6	233,5	1,4	49,98	2,4	38,3	0,29	0	0,29	1
Luminaria descarga HM	4,9	238	0,5	50,02	1,9	10,2	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.18 Datos eléctricos día 3 de medición, intervalo 45-60 min. Fuente: Elaboración propia

DÍA 4

Arranque en frío Intervalo 0-5 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	3,9	235,1	0,2	50,02	2,2	11	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	4,2	235,5	0,3	50	2,3	7,9	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	235,7	0,1	50,02	2,2	13,7	0,01	0,01	0,02	0,77
Luminaria LED NaviaP	4,5	237,2	0,2	49,99	2,2	13,3	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	7,7	235,8	0,8	49,95	2	6,1	0,19	0,05	0,19	0,97
Luminaria descarga VSAP	6,5	234,9	1,4	49,99	2	33,5	0,29	0	0,29	1
Luminaria descarga HM	4,2	237,2	0,5	50,01	2,1	10,2	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.19 Datos eléctricos día 4 de medición, intervalo 0-5 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 5-10 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	3,9	235,9	0,2	49,96	2,2	11	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	4,2	234,7	0,3	49,98	2,2	8,1	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	236,5	0,1	49,96	2,2	13,9	0,01	0,01	0,02	0,77
Luminaria LED NaviaP	4,5	236,8	0,2	49,98	2,2	13,5	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	7	236	0,8	49,98	2	6	0,19	0,05	0,19	0,97
Luminaria descarga VSAP	5,7	233,9	1,3	49,96	2	34,9	0,29	0,01	0,29	1
Luminaria descarga HM	5,8	233,9	0,5	49,99	2,3	9,9	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.20 Datos eléctricos día 4 de medición, intervalo 5-10 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 10-15 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,4	237	0,2	49,97	2,2	11	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	2,2	235,3	0,3	49,98	2,2	8,2	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	236,8	0,1	50	2,2	13,8	0,01	0,01	0,02	0,77
Luminaria LED NaviaP	3,2	237,9	0,2	50	2,1	13,5	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	4,1	235,1	0,8	50	2,1	6	0,19	0,05	0,19	0,97
Luminaria descarga VSAP	4,6	234,4	1,3	49,98	2	36	0,3	0	0,3	1
Luminaria descarga HM	4,3	235,8	0,5	49,96	2,1	9,9	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.21 Datos eléctricos día 4 de medición, intervalo 10-15 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 15-30 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,1	236,7	0,3	49,98	2,2	11,1	0,05	0,02	0,06	0,92
Luminaria LED 80W Jaén	2,1	235,9	0,3	49,96	2,2	8,2	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	236,5	0,1	49,97	2,1	13,6	0,01	0,01	0,02	0,77
Luminaria LED NaviaP	2,7	238,2	0,2	50,01	2,2	13,7	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	8	235,5	0,8	49,99	2	6	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	6,1	234,3	1,3	49,98	2	33,2	0,3	0	0,3	1
Luminaria descarga HM	5,8	235,6	0,5	49,99	2	9,8	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.22 Datos eléctricos día 4 de medición, intervalo 15-30 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 30-45 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	4,4	234,3	0,3	50	2,2	11,1	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	4,5	236,5	0,3	49,96	2,5	8,1	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	236,1	0,1	49,97	2	13,5	0,01	0,01	0,02	0,78
Luminaria LED NaviaP	2,9	235,4	0,2	49,97	2,2	13,6	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	7,5	236,8	0,8	49,97	2,1	6,2	0,19	0,05	0,19	0,96
Luminaria descarga VSAP	3,7	234,2	1,4	49,94	2	34,4	0,29	0,01	0,29	1
Luminaria descarga HM	5,7	235,6	0,5	49,97	2	10,1	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.23 Datos eléctricos día 4 de medición, intervalo 30-45 min. Fuente: Elaboración propia

Arranque en caliente Intervalo 45-60 min	Corriente arranque(A)	Vrms nominal (V)	Arms(A)	Hz	THD Armónicos tensión (%)	THD Armónicos corriente (%)	P(kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	cos ϕ
Luminaria LED 60W Jaén	2,6	235,2	0,3	49,97	2,1	11	0,05	0,02	0,06	0,93
Luminaria LED 80W Jaén	2,9	236,5	0,3	50	2,4	8,2	0,07	0,02	0,07	0,94
Luminaria LED Philips	0,3	236,9	0,1	49,95	2,1	13,8	0,01	0,01	0,02	0,77
Luminaria LED NaviaP	4,6	235,8	0,2	49,97	2,2	13,5	0,05	0,01	0,05	0,98
Luminaria LED ATP	5,7	236,8	0,8	49,97	2	6,2	0,19	0,05	0,19	0,97
Luminaria descarga VSAP	7,3	234,1	1,4	49,93	2	33,4	0,29	0	0,29	1
Luminaria descarga HM	5,6	234,3	0,5	50	2	10,1	0,1	0,03	0,11	0,97

Tabla A1.24 Datos eléctricos día 4 de medición, intervalo 45-60 min. Fuente: Elaboración propia

Anexo 2

Medidas de campo para el cálculo de variables estadísticas del estudio de resultados lumínicos

En este anexo se mostrarán los datos de medidas lumínicas en cada uno de los diferentes días de medida en las que nos hemos basado para calcular las variables estadísticas del estudio de resultados lumínicos, apartado 3.3 del presente trabajo.

DÍA 1

Parámetros lumínicos	x	y	u	v	u'	v'	Lv(cd/m ²)	Le(W/sr m ²)	T(K)
Luminaria LED 60W Jaén	0,3467	0,3736	0,2043	0,3301	0,2043	0,4952	16130	47,54	5008
Luminaria LED 80W Jaén	0,342	0,3537	0,2085	0,3235	0,2085	0,4853	60700	187	5115
Luminaria LED Philips	0,4072	0,3594	0,2506	0,3318	0,2506	0,4978	29050	110,8	3150
Luminaria LED NaviaP	0,3912	0,378	0,2317	0,3358	0,2317	0,5037	28870	84,51	3714
Luminaria LED ATP	0,3668	0,3585	0,2233	0,3275	0,2233	0,4912	52100	159,4	4260
Luminaria descarga VSAP	0,5162	0,441	0,2845	0,3645	0,2845	0,5467	35529	110,25	2100
Luminaria descarga HM	0,4617	0,396	0,2704	0,3479	0,2704	0,5219	35200	123,2	2541

Tabla A2.1 Parámetros lumínicos día 1 de medición. Fuente: Elaboración propia

DÍA 2

Parámetros lumínicos	x	y	u	v	u'	v'	Lv(cd/m ²)	Le(W/sr m ²)	T(K)
Luminaria LED 60W Jaén	0,3467	0,3736	0,2043	0,3301	0,2043	0,4952	16131	47,67	5008
Luminaria LED 80W Jaén	0,342	0,3538	0,2085	0,3235	0,2085	0,4853	60702	186,9	5114
Luminaria LED Philips	0,4072	0,3594	0,2506	0,3318	0,2506	0,4978	29052	109,3	3150
Luminaria LED NaviaP	0,3912	0,378	0,2317	0,3358	0,2317	0,5037	28870	84,74	3715
Luminaria LED ATP	0,3667	0,3586	0,2233	0,3275	0,2233	0,4913	52102	159,2	4261
Luminaria descarga VSAP	0,5156	0,4407	0,2841	0,3644	0,2841	0,5465	35530	109,8	2102
Luminaria descarga HM	0,4614	0,3958	0,2704	0,3479	0,2704	0,5218	35200	123,4	2543

