

Capítulo 4

Características de las instalaciones y su relación con la calidad del servicio

4.1 Introducción

4.2 Supervivencia de componentes

4.2.1 Descripción de la muestra estudiada

4.2.2 Distribución de operaciones de mantenimiento

4.2.3 Distribución de tipos de lámparas

4.2.4 Porcentajes de fallas de lámparas y equipos auxiliares

4.2.5 Supervivencia de lámparas

4.2.5.1 Causas frecuentes de fallas en lámparas de descarga

4.2.5.2 Modelos de comportamiento

4.2.5.3 Datos de fabricantes

4.2.5.4 Modelización de datos de registros históricos

4.3 Depreciación del flujo luminoso

4.3.1 Causales

4.3.2 Datos de fabricantes y modelos de ajuste

4.3.3 Factor de balasto

4.4 Depreciación por polución y envejecimiento

4.4.1 Modelos de depreciación de luminarias

4.4.2 Efecto de la polución sobre la distribución de intensidades luminosas

4.4.3 Influencia de la variación de las características de reflexión de la calzada

4.5 Factor de mantenimiento

4.5.1 Medición del factor de mantenimiento

4.6 Conclusiones

4.7 Bibliografía del capítulo

4.1 Introducción

Con el tiempo las características de una instalación de alumbrado y también su rendimiento se reducen debido a la influencia de diversos factores, de los cuales los principales son según **CIE 33 (1977)** [1] :

- a) Fallas por mortalidad o mal funcionamiento de componentes.
- b) Acumulación de suciedad y polvo en el exterior e interior de las luminarias debido a la contaminación atmosférica.
- c) Reducción del flujo luminoso emitido por las lámparas por envejecimiento.
- d) Deterioro y envejecimiento de las superficies transmisoras o reflectoras debido a oxidación, efectos del calor y la radiación ultravioleta, efectos químicos etc.
- e) Descentrado de los componentes ópticos.
- f) Vibraciones impuestas al material y distorsión causada por accidentes.
- g) Excesivo aumento o baja de temperatura dentro del artefacto.
- h) Falla prematura del equipo auxiliar.
- i) Voltaje incorrecto en los terminales de la lámpara.
- j) Fallas de la instalación
- k) Factor de balasto [†]

La calidad y eficacia de una instalación de alumbrado y la rapidez con que su prestación se deteriora, depende en gran medida de la correcta elección de la luminaria, lámpara, equipo auxiliar, etc. y en el modo mas o menos perfecto en que estos elementos se complementan. Las indicaciones dadas en el presente capítulo presuponen que todos los elementos han sido cuidadosamente seleccionados y que se complementan entre sí.

Casi todos los factores arriba mencionados pueden ser total o parcialmente mitigados por un mantenimiento adecuado realizando sustituciones periódicas de componentes ya usados y por la limpieza de elementos que lo requieran. Por el contrario poco puede hacerse por los factores **d** y **g** una vez completada la instalación.

El momento oportuno para decidir cuando realizar el cambio de un componente o la limpieza de luminarias requiere el conocimiento del comportamiento con el tiempo de los factores intervinientes. Con este fin se describe en el presente capítulo el estudio de los antecedentes y el procesamiento de datos tendiente a suministrar la información necesaria para aplicar una metodología de diseño y evaluación de instalaciones.

Tres son los aspectos en los cuales se ha focalizado la atención :

- supervivencia de componentes
- depreciación por polución
- depreciación por envejecimiento

los que son analizados para establecer modelos de comportamiento de las instalaciones de alumbrado urbano. La metodología aplicada para estudiar estos aspectos ha sido:

- procesamiento y análisis de datos de registros históricos de operaciones de mantenimiento
- análisis de datos de fabricantes de componentes del alumbrado urbano
- procesamientos de datos para la aplicación de modelos de fiabilidad
- análisis de datos mediciones de instalaciones

la cual se desarrolla y describe en el presente capítulo.

[†] El factor de balasto (*FB*) es descrito en sección 4.3.3

4.2 Supervivencia de componentes

La supervivencia de los componentes básicos de la instalación de alumbrado se estudia con el fin de establecer modelos predictivos de comportamiento. Para ello se realizó una búsqueda de empresas que dispusieran de registros históricos confiables de un periodo superior a tres años. En general los ayuntamientos no llevan un registro de operaciones de mantenimiento. En el mejor de los casos aquellos que contratan empresas externas exigen un informe periodico de actuaciones. Por fortuna una empresa de mantenimiento **SECE (1998)**[2] lleva un riguroso registro de los ayuntamientos con los que trabajan. Datos de la ciudad de Vic, Cataluña fueron seleccionados debido a la disponibilidad de 6 años de antigüedad de los datos.

4.2.1 Descripción de la muestra estudiada

Durante el transcurso de 6 años, se ha llevado un cuidadoso registro de todas las operaciones de mantenimiento sobre el alumbrado urbano realizadas. Debido a que con el tiempo las instalaciones de la población experimentaron renovaciones (cambio gradual de lámparas de mercurio a sodio) , de toda la base de datos disponible, se seleccionaron los puntos de puntos de luz que mantuvieron hasta el momento del análisis la topología original de cuando comenzaron a realizar registros históricos de las actuaciones. Sobre los 5.081 puntos de luz existentes en 1998, 1443 fueron seleccionados. Las características de la muestra se resumen a continuación:

Población: Vic, Cataluña, España
Período de recolección de datos: 6 años, del 01/07/1992 al 29/05/1998
Puntos de luz: 1443
Cuadros de mando: 43
Operaciones: 9.957
Empresa: SECE , Sociedad Española de Construcciones Eléctricas S.A.
Fecha del análisis : Agosto 1998

Un detalle de los componentes sobre los cuales se han codificado las operaciones se indican en tabla 4.2.1-1. Cada operación sobre un elemento determinado tiene un código asignado. Los códigos de operaciones junto a la fecha de realización fueron provistos en formato electrónico Dbase y procesados por el autor mediante un filtrado selectivo de la información **Manzano E.R. (1998)** [3].

Tabla 4.2.1-1: Clasificación de las operaciones de mantenimiento sobre los puntos de luz, cuadros de mando y líneas eléctricas.

<u>Puntos de Luz</u>	<ul style="list-style-type: none"> Cambios masivos Limpieza Pintura Cambio de equipo Numeración Cambio y limpieza Lámpara Fusibles Caja de protección del punto de luz Montaje Conexionado Equipo auxiliar Balasto Condensador Arrancador Portalámparas Luminaria Cubeta Plásticos Vidrio Reflector Tapa de Luminaria Soporte Puerta Cimentación
<u>Cuadro de Mando</u>	<ul style="list-style-type: none"> Célula foto eléctrica Reloj astronómico Contador Caja de protección Contactor ICP Diferencial Interruptor TM Fusibles Conexionado Puerta del armario Armario Cerradura
<u>Líneas aéreas</u>	<ul style="list-style-type: none"> Cables Cajas de derivación Aisladores Bajadas Columnas
<u>Líneas Subterráneas</u>	<ul style="list-style-type: none"> Cables Conexiones Canalizaciones Pericones
<u>Detecciones</u>	
<u>Revisiones/Comprobaciones</u>	

4.2.2 Distribución de operaciones de mantenimiento

Las operaciones de mantenimiento se clasifican en correctivas y preventivas según se ha descrito en sección 3.2 “f”. Los resultados obtenidos de filtrar la base de datos se han agrupado en sobre los elementos principales de las instalaciones los que se indican en la tabla 4.2.2-1.

Tabla 4.2.2-1: Operaciones de mantenimiento sobre los elementos del sistema de alumbrado

Operaciones	Descripción	Número	%
Preventivas	Puntos de Luz	4964	49,86
	Cuadro de mando	0	0,00
	Otros	4	0,04
Correctivas	Puntos de Luz	3423	34,38
	Cuadro de mando	1213	12,18
	Líneas aéreas	44	0,44
	Líneas subterráneas	9	0,09
	Detecciones	96	0,96
	Revisiones/Comprobaciones	2	0,02
	Otros	200	2,00
Total		9955	100,00

a) Operaciones preventivas

Las operaciones denominadas preventivas o programadas corresponden a cambios masivos de lámparas y limpiezas de luminarias. La distribución porcentual de operaciones preventivas se indica en figura 4.2.2-1. A cambios masivos y limpieza simultanea le corresponde el 58% de las operaciones y a limpieza sola, el 40%.

En la figura 4.1.1-2 y 4.1.1-3 se ha graficado la distribución temporal de las operaciones preventivas, donde se observa que la política seguida en los seis años ha sido de 2 cambios masivos de lamparas coincidiendo con limpiezas y una limpieza masiva con lo que se efectuaron cambios masivos cada 3 años y limpiezas masivas cada 2 años. Estas operaciones no se realizaron en un periodo breve de tiempo sino que se efectuaron distribuidas a lo largo del tiempo para un mayor aprovechamiento de los medios técnicos disponibles.

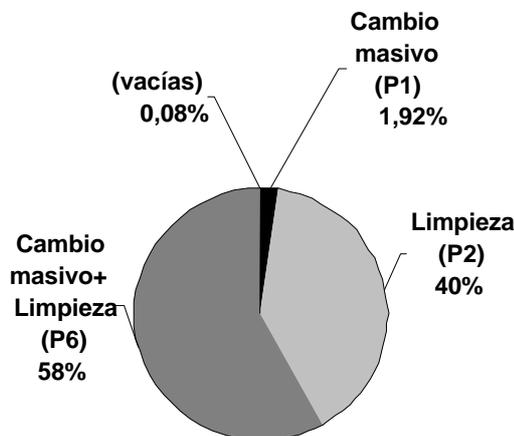


Figura 4.2.2-1: Distribución relativa de operaciones preventivas de cambios masivos de lámparas y limpieza de luminarias sobre la muestra (4968) en el período de 6 años.

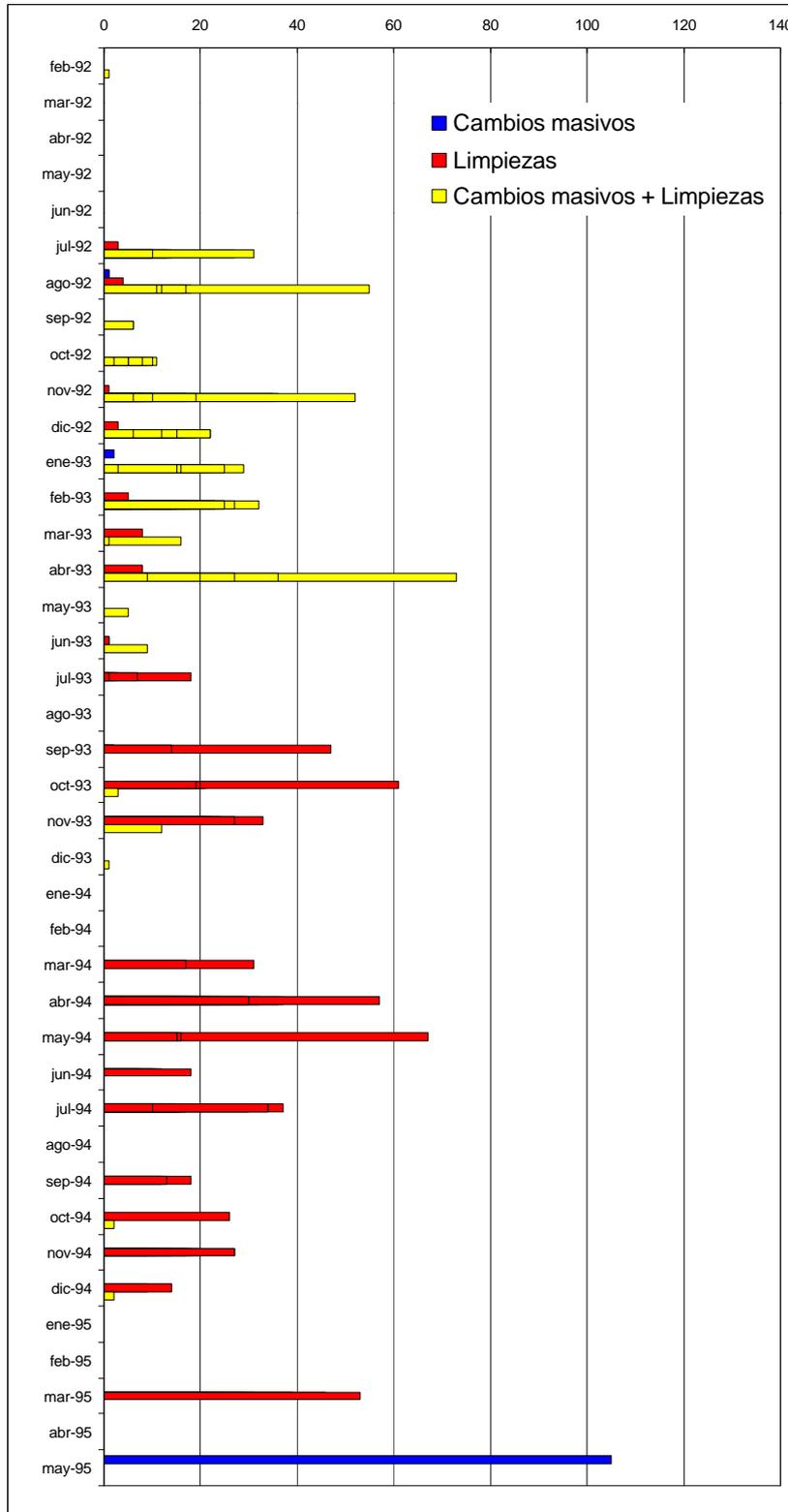


Figura 4.2.2-2: Distribución temporal de las operaciones de mantenimiento preventivas de febrero 1992 a mayo 1995.

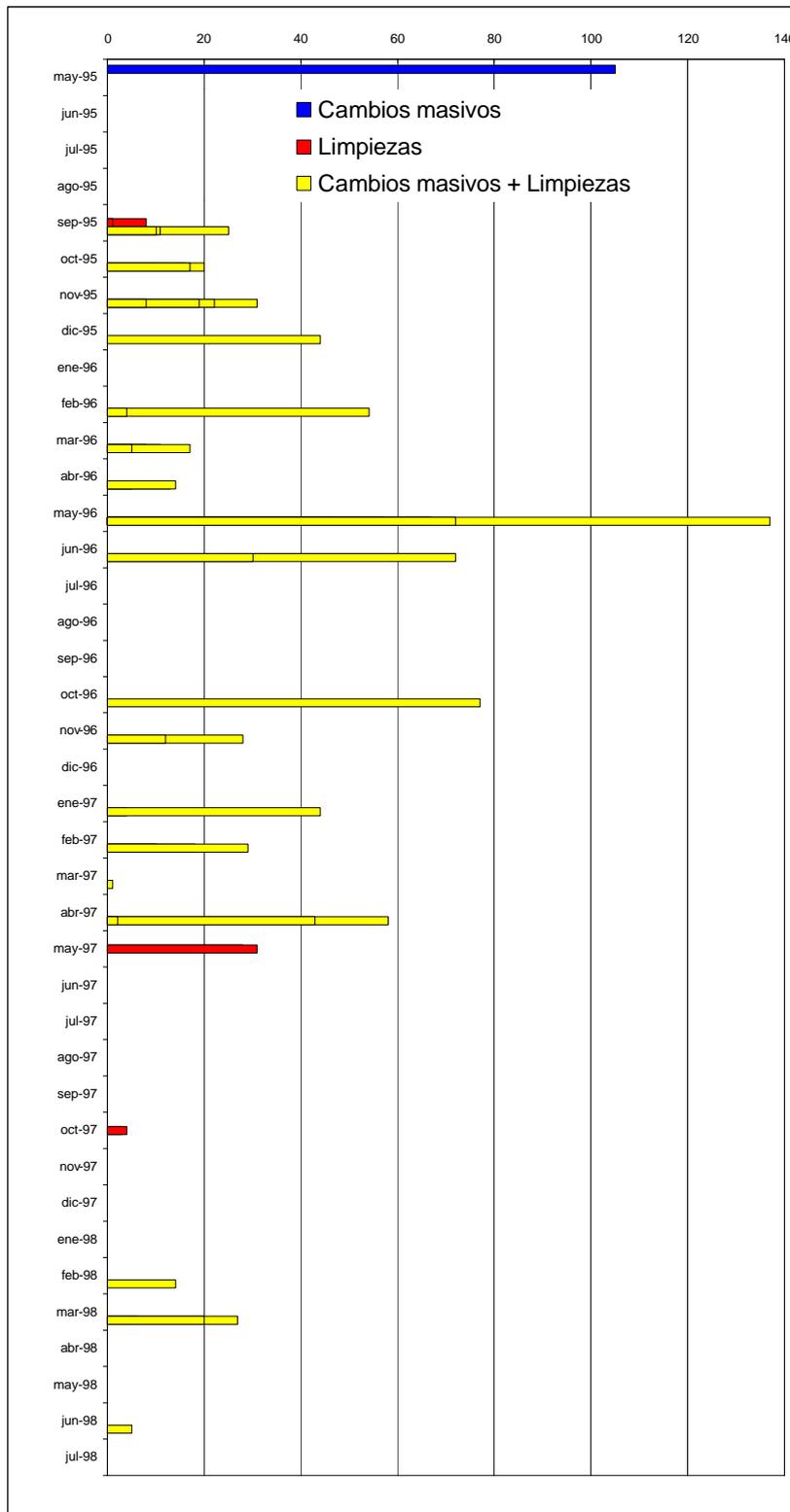


Figura 4.2.2-3: Distribución temporal de las operaciones de mantenimiento preventivas de mayo 1995 a julio 1998.

b) Operaciones correctivas

Las operaciones denominadas correctivas consisten en reparaciones o sustituciones puntuales destinadas a corregir la falla detectada. A partir del análisis de las actuaciones correctivas se busca determinar el peso de cada tipo de operación y el componente asociado. La distribución porcentual de operaciones correctivas en general de la base de datos analizada se indica en figura 4.2.2-4. Se observa que el 72% de operaciones correctivas se efectuaron sobre puntos de luz y el 25% sobre los cuadros de mando. Si bien las operaciones en líneas representan el 3% (2% aéreas y 1% subterráneas) el costo asociado a estas reparaciones puede ser considerablemente alto, sobre todo en líneas subterráneas.

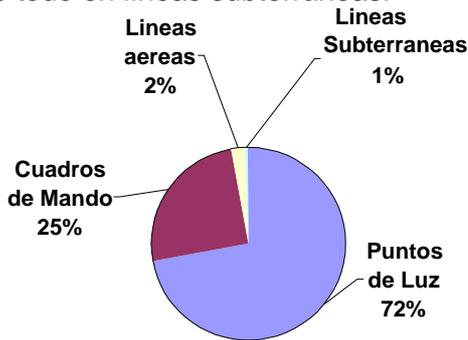


Figura 4.2.2-4: Distribución de operaciones correctivas según elementos de la instalación.

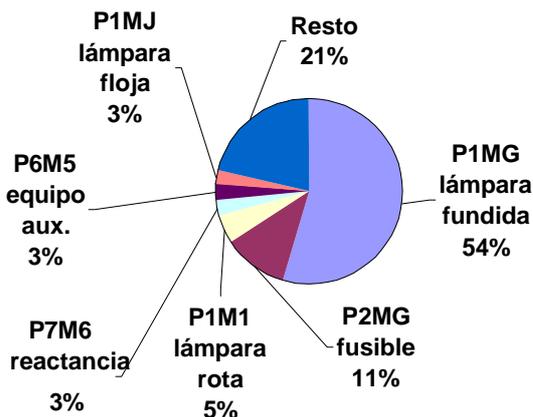


Figura 4.2.2-5: Distribución porcentual de operaciones correctivas en puntos de luz

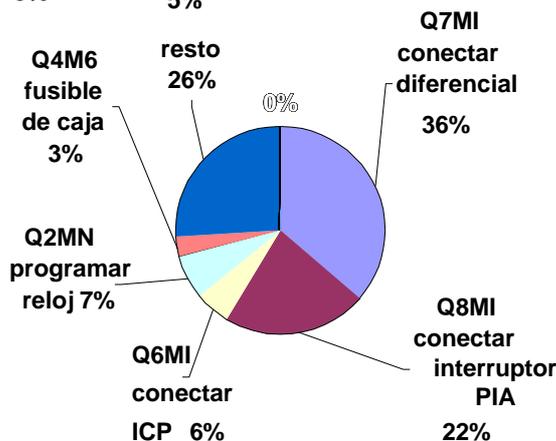


Figura 4.2.2-6: Distribución porcentual de operaciones correctivas en cuadros de mando

La naturaleza de las operaciones de mantenimiento correctivas sobre los puntos de luz se distribuye de acuerdo a la figura 4.2.2-5, donde se observa que el mayor porcentaje corresponde a cambios por fallas de lámparas (62%). En figura 4.1.1-6 se indican las distribuciones porcentuales de operaciones correctivas de cuadro de mando donde el 64% corresponde a reconexión por actuaciones de las protecciones (diferencial, ICP, PIA).

Del análisis de operaciones correctivas se observa que el componente más delicado es la lámpara con un **45%** de operaciones correctivas acumuladas (72% x 62%). En orden le siguen las operaciones sobre protecciones del cuadro de mando con un 16% (25% x 64%). Si bien el costo de reconexión de una protección (en el caso del disyuntor diferencial) puede ser bajo frente al cambio de una lámpara el efecto es mayor pues saca de servicio a la serie de puntos de luz vinculados a dicha protección. Las operaciones sobre el equipo auxiliar de la lámpara representan solo un 4% del total. Se concluye así que es conveniente focalizar la atención en el comportamiento de las lámparas de la instalación.

4.2.3 Distribución de tipos de lámparas

Los distintos tipos de lámparas que componen la muestra de Vic analizada se indican en la tabla 4.2.3-1, donde se observa que el mayor porcentaje de lámparas, instalado en el año 1992, correspondían a lámparas de Mercurio con un 77% del total y a lámparas de Sodio de A.P. con un 15%. Actualmente el porcentaje de lámparas de Mercurio se ha reducido a un 49% e incrementado el de lámparas de sodio a un 50% (noviembre de 2000), tendencia que se observa también en otras poblaciones. Debido a que el 92% de los datos corresponden a lámparas de Mercurio y Sodio, serán estos los componentes analizados a partir de los datos de registros históricos para determinar un modelo de comportamiento.

Tabla 4.2.3-1. : Distribución de lámparas de la muestra de Vic. Cataluña.

Lámpara	Código	Potencia	Total	%
Mercurio	K	80	47	3,25
		125	458	31,74
		250	490	33,95
		400	113	7,83
	Total K		1108	76,78
Sodio AP	T	70	31	2,15
		150	92	6,37
		250	53	3,67
		400	37	2,56
	1000	1	0,07	
Total T		214	14,83	
Incandescentes	I	25	6	0,42
		40	1	0,07
		100	1	0,07
		200	10	0,69
Total I		18	1,24	
Mezcla	M	160	22	1,52
Fluorescentes	F	36	3	0,21
Incandescentes halógenas	C	500	1	0,07
		1000	1	0,07
Total C			2	0,14
Mercurio vap.met.	H	250	4	0,28
Sodio BP	B	135	8	0,55
Fluorescentes compactas	L	10	43	2,98
		18	15	1,04
	Total L			58
Otras	N	80	1	0,07
Total general			1443	100,00

4.2.4 Porcentajes de fallas de lámparas y equipos auxiliares

Los porcentajes de fallas de lámparas (mercurio y sodio AP) y equipos auxiliares, acumuladas en el período de 6 años (01/07/92 al 29/05/98) extraídos de los registros históricos se indican en la tabla 4.2.4-1. Debido a que la base de datos incluye registros de operaciones entre dos fechas fijas y no entre cambios masivos, la tabla 4.2.4-1 incluye también actuaciones correctivas efectuadas previas a un cambio masivo.

Tabla 4.2.4-1: Operaciones de cambios correctivos por fallo para los componentes más significativos en número de la muestra, acumulados durante un período de 6 años.