Tabla A2.2 Parámetros lumínicos día 2 de medición. Fuente: Elaboración propia

DÍA 3

Parámetros lumínicos	x	y	u	v	u'	v'	Lv(cd/m ²)	Le(W/sr m ²)	T(K)
Luminaria LED 60W Jaén	0,3467	0,3736	0,2043	0,3301	0,2043	0,4952	16130	47,7	5008
Luminaria LED 80W Jaén	0,3421	0,3538	0,2085	0,3235	0,2085	0,4853	60701	186,9	5114
Luminaria LED Philips	0,4072	0,3594	0,2506	0,3319	0,2506	0,4978	29052	108,5	3150
Luminaria LED NaviaP	0,3912	0,378	0,2317	0,3358	0,2317	0,5037	28870	84,81	3716
Luminaria LED ATP	0,3668	0,3587	0,2233	0,3275	0,2233	0,4913	52102	159	4261
Luminaria descarga VSAP	0,5161	0,4404	0,2847	0,3643	0,2847	0,5465	35529	109,5	2100
Luminaria descarga HM	0,4614	0,3958	0,2703	0,3479	0,2703	0,5218	35201	123,2	2543

Tabla A2.3 Parámetros lumínicos día 3 de medición. Fuente: Elaboración propia

Además adjuntaremos en el presente Anexo, los gráficos de diagrama de cromaticidad xy, uv, u'v' y distribución relativa espectral de cada una de las luminarias, igual que hicimos en el apartado de resultados lumínicos con la luminaria GL1A