Lámparas tipo	Mercurio (K)					Sodio AP (T)				
	potencia [W]	80	125	250	400	Total	70	150	250	400
Total instalados	47	458	490	113	1108	31	92	53	37	213
Total fallos	86	714	530	66	1396	17	63	25	35	140
% de fallos anual	30.5	26	18	9.7	21	9.1	11.4	7.9	15.8	11

Tabla 4.2.1-2: Porcentaje de fallo anual de equipos auxiliares de la muestra estudiada acumulados durante el período de 6 años.

Equipo para lámpara de:	Mercurio (K)					Sodio AP (T)				
	80	125	250	400	Total	70	150	250	400	Total
Equipos instalados	47	458	490	113	1108	31	92	53	37	213
Fallos sin porta lámp.	19	75	68	10	172		19	7	14	40
% de fallos anual	6.7	2.7	2.3	1.5	2.6		3.4	2.2	6.3	3.1
Fallos con porta lámp.	21	119	82	14	236		20	7	19	46
% de fallos anual	7.4	4.3	2.7	2.0	3.6		3.6	2.2	8.5	3.6

El porcentaje de fallas anuales para lámparas de Mercurio es de 21% mientras que para lámparas de Sodio AP del 11%. En equipos auxiliares el porcentaje de fallas anuales es de 3,6% para ambos tipos de lámparas.

Resultados similares se obtienen si se consideran sólo las operaciones correctivas posteriores a un cambio masivo. Los porcentajes de fallas resultantes en este caso se muestran en tabla 4.2.4-3 obteniendo 18,6% para las lámparas de Mercurio y 8,7% para las de Sodio AP, observando una leve reducción respecto al primer análisis. Para los componentes de equipos auxiliares los resultados son similares.

Tabla 4.2.4-3: Porcentaje de fallo anual de lámparas entre dos cambios masivos acumulados durante un período de 6 años.

Lámpara tipo	Mercurio (K)					Sodio AP (T)				
	potencia	80	125	250	400	Total	70	150	250	400
Fallas de lámparas	85	648	447	55	1235	12	55	12	32	111
Total instalados	47	458	490	113	1108	31	92	53	37	213
% de fallos anual	30.1	23.6	15.2	8.1	18.6	6.4	10	3.8	14.4	8.7

Los porcentajes de fallas anual dan una idea del volumen de cambios anuales para hacer previsiones pero no dan ninguna información de que ocurre en el transcurso del tiempo.

4.2.5 Supervivencia de lámparas

4.2.5.1 Causas frecuentes de fallas en lámparas de descarga

Los causales principales de fallas en lámparas según *Meyer Chr., Nienhuis H. (1988)* [4] se deben a:

- incremento de la tensión de encendido
- incremento de la tensión de lámpara
- frecuencia de los ciclos de encendido
- fallas prematuras

Un importante factor que limita la duración de las lámparas de descarga es que con uso se produce un **incremento de la tensión de encendido** lo que finalmente conducirá a la falla en el encendido de la lámpara. Esto es frecuentemente causado por:

- a) Desgaste del material emisor de los electrodos en el tubo de descarga. El emisor de los electrodos pierde gradualmente su propiedad de reducir la tensión de encendido.
- b) Cambios en la composición o impurezas del gas en el tubo de descarga. En lámparas de sodio de baja presión se produce por una reducción de la presencia del gas auxiliar argón.

Con el tiempo la tensión necesaria para el encendido es tan alta que la lámpara ya no puede encender bajo condiciones normales de operación, alcanzando el fin de su vida útil. Determinar el valor real de la tensión de encendido, no es una tarea sencilla ya que el proceso de descarga depende no solo del valor pico de la tensión, sino también del perfil de la onda, del número de pulsos dentro de un cierto período, del instante de aplicación y de la energía del pulso.

Otra causa de falla de las lámparas de descarga es el **incremento de la tensión de lámpara**. Se produce por aumento de la presión y temperatura del gas en del tubo de descarga originado por acumulación, con el tiempo, del material evaporado del electrodo en las paredes lo cual oscurece además el tubo.

El incremento de la tensión de lámpara hará que se extinga el proceso de encendido, repitiéndose el ciclo cada vez que se halla enfriado lo suficiente el tubo de descarga en cuyo caso la lámpara ha alcanzado el fin de su vida [4]. En lámparas de sodio de alta presión cuando la tensión en la misma alcanza el 150% del valor inicial (100 hs iniciales), la lámpara se extingue, alcanzando el final de su vida (ver figura 4.2.1-1).

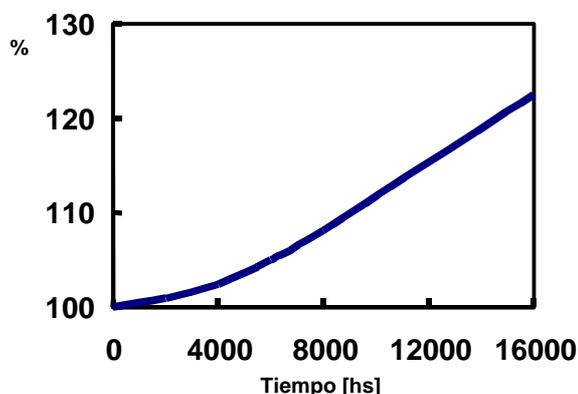


Figura 4.2.1-1 Aumento porcentual de la tensión de operación con el tiempo, para lámparas de sodio de alta presión.

La tensión de lámpara es propuesta como indicador del tiempo de vida que le resta a la lámpara, sistemas de tele gestión que testen este parámetro y lo comparen con valores límites según las características del fabricante podrían indicar el momento oportuno de cambio antes de ocurriera la falla por este motivo evitando el posterior daño al equipo auxiliar.

La **frecuencia de los ciclos de encendido** y apagado tiene una influencia significativa en la vida de las lámparas. En lámparas fluorescentes tubulares los valores publicados generalmente se refieren a un ciclo de encendido de 3 horas, 2:45 h., funcionando y 15 min. apagadas, de acuerdo con **IEC 81 (1987)** [5] . La figura 4.2.1-3 muestra la influencia del ciclo de encendido en lámparas fluorescentes T8- 36W Inductivas.

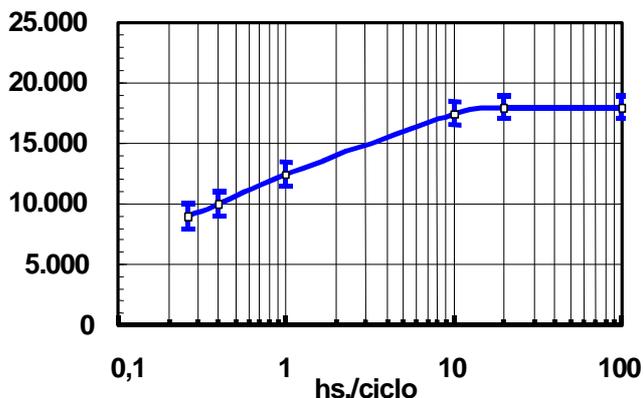


Figura 4.2.1-3 Influencia del ciclo de encendido en lámparas fluorescentes tubulares [6].

En lámparas de descarga para alumbrado público el ciclo de encendido, con el cual se efectúan los test de vida, es de 12 hs. (11 hs. encendidas y 1 hora apagada). Con ciclos mayores a 6 hs. la influencia en la vida es muy pequeña. Para lámparas de inducción tipo QL no se indica efecto significativo [6].

Análisis efectuados sobre lámparas falladas muestran que un incremento de la tensión de encendido o de la tensión en la lámpara o los ciclos de encendido, no son las únicas causas de fallo. Como resultado de defectos en el proceso intrínseco de fabricación, ocurren **fallos prematuros** que dependen del tipo de lámpara, del proceso mecánico, físico y químico [4]. En lámparas de descarga este tipo de fallo se manifiesta en las primeras 2000 o 3000 horas de operación.

4.2.5.2 Modelos de comportamiento

De la teoría tradicional de fiabilidad se han extraído los conceptos para el análisis de la supervivencia de componentes. En tabla 4.2.5.2-1 se resumen los parámetros fundamentales para el calculo de la fiabilidad o supervivencia $R(t)$ y en figura 4.2.5.2-1 se muestran las representaciones gráficas de estos parámetros para un caso general **Ireson (1966)** [7], **Creus (1992)**[8].

Tabla 4.2.5.2-1: Parámetros de la teoría de fiabilidad

Número inicial de componentes ensayados	N_0			
Número de componentes que sobreviven	$N_s(t)$			
Número de componentes que fallan	$N_f(t)$			
Fiabilidad o Supervivencia	$R(t) = N_s(t)/N_0$ $0 \leq R(t) \leq 1$ $R(0)=1$ $R(\infty)=0$			$R(t) = \exp\left(-\int_0^t I(t) \cdot dt\right)$
Infiabilidad o Mortalidad	$Q(t) = N_f(t)/N_0$ $0 \leq Q(t) \leq 1$ $Q(0)=0$ $Q(\infty)=1$	$Q(t) = 1-R(t)$	$Q(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt$	
Densidad de probabilidad de fallos	$f(t) = dQ(t)/dt$	$f(t) = -R(t)/dt$	$R(t) = \int_t^\infty f(t) \cdot dt$	$f(t) = I(t) \cdot \exp\left(-\int_0^t I(t) \cdot dt\right)$
Tasa instantánea de fallos	$I(t) = f(t)/R(t)$			
Vida media (hasta fallar)	$T = \int_0^\infty t \cdot f(t) \cdot dt$	$T = \int_0^\infty R(t) \cdot dt$		

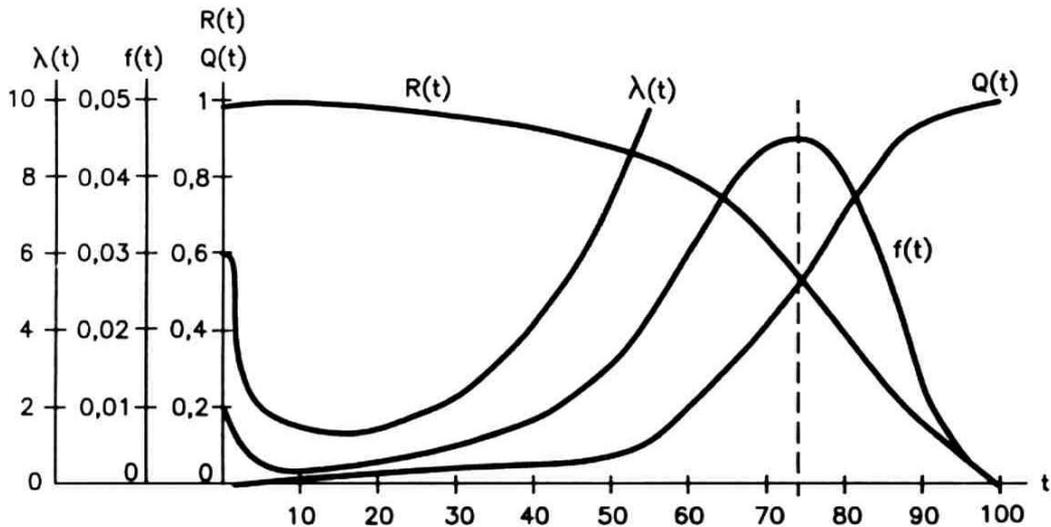


Figura 4.2.5.2-1: Representaciones gráficas de los parámetros de fiabilidad para un caso general [8]

En la figura 4.2.5.2-2 se ha representado la curva de la tasa instantánea de fallos $I(t)$ de un componente cualquiera a fin de describir el comportamiento. La curva se encuentra convenientemente dividida en tres partes. La primera parte se caracteriza por una tasa de fallos decrecientes que corresponde al periodo de fallos prematuras donde fallan los componentes con defectos de fabricación.

La segunda parte corresponde a un periodo donde la tasa de fallas se mantiene constante, se considera el período de vida útil donde las fallas que ocurren son ocasionales. La tercera parte se caracteriza por un crecimiento de las fallas que se producen por desgaste.

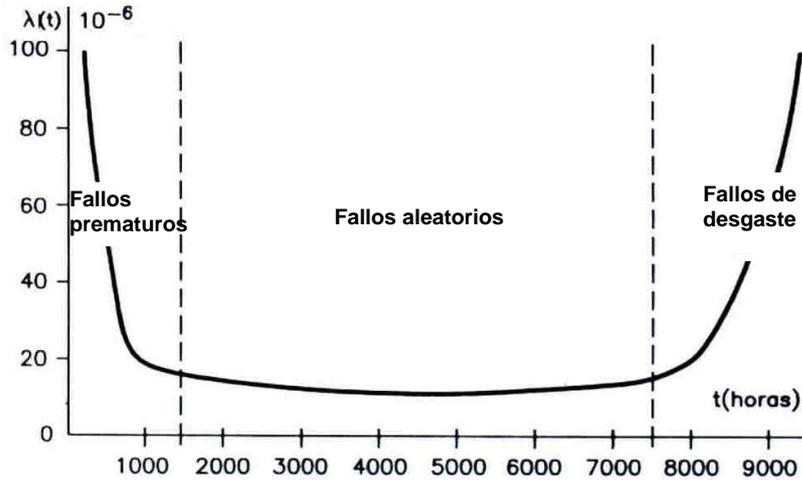


Figura 4.2.5.2-2: Tasa de fallas instantánea típica de componentes fabricados. Las fallas prematuras ocurren en el primer periodo [8].

La forma de la curva real de la tasa instantánea de fallas para un dado componente esta determinada por la naturaleza del mismo. Cuando la hipótesis de tasa de fallos constante no es real y se puede suponer que los fallos crecen o decrecen suavemente con el tiempo tales curvas se pueden aproximar utilizando la función $I(t)$ de Weibull indicada en tabla 4.2.5.2-2.

Tabla 4.2.5.2-2: Parámetros de fiabilidad según Weibull

Tasa instantánea de fallos	$I(t) = \frac{b}{a^b} \cdot t^{b-1}$
Densidad de probabilidad de fallos	$f(t) = \frac{b}{a^b} \cdot t^{b-1} \cdot \exp\left(-\frac{t}{a}\right)^b$
Fiabilidad o Supervivencia	$R(t) = \exp\left(-\frac{t}{a}\right)^b$
Mediana ($R(t_{0,5})=0,5$)	$t_{50\%} = a \cdot [-\ln(1-0,5)]^{1/b}$
Media	$m_T = a \cdot G[1+(1+b)]$
Varianza	$s^2 = a^2 \cdot (G(1+2/b) + G^2(1+1/b)^2)$

donde:

a: es una constante de escala

b: un parámetro que determina la forma de la distribución

G: función gamma $G(x) = \int_0^\infty t^{x-1} \cdot e^{-t} dt$

Si $b < 1$, $I(t)$ disminuye con el transcurso del tiempo, las fallas se deben a fallas prematuras. Si $b=1$, $I(t)$ es constante y la función de densidad $f(t)$ es exponencial, comportamiento característico de fallas ocasionales. Si $b > 1$ $I(t)$ crece en forma monótona, las fallas ocurren por desgaste o envejecimiento. Para $3 \leq b \leq 4$ la función de densidad $f(t)$ tiene una distribución normal.

En figuras 4.2.5.2-3 a 4.2.5.2-5 se han graficado los parámetros de Weibull para b igual a 1, 2, 3,5 y 11. Para $b = 3,5$ se observa que la distribución de densidad de probabilidad es prácticamente normal con lo cual la función de fiabilidad o supervivencia tiene una forma característica con un punto de inflexión en $R(t) = 0,5$.

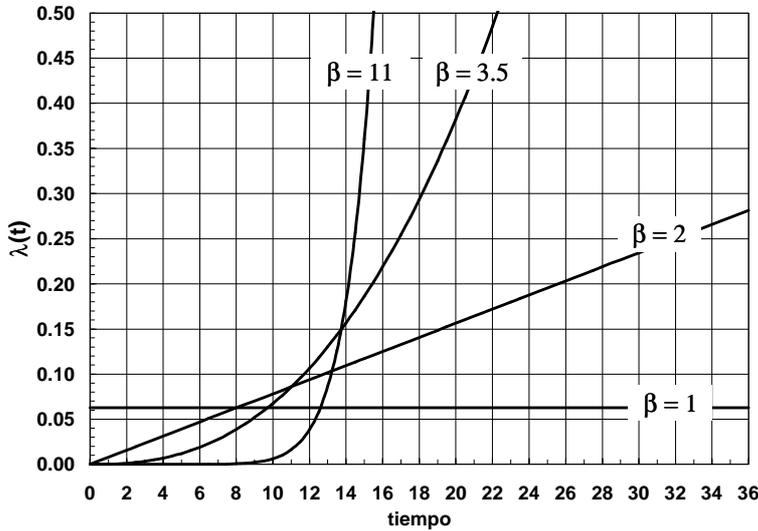


Figura 4.2.5.2-3: Tasa instantánea de fallo según Weibull para $\alpha=16$, y $\beta = a$ 1, 2, 3,5 y 11. Tiempo en Khs.

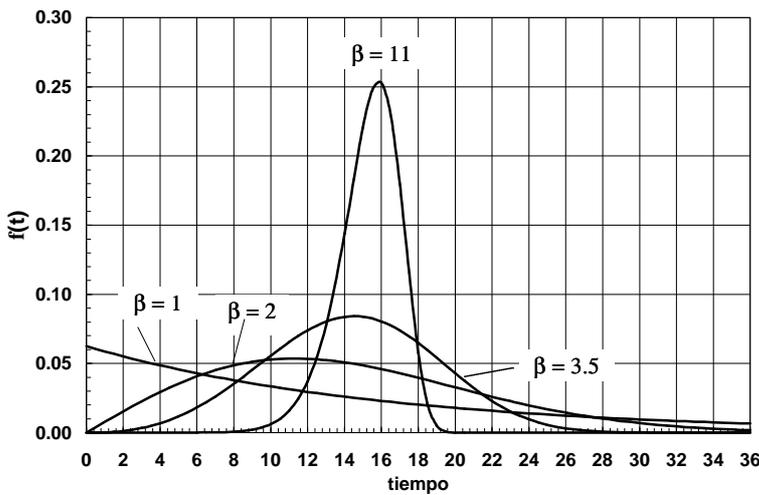


Figura 4.2.5.2-4: Densidad de fallo según Weibull en función de tiempo [Khs] para $\alpha=16$, y $\beta = a$ 1, 2, 3,5 y 11.

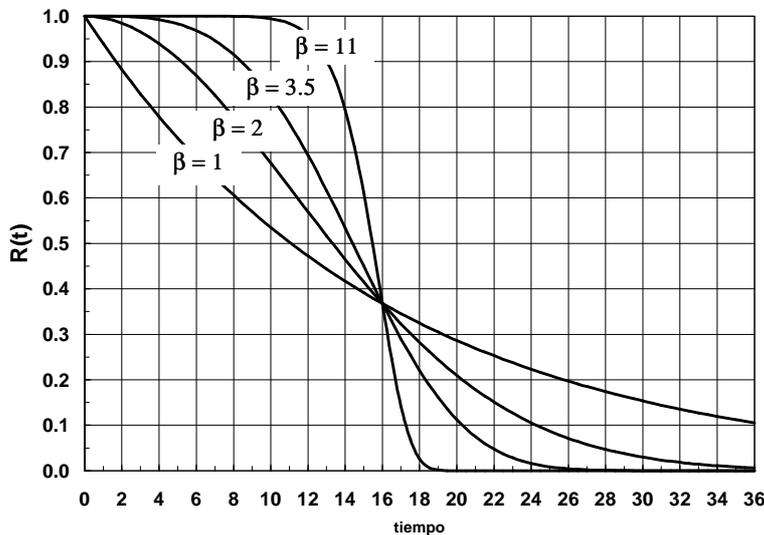


Figura 4.2.5.2-5: Fiabilidad o supervivencia según Weibull en fin de tiempo [Khs] para $\alpha=16$, y $\beta = a$ 1, 2, 3,5 y 11.

La función de fiabilidad también puede expresarse en una forma más simple con un cambio de parámetros $q=1/a^b$, como se indica en ecuación 4.2.5.2-1:

$$R(t)=\exp(-q.t^b) \quad 4.2.5.2-1$$

Establecer un modelo de comportamiento de para la supervivencia de un componente requiere suponer ciertas hipótesis de distribución de la densidad de probabilidad de fallas. De acuerdo a la información general de fabricantes la curva de supervivencia típica de lámparas de descarga correspondería a la indicada en figura 4.2.5.2-6 **IESNA Ch6(2000)**[9] donde la supervivencia se expresa en función del porcentaje de la vida media de la lámpara, que se define como la duración de una muestra representativa operando bajo condiciones eléctricas, térmicas y mecánicas normalizadas hasta alcanzar el 50% de supervivencia o mortalidad **IESNA LM-47 (1995)** [10].

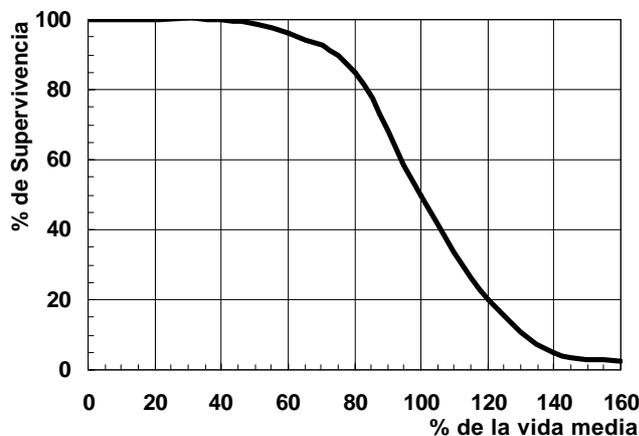


Figura 4.2.5.2-6: Curva de supervivencia típica de lámparas de descarga para una muestra representativa en función del % de vida media.

La forma de la curva de supervivencia, denominada de ahora en adelante $LSF(t)$ (Lighting Survival Factor para unificar designaciones con la CIE) por analogía con la distribución Weibull sugiere una densidad de probabilidad de fallos normal y por lo tanto una tasa instantánea de fallos exponencial. Es de suponer que los registros analizados de fallos correctivos de lámparas se distribuyen siguiendo una tendencia como la indicada en figura 4.2.5.2-6 con lo cual el ajuste de la supervivencia de los datos podría efectuarse con la función exponencial :

$$LSF(t) = \exp(-a.t^b) \quad 4.2.5.2-1$$

donde un parámetro $b > 1$ es de esperar en el caso de lámparas (q se ha reemplazado por a)

Marsden (1993) [11] propone como ajuste de la curva de supervivencia una función del tipo exponencial modificada como la indicada en ecuación 4.1.1.2-1, la cual es válida hasta $LSF(t)=0,5$. Esta función, según Marsden, indicaría ser más apropiada que ajustes de tipo exponencial, lineal y que un ajuste mediante polinomio.

$$LSF(t) = u + (1-u).e^{-p.t} \quad \text{con } u > 0 \text{ y } p > 0 \quad 4.1.1.2-1$$

Las funciones de supervivencia de lámparas, ajustadas con una función del tipo descrito anteriormente, muestran en algunos casos diferencias significativas para los distintos tipos de lámparas como se ejemplifica en la siguiente sección.

4.2.5.3 Datos de fabricantes

Los fabricantes realizan tests de vida que comportan largos periodos de funcionamiento bajo condiciones determinadas [10] a fin de determinar los mecanismos físicos de fallas y recopilar datos estadísticos que permitan hacer predicciones de la duración.

Curvas de supervivencia (valores medios) en función del tiempo de servicio para distintos tipos de lámparas empleadas en alumbrado público fueron construidas por el autor a partir de datos publicados por **Philips (1995)** [6] las que se indican en figuras 4.2.5.3-1 y 4.2.5.3-2. Las curvas indicadas en las figuras representan valores medios muestrales, obtenidos bajo condiciones de laboratorio. Existe cierta dispersión, que por simplificar las figuras, no se han indicado a fin de poder facilitar una comparación del comportamiento de las distintas lámparas. La banda de dispersión suele indicar la zona del intervalo de confianza del 95%. Esto significa que dos curvas muy próximas tendrán seguramente superpuestas sus bandas de dispersión resultando tener ambas comportamientos similares.