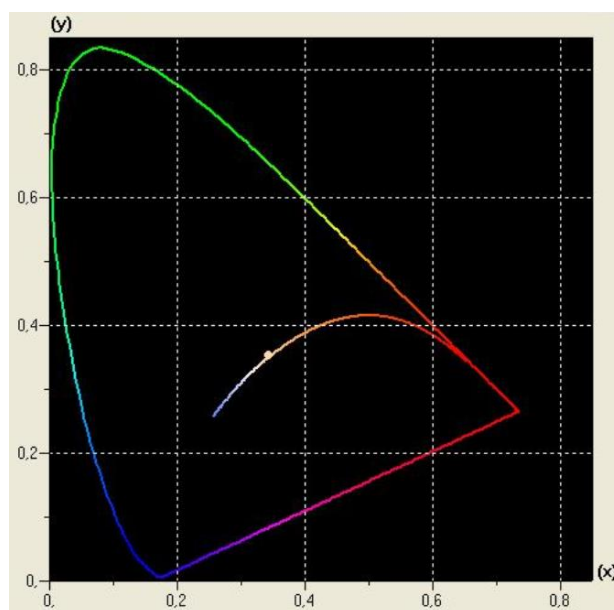
Luminaria T1A


Figura A2.1 Diagrama de cromaticidad xy luminaria T1A. Fuente: CS-S1W

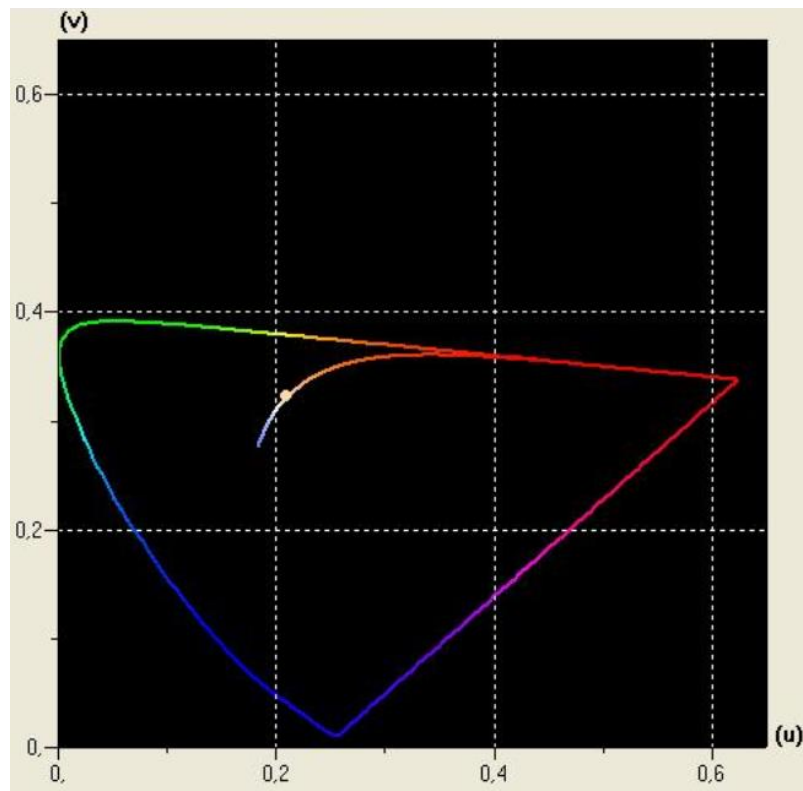


Figura A2.2 Diagrama de cromaticidad uv luminaria T1A. Fuente: CS-S1W

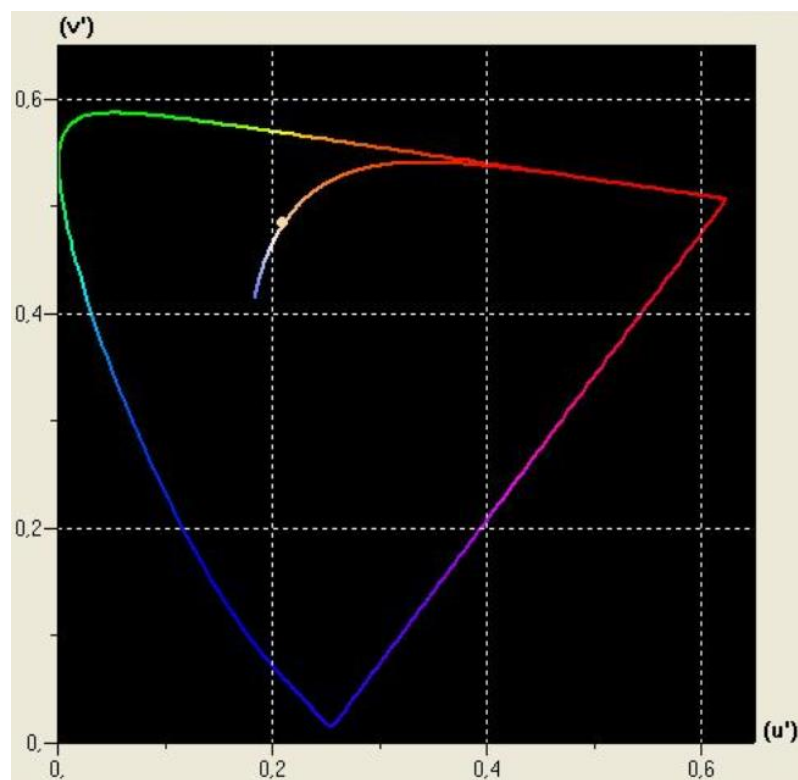


Figura A2.3 Diagrama de cromaticidad u'v' luminaria T1A. Fuente: CS-S1W

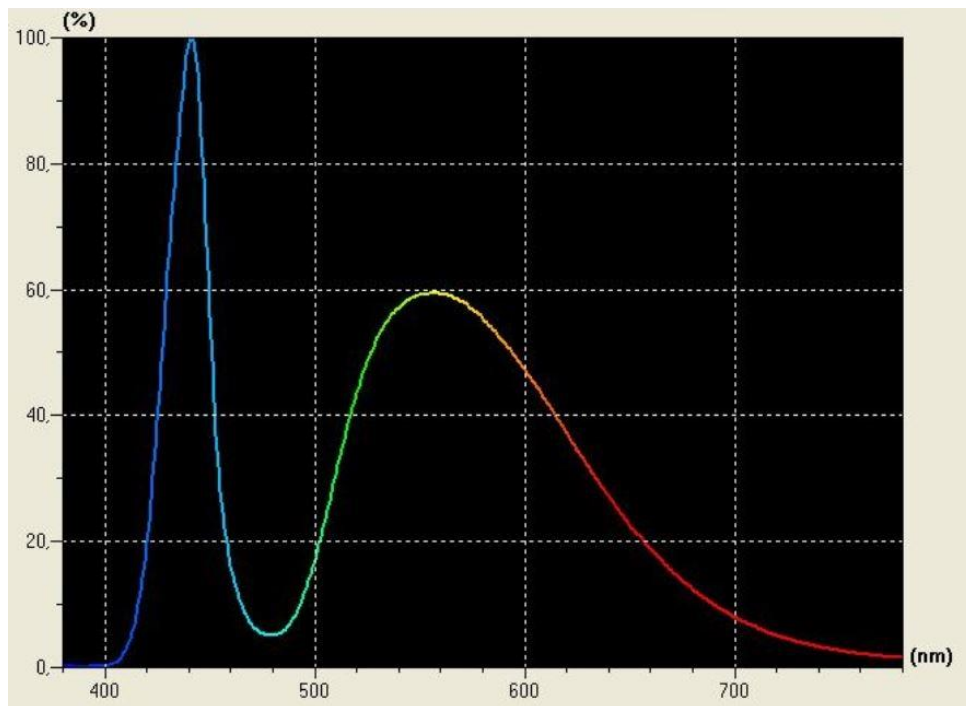


Figura A2.4 Distribución relativa espectral luminaria T1A. Fuente: CS-S1W

Luminaria Mini-Iridium