De figuras 4.2.5.3-1 y 4.2.5.3-2 se observa que el mejor comportamiento lo presenta la lámpara de Sodio de alta presión, en particular la de 250W, frente a las de mercurio a excepción de la lámpara de inducción cuya vida media se estima en 60.000hs.

Los parámetros u y p obtenidos para los ajustes exponenciales modificados de las curvas de figuras 4.2.5.3-1 y 4.2.5.3-2 se indican en tabla 4.2.5.3-1.

Tabla 4.2.5.3-1 Parámetros u y p del ajuste exponencial $LSF(t) = u + (1-u).e^{-pt}$

Lámpara	u	p
Sodio AP 50-70W	1.173	-0.00005
Sodio AP 150W	1.017	-0.00013
Sodio AP 250W	1.017	-0.00012
Sodio AP 400W	1.043	-0.00011
Sodio AP 1000W	1.8	-0.00003
Sox	1.051	-0.00013
Mercurio 50-125W	1.078	-0.00010
Mercurio 250-400W	1.1053	-0.00011
Mercurio 700-1000W	1.207	-0.00010
Inducción QL	1.3	-0.00001
T8 18-58W inductivo	1.00074	-0.00042

Las curvas de supervivencia son necesarias para establecer el esquema de sustituciones más conveniente el cual será un factor a considerar al establecer una ecuación de costos.

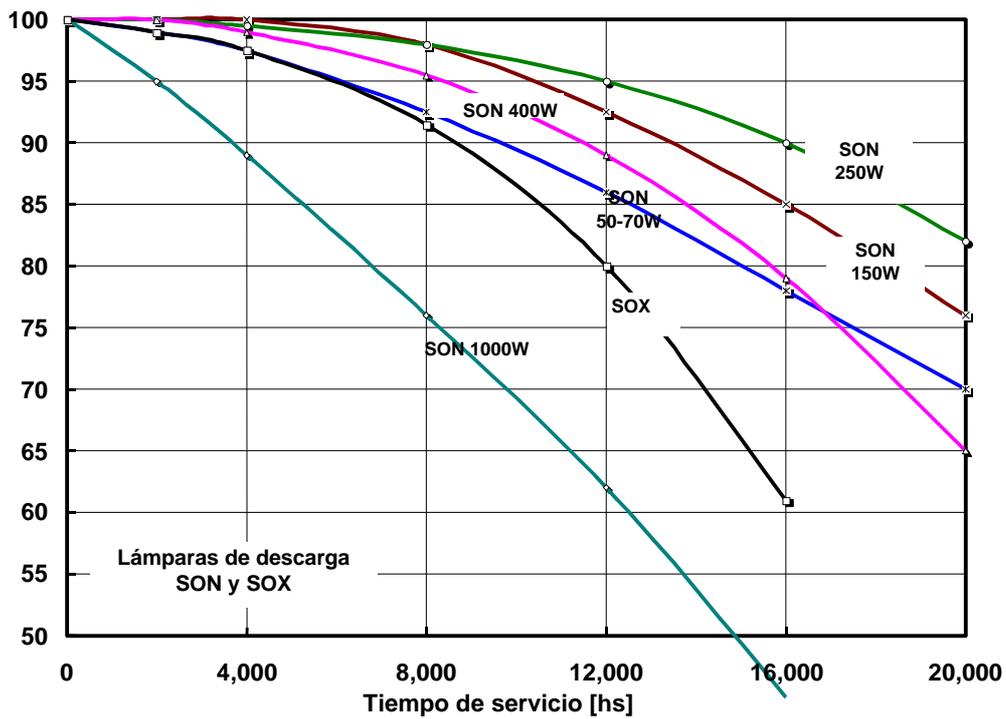


Figura 4.2.5.3-1 Supervivencia de lámparas de sodio de alta presión, Son y Sox para distintas potencias. Gentileza de Philips Argentina [6].

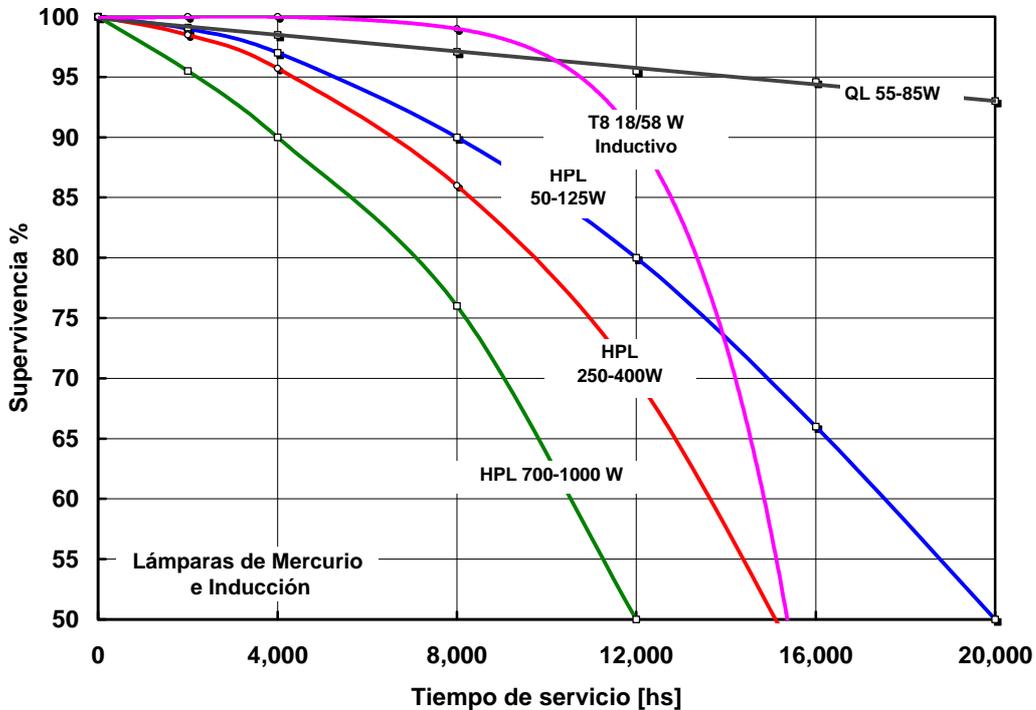


Figura 4.2.5.3-2 Supervivencia de lámparas de Mercurio e Inducción para distintas potencias. Gentileza de Philips Argentina [6].

Fallas en la fabricación, en el control de calidad o en la homologación de conformidad según normas pueden dar como resultado que la respuesta real difiera de la indicada por el fabricante. En ese sentido, **Burrage (1993)** [12] informa sobre un comportamiento irregular de ciertas lámparas, en particular las de descarga de baja potencia (50W), las que han mostrado ciertas discrepancias con los datos publicados por los fabricantes. En figura 4.2.5.3-3 se observa que al cabo de dos años de utilización de la instalación, el porcentaje acumulado de fallas medio fue del 65% contra el 92% previsto por fabricantes.

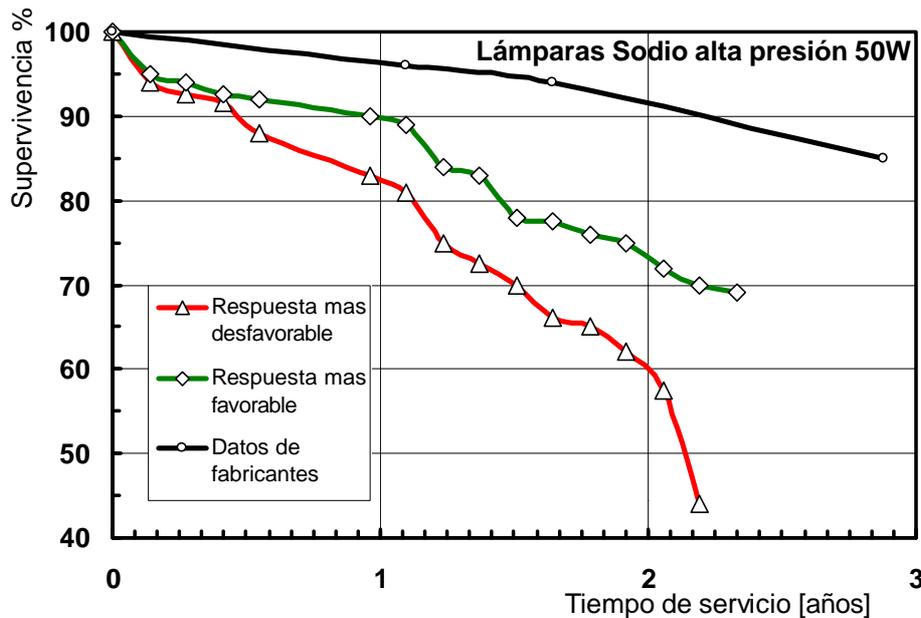


Figura 4.2.5.3-3: Datos de fallas de lámparas Sodio de alta presión de 50W, sobre una muestra de 306 puntos de luz. Proyecto FIAT Lux Australia [12].

Las curvas de supervivencia son necesarias para establecer el esquema de sustituciones más conveniente el cual será un factor a considerar al establecer una ecuación de costos.

La confiabilidad del modelo de comportamiento dependerá en gran medida de las condiciones de trabajo reales de las lámparas. En la práctica corriente, parámetros tales como tensión, temperatura, vibraciones, calidad de los equipos auxiliares, diseño térmico de la luminaria etc., distintos a los empleados en los test de laboratorio, pueden alterar la respuesta de las lámparas ostensiblemente.

Las diferencias encontradas justifican el estudio del modelo de comportamiento de los componentes locales para poder predecir resultados confiables. Por otra parte, es conveniente mantener un control periódico mediante estadísticos de datos acumulados de modo de asegurar la calidad y uso apropiado de los distintos componentes.

4.2.5.4 Modelización de datos de registros históricos

Con el objeto de obtener una curva de supervivencia para cada tipo de lámpara utilizada se filtraron los datos de operaciones de mantenimiento mediante un programa realizado por el autor. La base de datos contiene registros de operaciones correctivas desde que se comenzaron a almacenar los datos, intercalados con las operaciones de cambios masivos. Un programa filtro, identifica y separa las primeras fallas correspondientes a lámparas fundidas para cada tipo y potencia cuando ocurren entre dos cambios masivos. Los tipos de fallas se encuentran convenientemente codificadas junto a la fecha de operación en la base de datos. El programa calcula además la duración de la lámpara, estimada como el tiempo transcurrido desde el cambio masivo hasta la fecha de operación correctiva. Los datos filtrados de este modo simulan proceder de un test de duración de vida. A pesar de que se presentan algunas repeticiones de operaciones correctivas dentro de un mismo cambio masivo, no fueron consideradas para poder aplicar un modelo estadístico sin remplazamiento apropiado.

Los parámetros a y b del modelo de Weibull en test de duración de vida sin reemplazamiento pueden ser estimados aplicando la técnica descrita en el anexo 4.1. Los resultados obtenidos para lámparas de mercurio de 80W, 125W, 250W y 400W se indican en figuras 4.2.5.4-1 a 4.2.5.4-4 respectivamente y en figura 4.2.5.4-5 para todas las lámparas de mercurio analizadas. En forma analoga para lámparas de sodio de alta presión de 150W, 250W y 400W se ha indicado en figuras 4.2.5.4-6 a 4.2.5.4-9. Los parámetros a , b y u , p se resumen en la tabla 4.2.5.4-1.