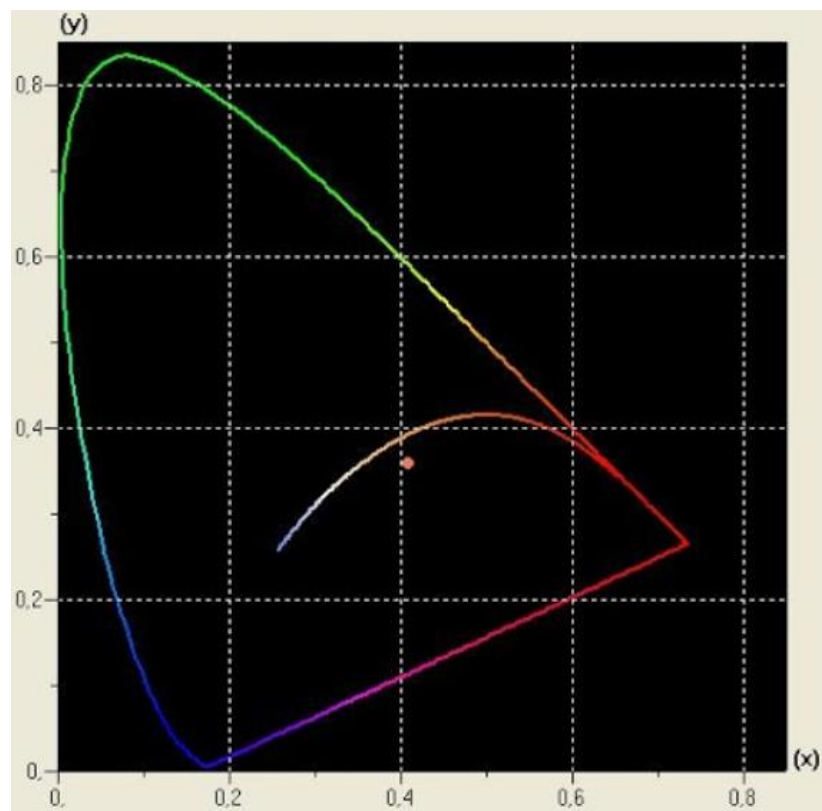


Figura A2.5 Diagrama de cromaticidad xy luminaria Mini-Iridium. Fuente: CS-S1W

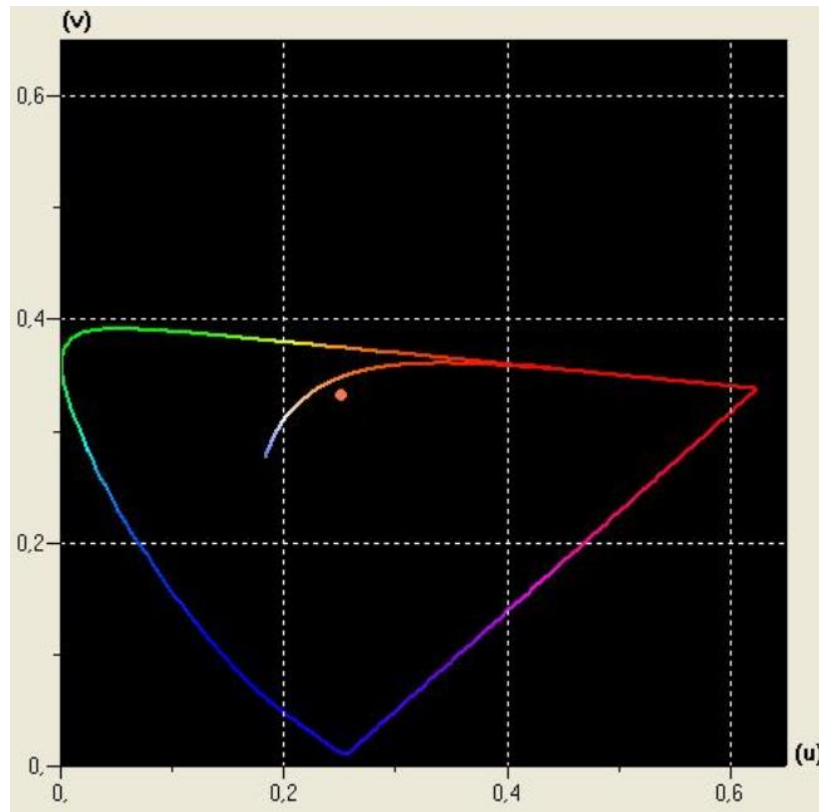


Figura A2.6 Diagrama de cromaticidad uv luminaria Mini-Iridium. Fuente: CS-S1W

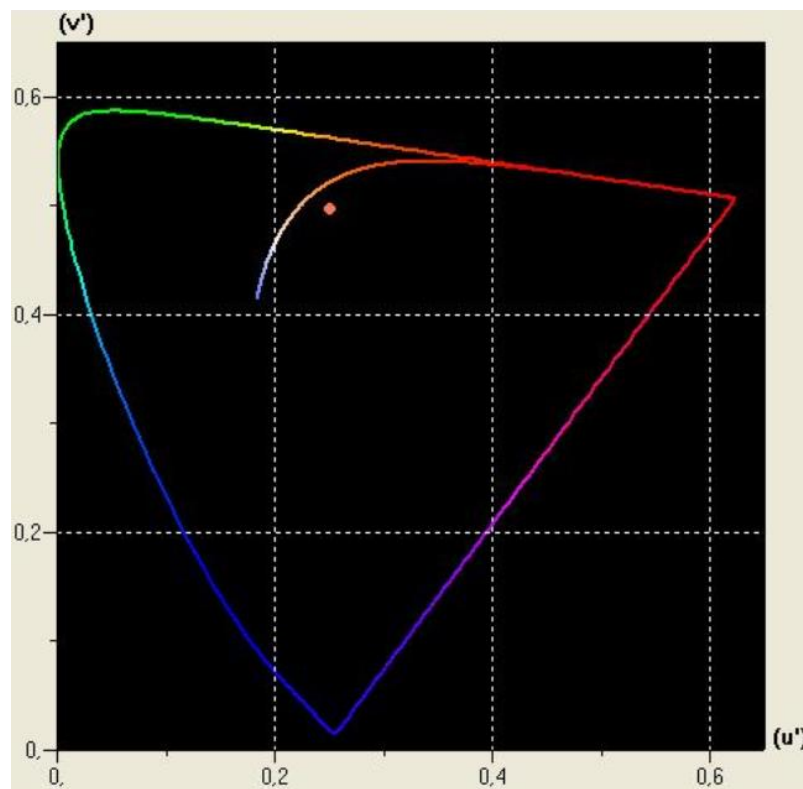


Figura A2.7 Diagrama de cromaticidad u'v' luminaria Mini-Iridium. Fuente: CS-S1W

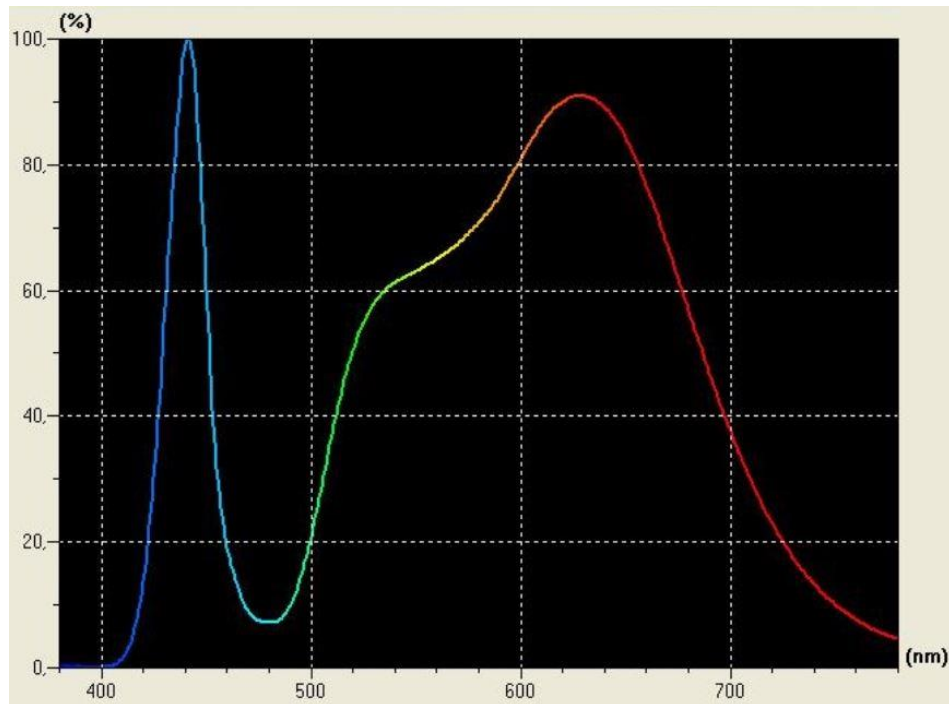


Figura A2.8 Distribución relativa espectral luminaria Mini-Iridium. Fuente: CS-S1W