Tabla 4.2.5.4-1: Parametros del modelo de Weibull $LSF(t) = \exp(-a.t^b)$ y de la exponencial modificada de Marsden $LSF(t) = u + (1-u).e^{-pt}$

Lámpara	Potencia	a	b	u	p
Mercurio	80W	5.098 E-05	1.015	3	-2.0 E-05
	125W	1.098 E-05	1.188	3	-1.9 E-05
	250W	3.795 E-05	1.0067	4,3	-1.0 E-05
	400W	0.347 E-05	0.738	3,6	-1.0 E-05
Sodio A.P.	150W	5.593 E-05	0.948	3.0	-1,2 E-05
	250W	16.2 E-05	0.7316	1,5	-2,75E-05
	400W	0.41 E-05	1.261	1,97	-3,0 E-05

De las figuras se puede observar que la función Weibull presenta un mejor ajuste a los datos la función exponencial modificada, en particular para lámparas de mercurio. Con los datos de lámparas de Sodio esta situación se revierte debido a tres motivos principales:

- menor cantidad de datos disponibles por ser un conjunto menor en la muestra (15% frente al 75% de mercurio)
- mayor supervivencia por las características intrínsecas de este tipo de lámparas
- datos de operaciones correctivas con los cuales se ha simulado un test de duración de vida interrumpido en el cambio masivo cuya duración es respecto de la vida media es menor en lámparas de sodio que en mercurio con lo cual el porcentaje de lámparas falladas es menor.

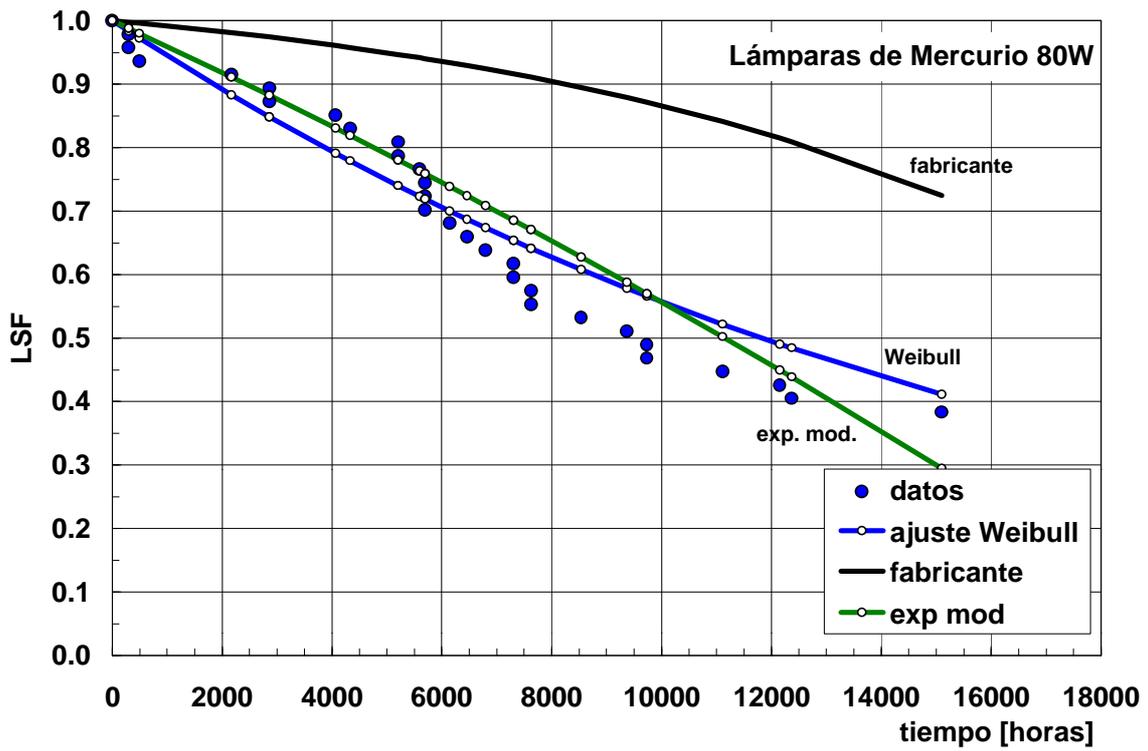


Figura 4.2.5.4-1: Curvas de Supervivencia de lámparas de Mercurio 80W ajuste según Weibull para datos de registros históricos de Vic.

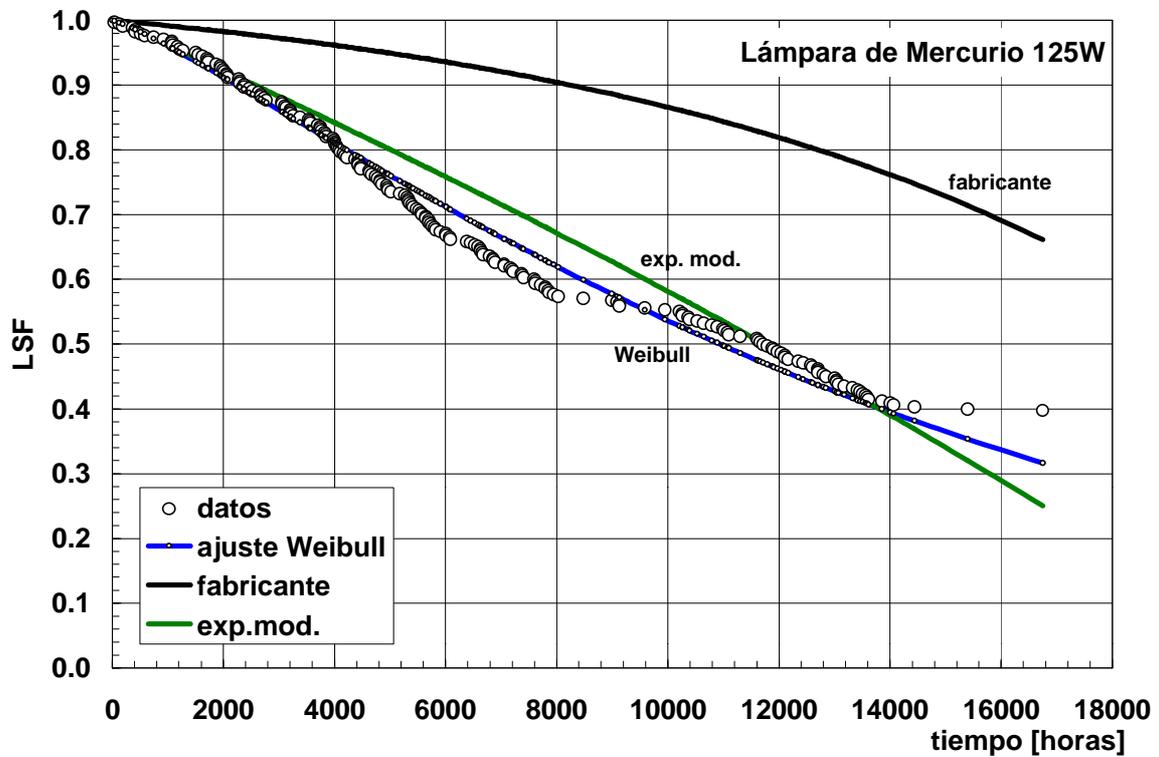


Figura 4.2.5.4-2: Curvas de Supervivencia de lámparas de Mercurio 125W, ajuste según Weibull para datos de registros históricos de Vic.

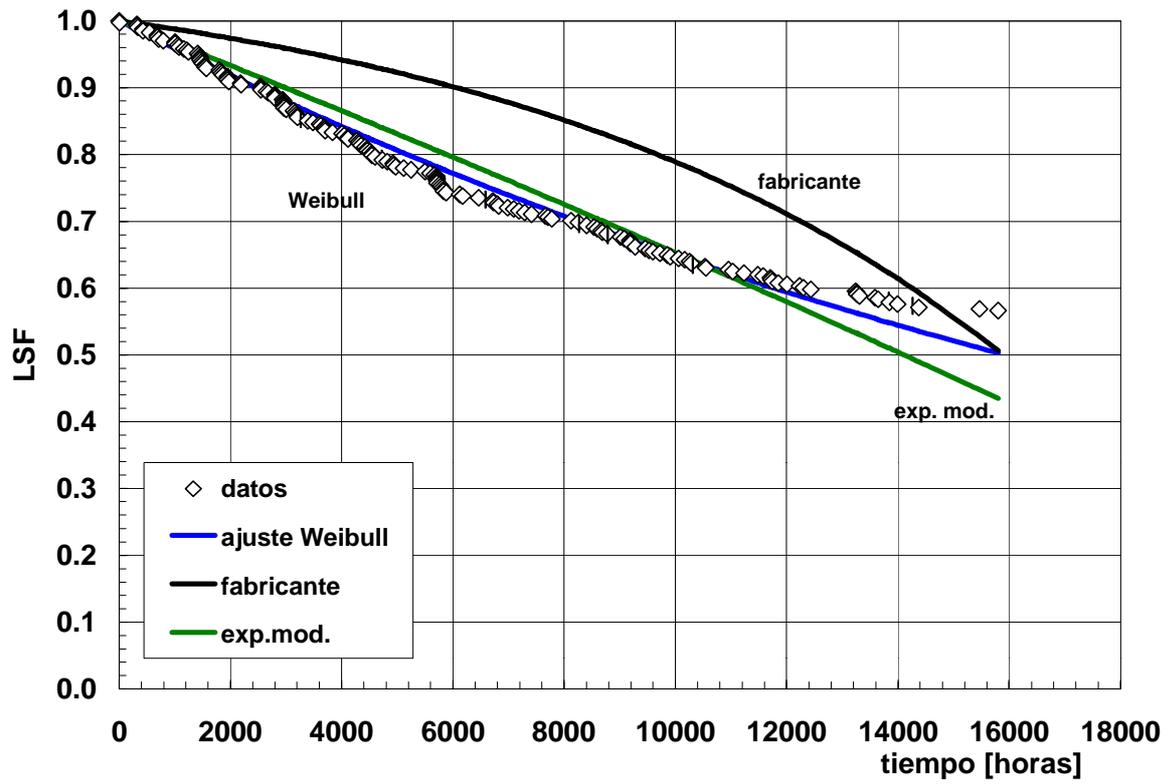


Figura 4.2.5.4-3: Curvas de Supervivencia de lámparas de Mercurio 250W ajuste según Weibull para datos de registros históricos de Vic.

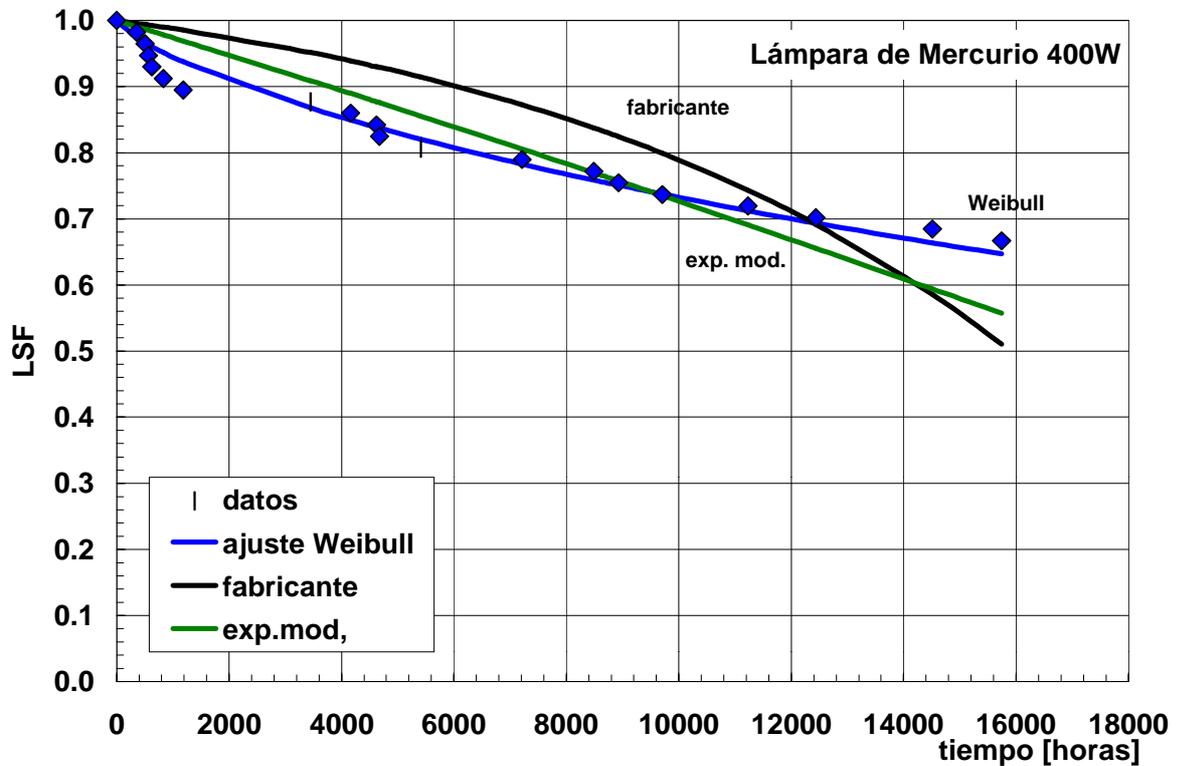


Figura 4.2.5.4-4: Curvas de Supervivencia de lámparas de Mercurio 400W, ajuste según Weibull para datos de registros históricos de Vic.