Luminaria NaviaP

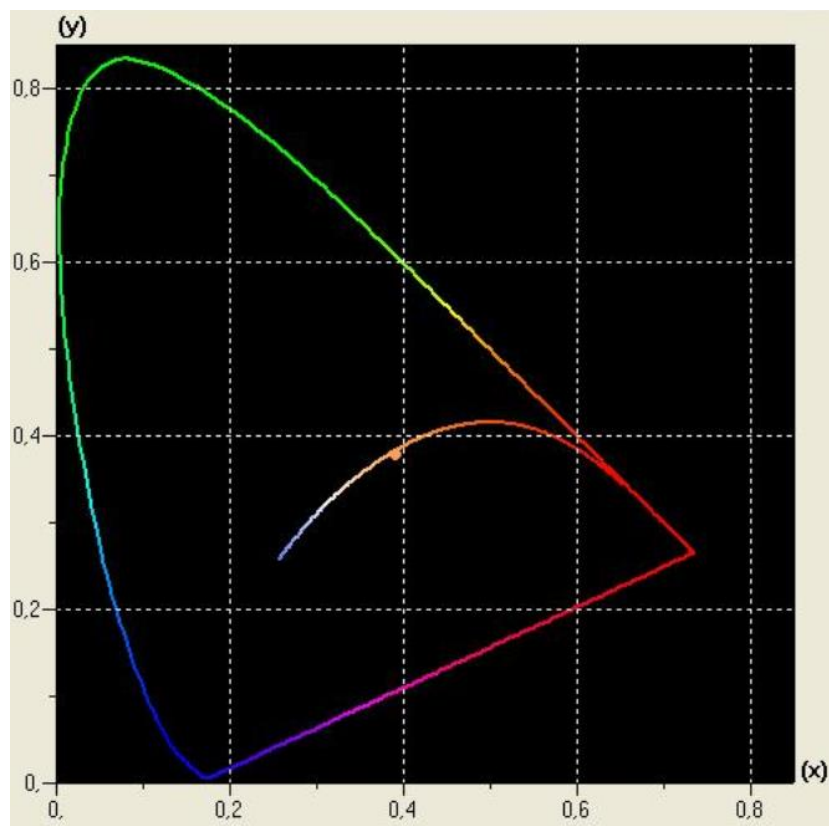


Figura A2.9 Diagrama de cromaticidad xy luminaria NaviaP. Fuente: CS-S1W

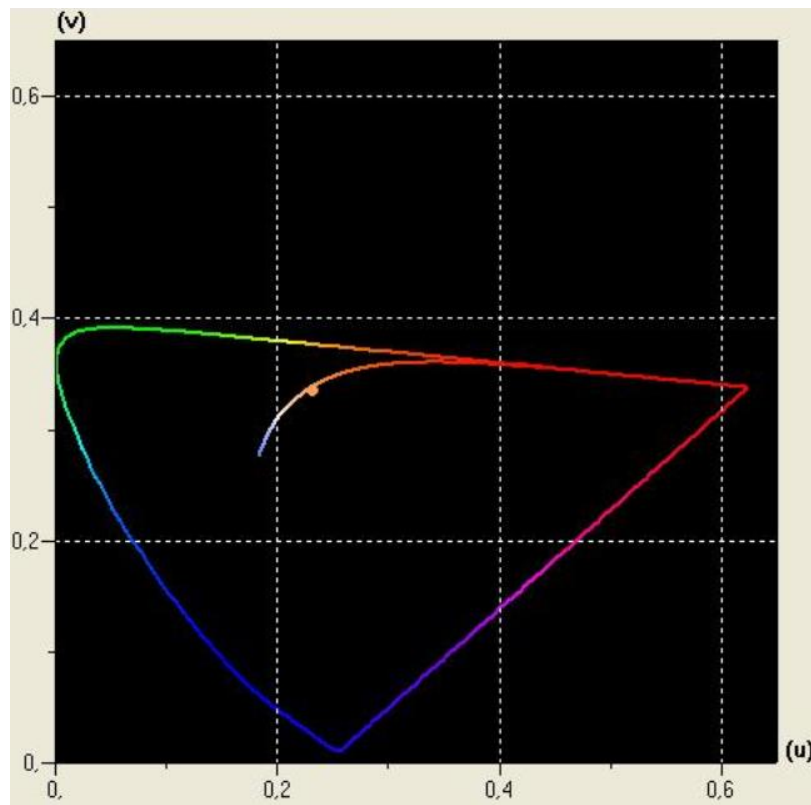


Figura A2.10 Diagrama de cromaticidad uv luminaria NaviaP. Fuente: CS-S1W

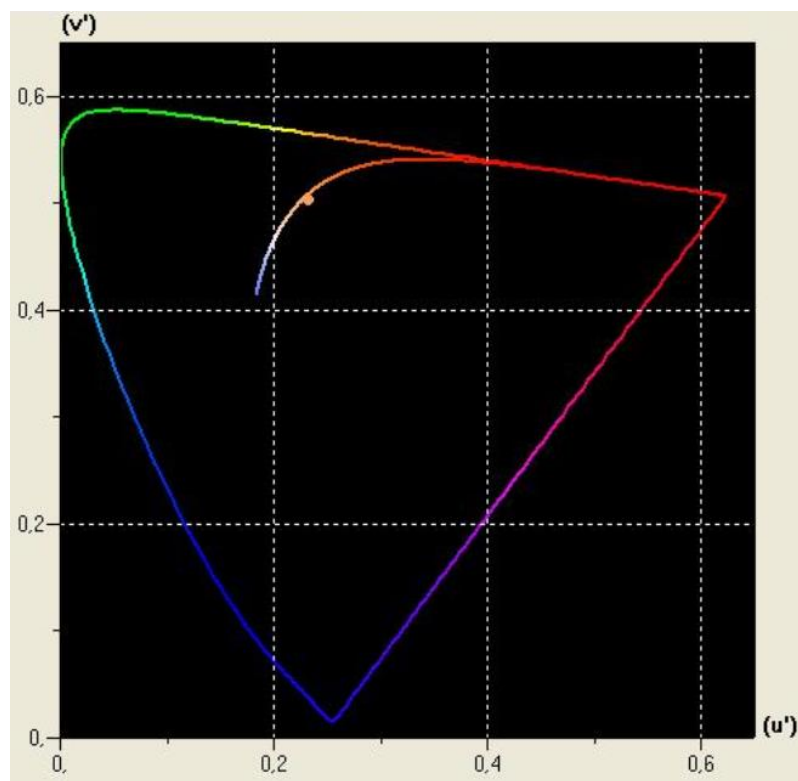


Figura A2.11 Diagrama de cromaticidad u'v' luminaria NaviaP. Fuente: CS-S1W

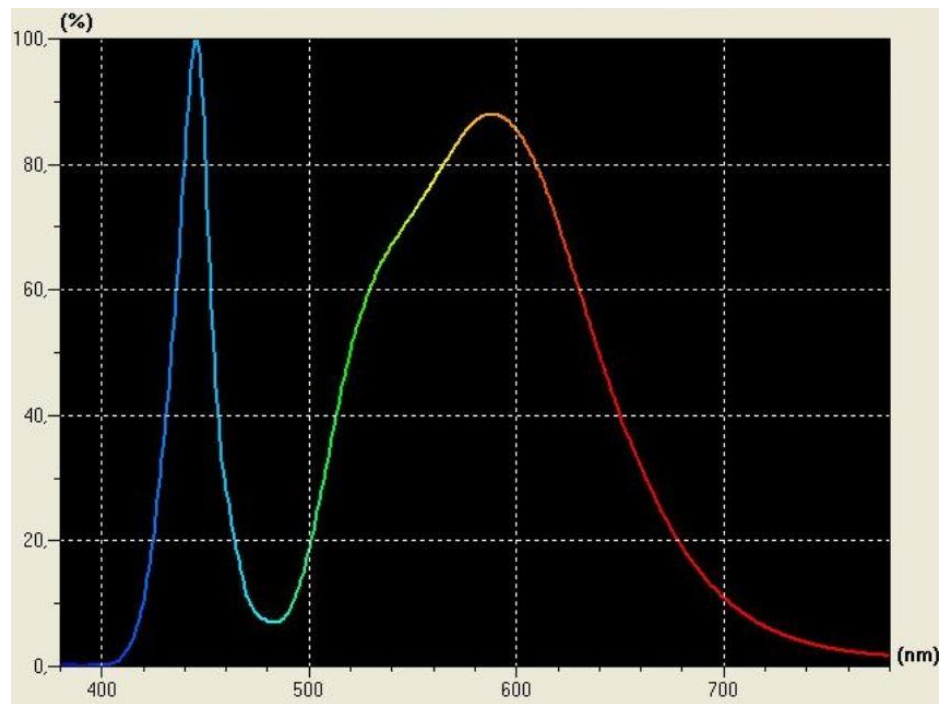


Figura A2.12 Distribución relativa espectral luminaria NaviaP. Fuente: CS-S1W