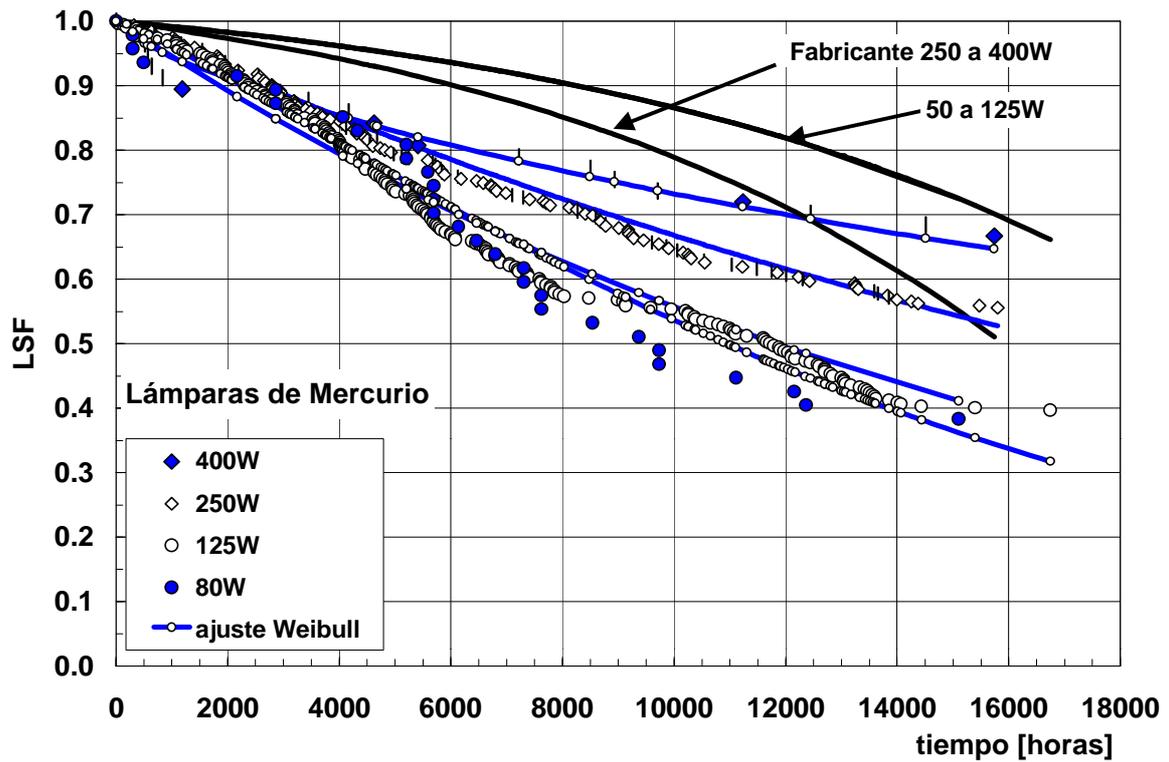


Figura 4.2.5.4-5: Curvas de Supervivencia de lámparas de Mercurio 80W, 125W, 250W y 400W de los registros analizados junto a curvas según fabricantes.

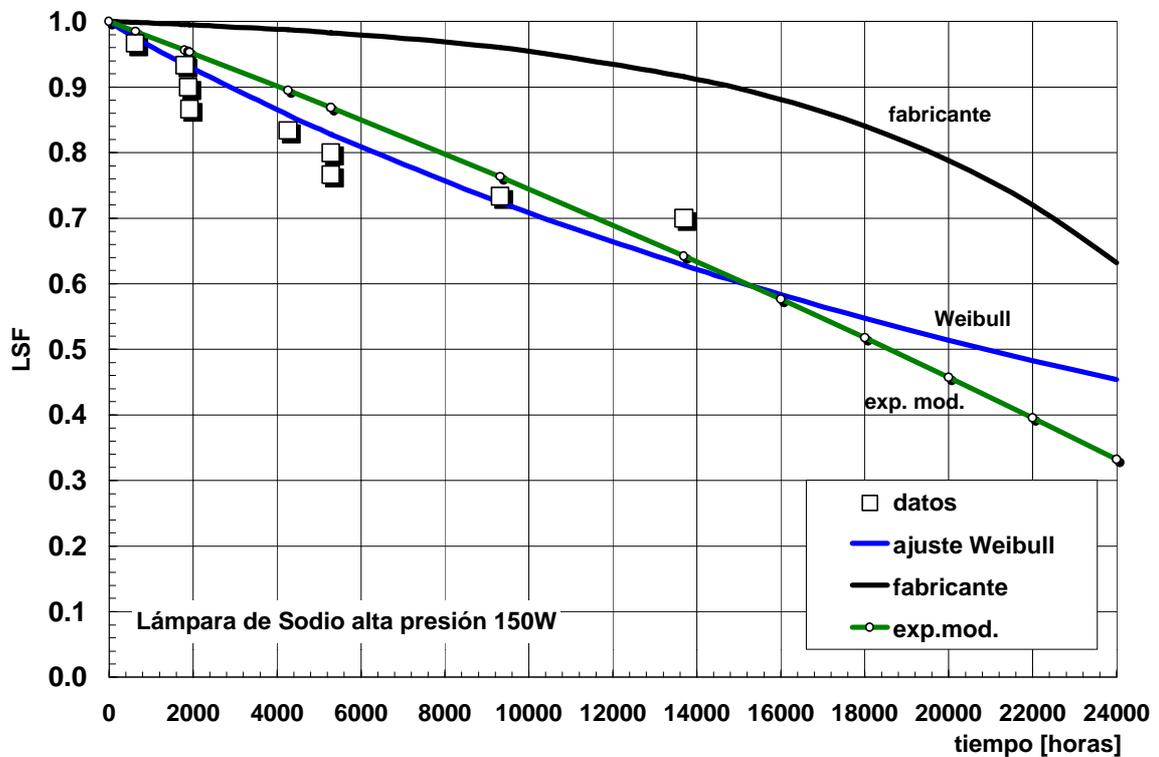


Figura 4.2.5.4-6: Curvas de Supervivencia de lámparas de Sodio de alta presión de 150W. Ajuste según Weibull y exponencial modificada para datos de registros históricos de Vic y datos de fabricante.

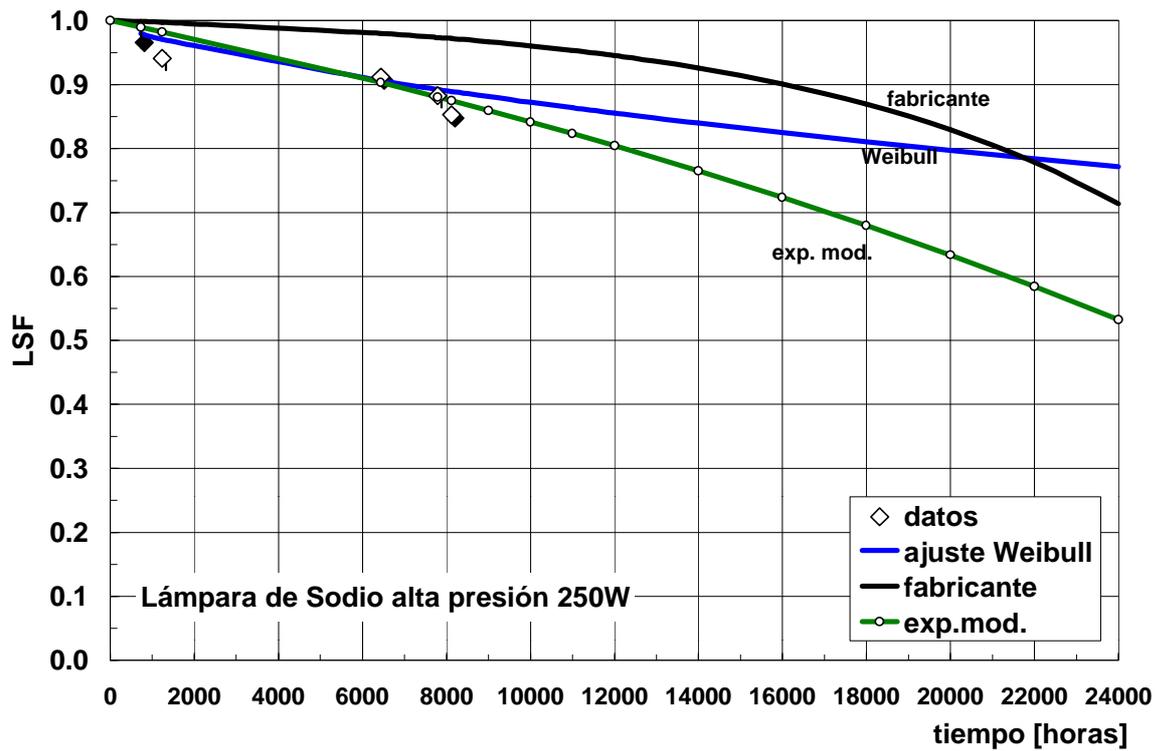


Figura 4.2.5.4-7: Curvas de Supervivencia de lámparas de Sodio de alta presión de 250W. Ajuste según Weibull y exponencial modificada para datos de registros históricos de Vic y datos de fabricante.

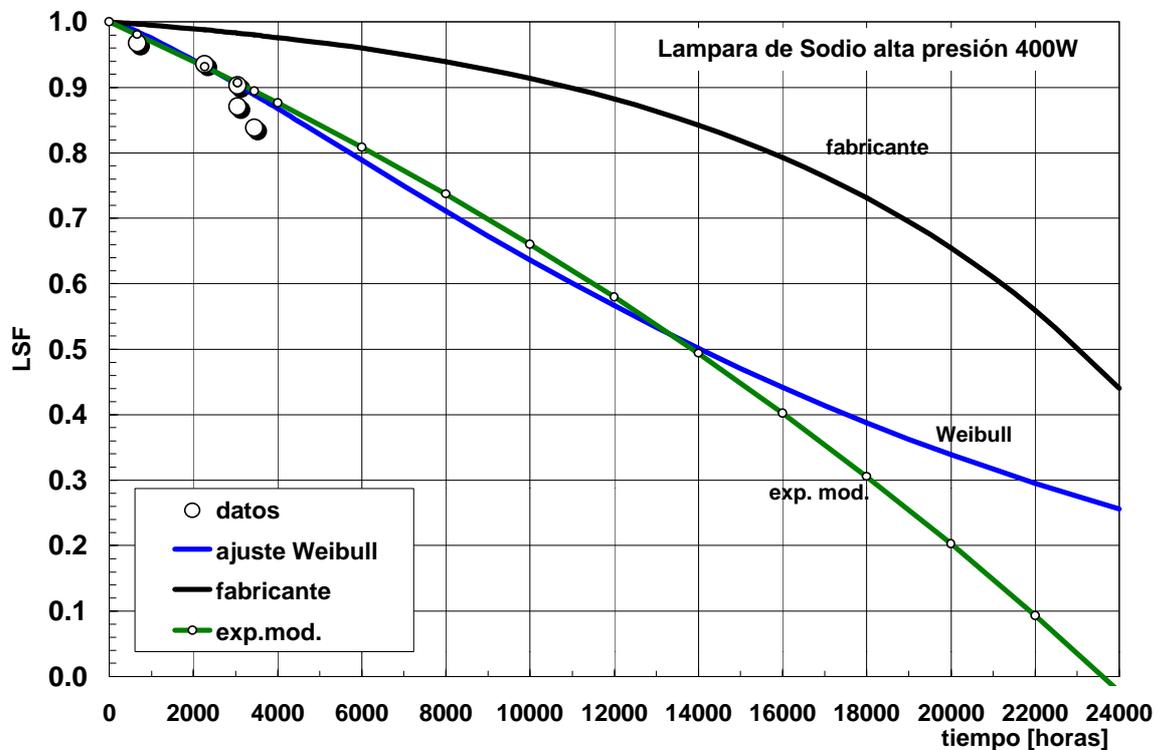


Figura 4.2.5.4-8: Curvas de Supervivencia de lámparas de Sodio de alta presión de 400W. Ajuste según Weibull y exponencial modificada para datos de registros históricos de Vic y datos de fabricante.