Luminaria ATP Aire 7

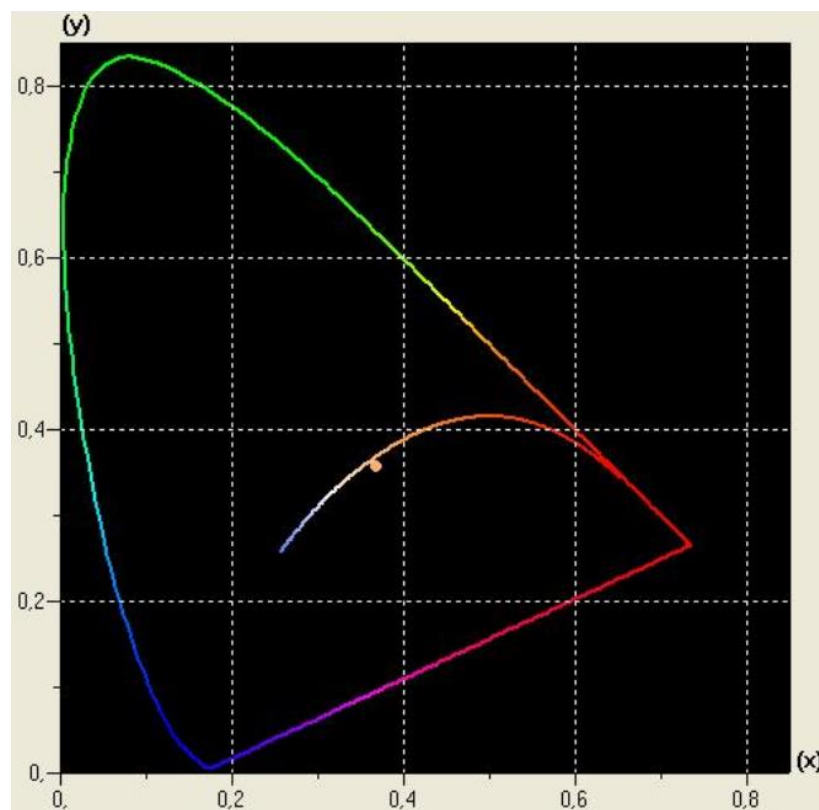


Figura A2.13 Diagrama de cromaticidad xy luminaria ATP Aire 7. Fuente: CS-S1W

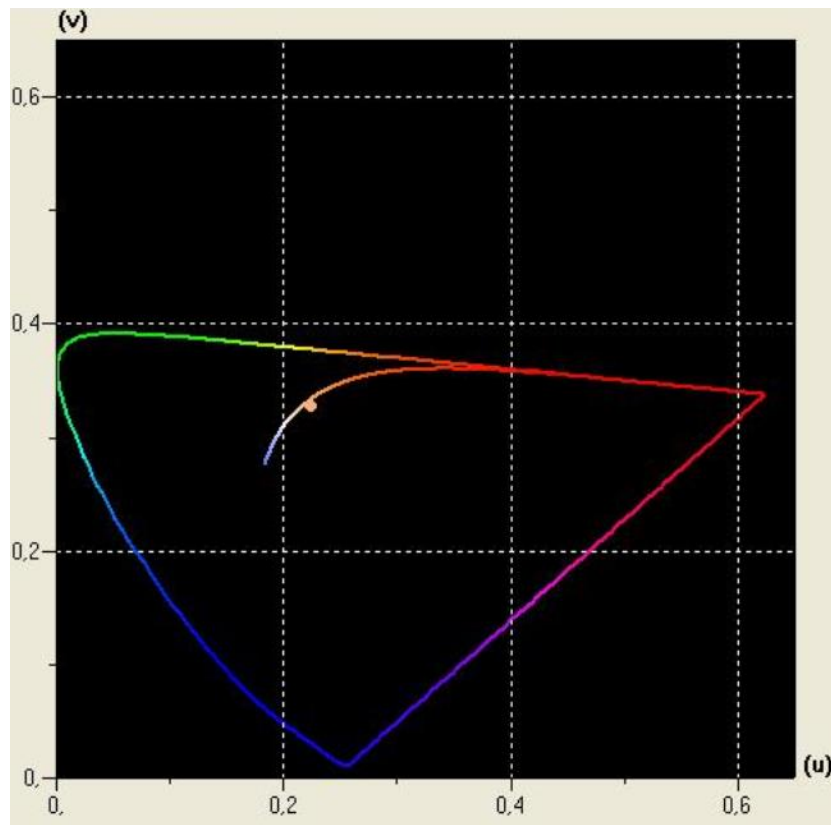


Figura A2.14 Diagrama de cromaticidad uv luminaria ATP Aire 7. Fuente: CS-S1W

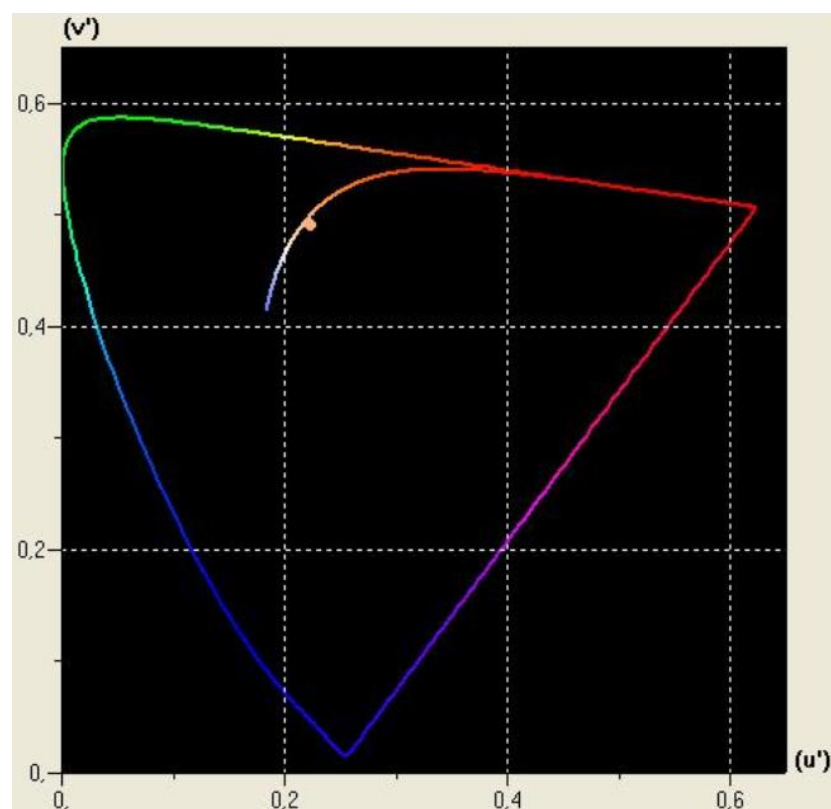


Figura A2.15 Diagrama de cromaticidad $u'v'$ ATP Aire 7. Fuente: CS-S1W

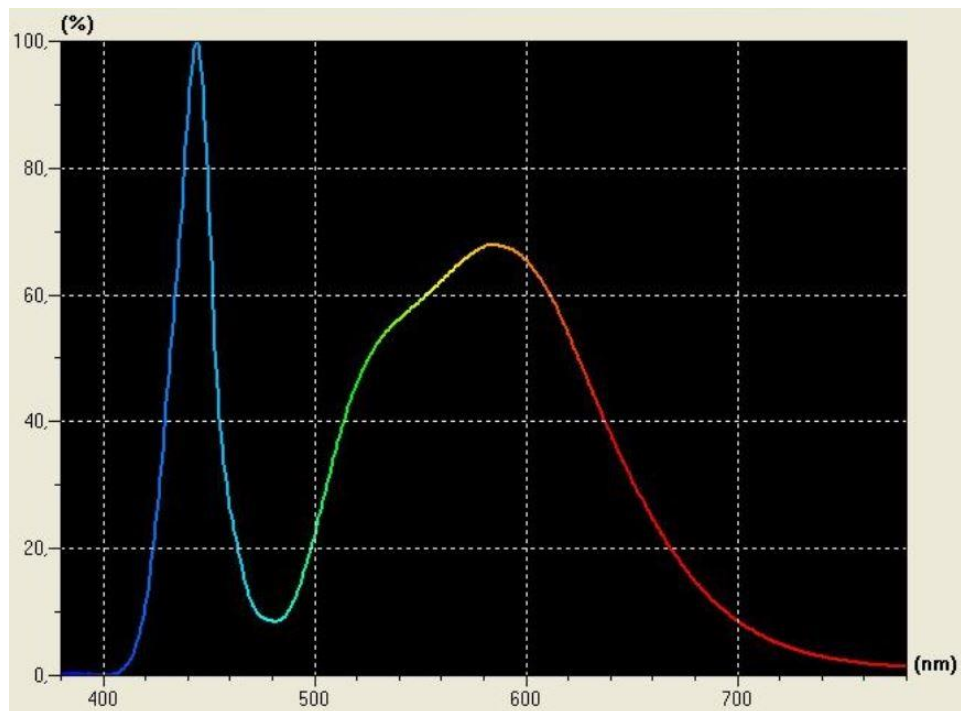


Figura A2.16 Distribución relativa espectral luminaria ATP Aire 7. Fuente: CS-S1W

Luminaria VSAP

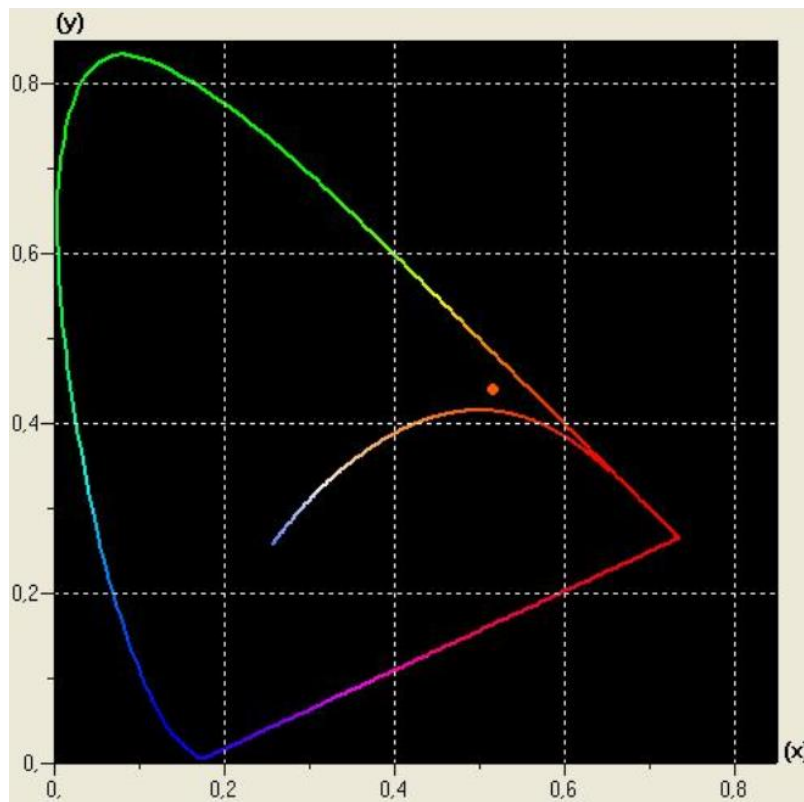


Figura A2.17 Diagrama de cromaticidad xy luminaria VSAP. Fuente: CS-S1W

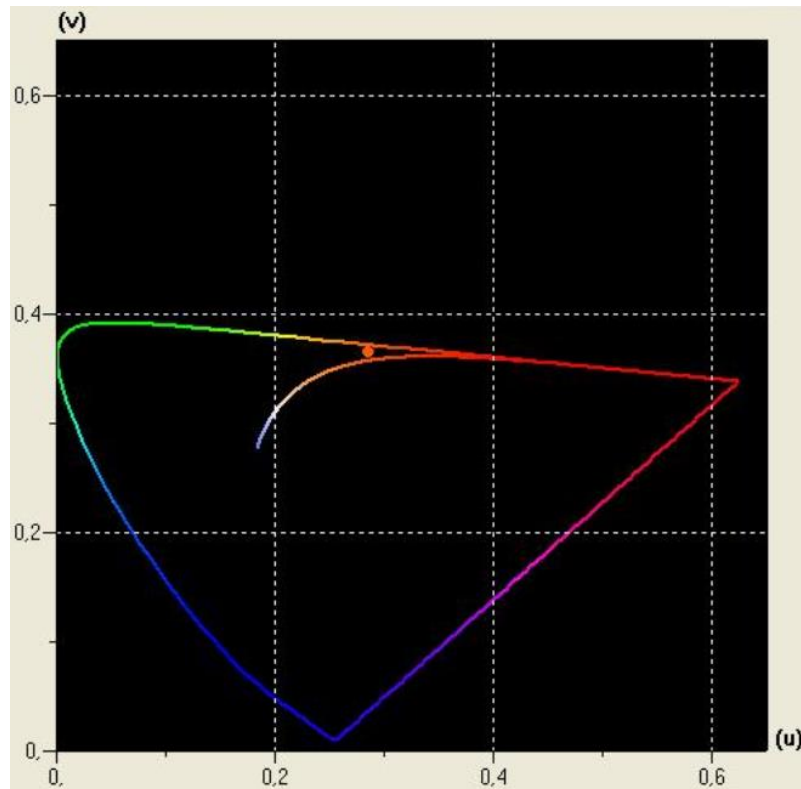


Figura A2.18 Diagrama de cromaticidad uv luminaria VSAP. Fuente: CS-S1W

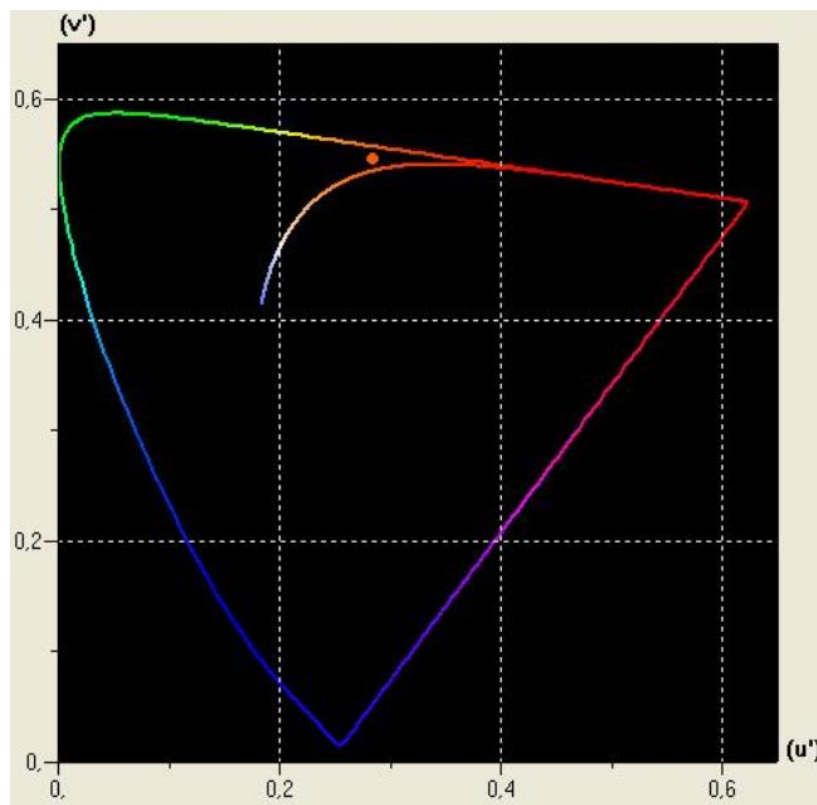


Figura A2.19 Diagrama de cromaticidad u'v' luminaria VSAP. Fuente: CS-S1W

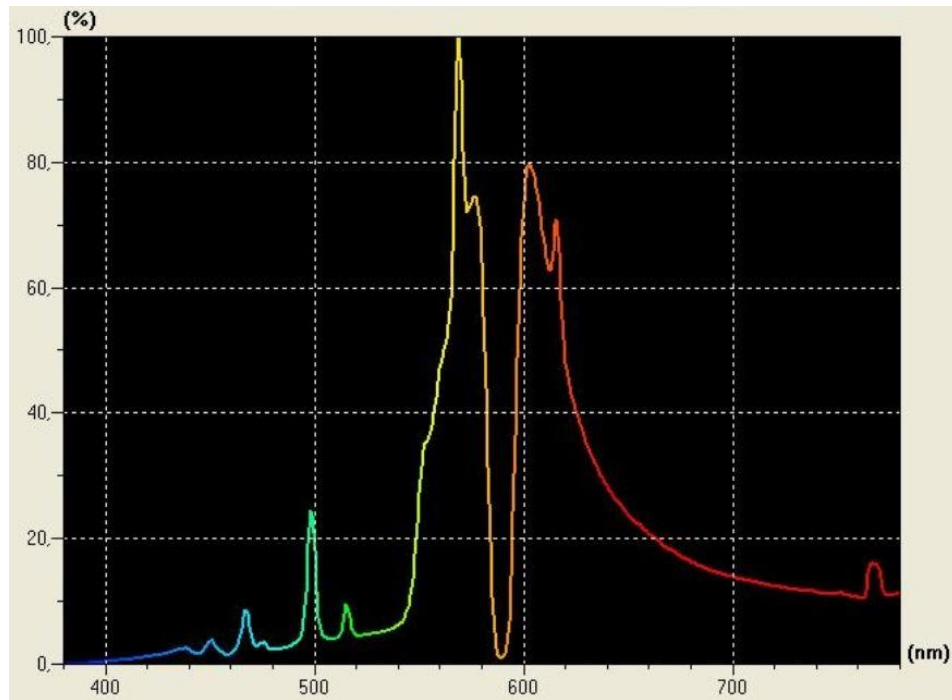


Figura A2.20 Distribución relativa espectral luminaria VSAP. Fuente: CS-S1W

Luminaria HM

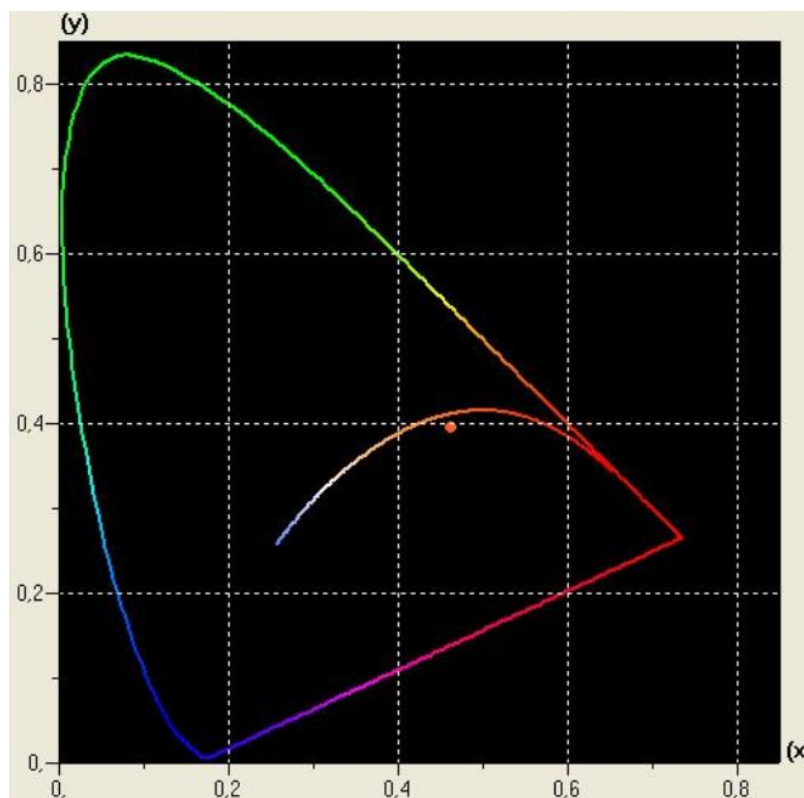


Figura A2.21 Diagrama de cromaticidad xy luminaria HM. Fuente: CS-S1W

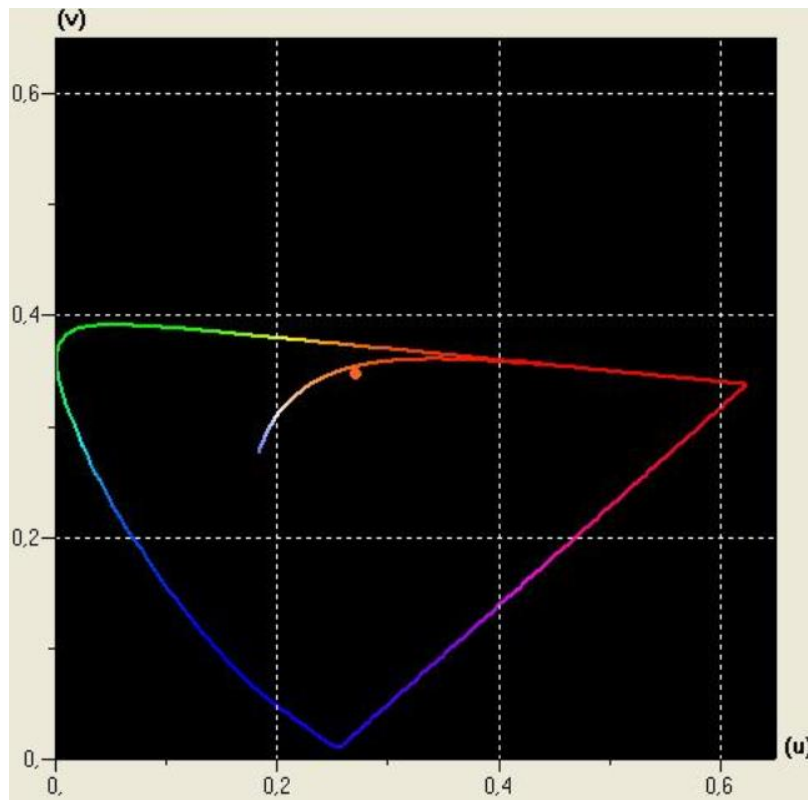


Figura A2.22 Diagrama de cromaticidad uv luminaria HM. Fuente: CS-S1W

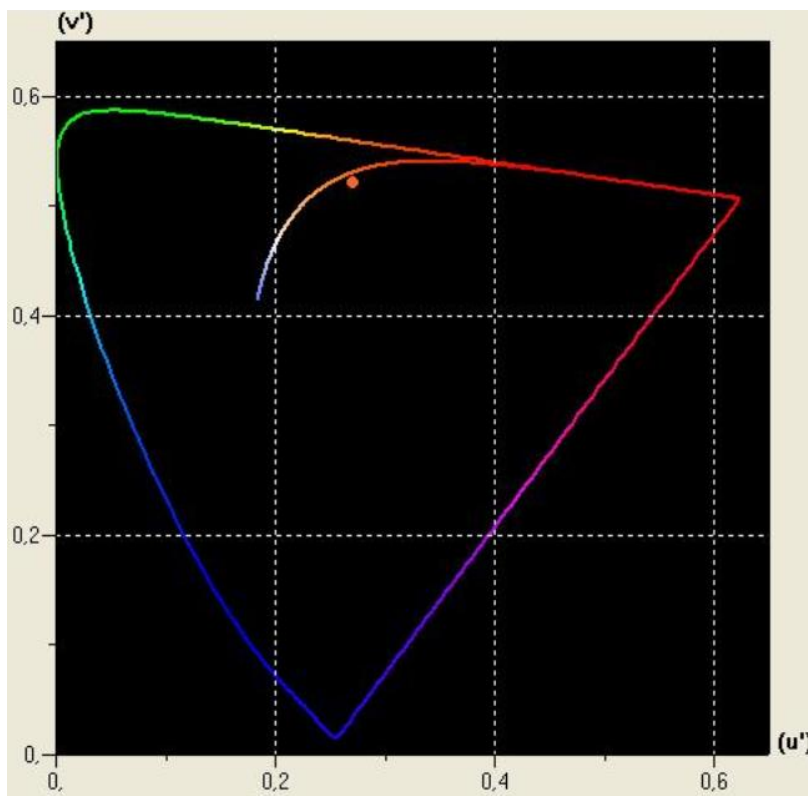


Figura A2.23 Diagrama de cromaticidad $u'v'$ luminaria HM. Fuente: CS-S1W

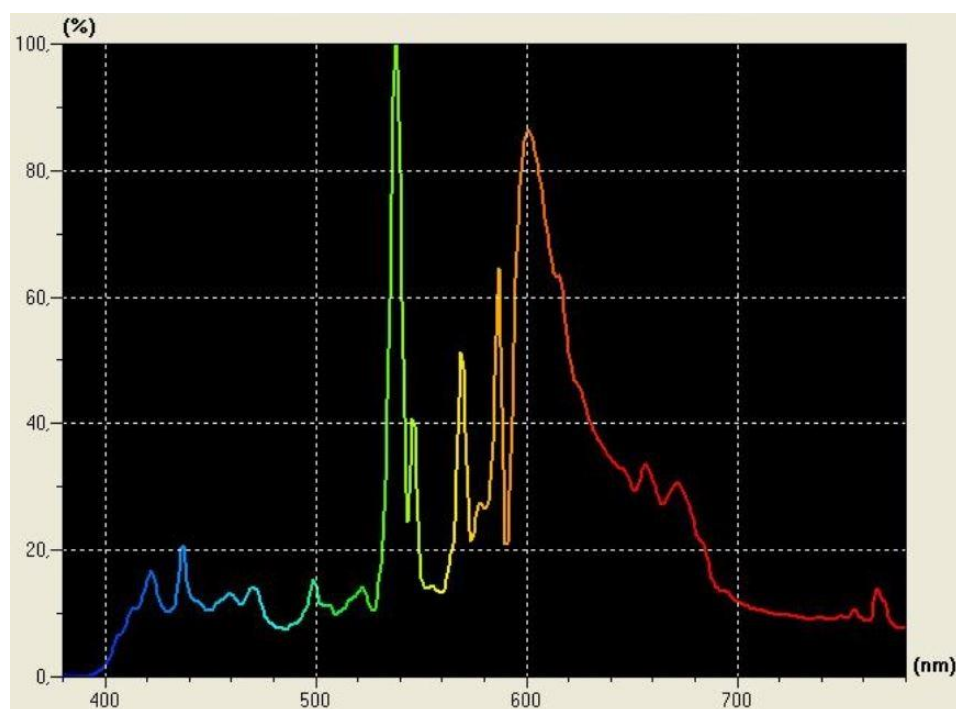


Figura A2.24 Distribución relativa espectral luminaria HM. Fuente: CS-S1W