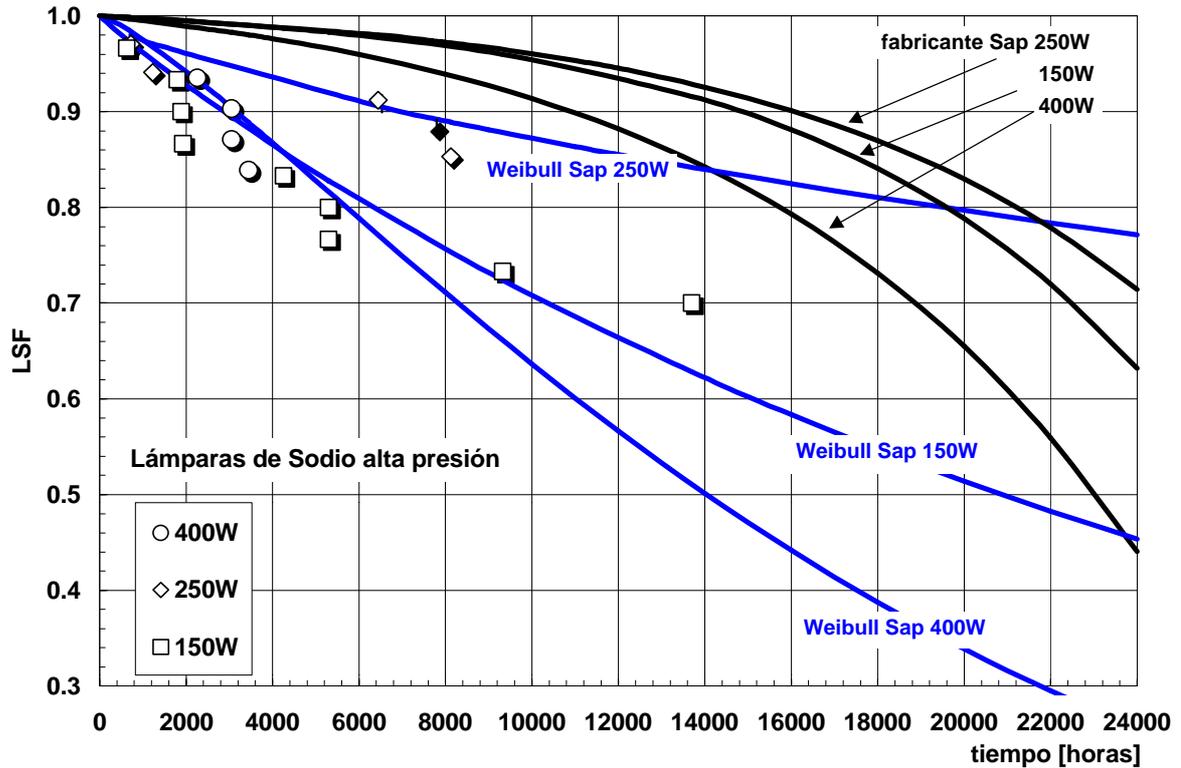


Figura 4.2.5.4-9: Curvas de Supervivencia de lámparas de Sodio de alta presión de 150, 250 y 400W, ajuste según Weibull para datos de registros históricos de Vic y curvas de un fabricante.

Un análisis estadístico de los datos muestra que las curvas para lámparas de mercurio de 80 y 125W no difieren significativamente (la probabilidad de rechazar la hipótesis nula de igualdad se ha realizado con un nivel de significación del 5%).

Se observa también de las figuras que las curvas de supervivencia de datos provistos por fabricantes difieren de las curvas de datos históricos, en general muestran valores más bajos. La vida media (tiempo hasta el 50% de supervivencia) $T_{50\%}$ para las lámparas de la muestra estudiada se reduce en los porcentajes indicados en tabla 4.2.5.4-2 salvo para mercurio de 400W.

Tabla 4.2.5.4-2: Porcentajes de reducción de $T_{50\%}$ para los datos estudiados respecto de datos de fabricante.

Lámpara	Potencia	datos	Fabricante	% reducción
Sodio A.P.	150	20.000	~ 26.000	+23
	250	24.000	~ 28.000	+15
	400	14.000	23.000	+40
Mercurio	80	11.000	20.000	-45
	125	11.000	20.000	-45
	250	16.000	16.000	0
	400	>18.000	16.000	>+20

Estas diferencias muy posiblemente se deban a que en la vida real las condiciones de funcionamiento difieren de las condiciones bajo las cuales se efectúan en laboratorio.

Por los motivos expuestos resulta conveniente considerar como modelo de comportamiento para instalaciones con lámparas de mercurio el modelo Weibull, y para lámparas de sodio, el modelo exponencial modificado hasta tanto sea posible disponer de datos históricos confiables de instalaciones reales con periodos de cambios masivos mayores lo cual no es frecuente.

La supervivencia de las lámparas no es el único parámetro necesario para describir su comportamiento. Por ejemplo en lámparas de mercurio la vida media es de 18.000 hs según los fabricantes analizados, sin embargo las lámparas que sobrevivan continuaran funcionando pero con una considerable disminución de producción de luz y cambio de color, mientras tanto el consumo de energía se mantendrá. En lámparas de Sodio de alta presión el comportamiento es diferente. El final de la vida esta indicado por un reiterado ciclo de apagados y encendidos en cuyo caso si no se efectúa el cambio correspondiente se daña al resto del equipo auxiliar **IESNA, DG-4 (1993)** [13].

El cambio oportuno de las lámparas dependerá, entre otros aspectos, de la supervivencia de las mismas y de la respuesta temporal del flujo luminoso lo que será analizado en la sección siguiente.

4.3 Depreciación del flujo luminoso

4.3.1 Causas

Durante la vida de las lámparas de descarga el flujo luminoso se reduce gradualmente lo que se conoce como depreciación del flujo de la lámpara. En lámparas de descarga la depreciación se debe frecuentemente a la evaporación de material del electrodo, dentro del tubo de descarga, donde termina el arco luminoso y a la acumulación sobre las paredes o regiones inmediatamente adyacentes lo cual produce un oscurecimiento gradual del tubo de descarga. Otra causa posible es la reducción en la transmitancia del tubo de descarga y/o del bulbo de vidrio exterior. En lámparas con bulbo exterior, provisto de un recubrimiento interior de polvo fluorescente, al oscurecerse el tubo de descarga el polvo fluorescente recibe menos radiación UV con lo cual es menor la producción de luz visible. El deterioro del polvo fluorescente mismo es otra posible causa de depreciación [4]. La influencia de la depreciación en la frecuencia de sustitución de lámparas debe ser considerada si se desean mantener ciertas condiciones mínimas de iluminación durante el transcurso de la vida útil de la instalación. En la etapa del proyecto de una instalación, además de considerar aspectos económicos de la misma, los costos de gestión, explotación, mantenimiento, eliminación etc., determinarán también las estrategias seguir [14]. Dependiendo del tipo de lámpara la reducción de flujo por depreciación puede ser estimada a partir de:

- Sodio de baja presión menor de 0,25% cada 1000h.
- Sodio de alta presión del orden del 1% cada 1000 h. de operación.
- Mercurio (250 a 400W) del orden del 1,15% cada 1000 h de operación

El flujo luminoso de la lámpara será también dependiente de las características del balasto utilizado lo cual se considera mediante el factor de balasto.

4.3.2 Datos de fabricantes y modelos de ajuste

Actualmente los fabricantes de lámparas proveen datos de reducción de flujo luminoso para distintos tipos y potencias, obtenidos bajo condiciones de funcionamiento controladas, [10] que se refieren a tensión de operación constante, ciclos de apagado y encendido fijos (11 hs encendido y 1 hora apagado), y posición de funcionamiento definida. Cabe destacar que en la practica las condiciones reales de operación pueden desviarse de las de ensayo, alterando las características de funcionamiento por ejemplo a mayor tensión de la nominal las lámparas producen en general mayor flujo luminoso y a mayor ciclos de encendido, menor duración.

En figuras 4.3.2-1 y 4.3.2-2, se muestra el efecto del envejecimiento o reducción del flujo luminoso con el uso, de lámparas de descarga, $LLO(t)$ (Lamp Lumen Output) correspondientes a datos provistos por un fabricante [6]. Para lamparas de un mismo tipo se observa que la depreciación afecta en forma muy distinta de acuerdo a la potencia de las lámparas. En lámparas de sodio, el efecto de la depreciación en el flujo es menor a medida que aumenta la potencia, tendencia que se manifiesta hasta 250W; valor a partir del cual aumenta. En tabla 4.3.2-1 se indican los parámetros de ajuste mediante una función exponencial modificada del tipo de Marsden $LSF(t) = u + (1-u).e^{-pt}$ donde el parámetro $p > 0$.

Es conveniente tener en cuenta, en la etapa de selección de la lámpara, el posible ahorro que puede obtenerse durante la explotación de la instalación al emplear una fuente luminosa con menor depreciación. En las lámparas de mercurio el efecto de la depreciación del flujo aumenta con la potencia lo cual se manifiesta en las figuras.

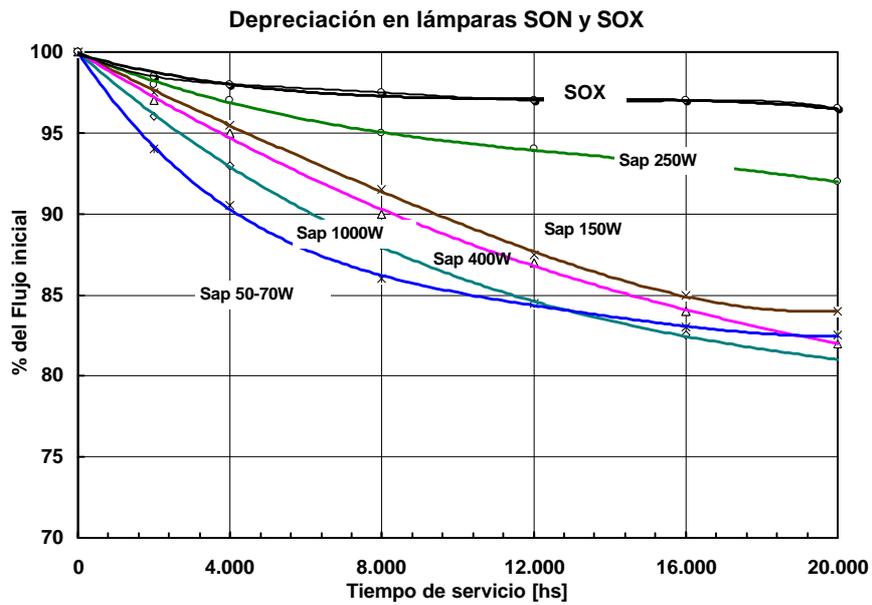


Figura 4.3.2-1: Depreciación del flujo luminoso para lámparas de Sodio A.P. y baja presión a partir de 100hs cuando se han estabilizado. Gentileza de Philips Lighting Argentina [6].

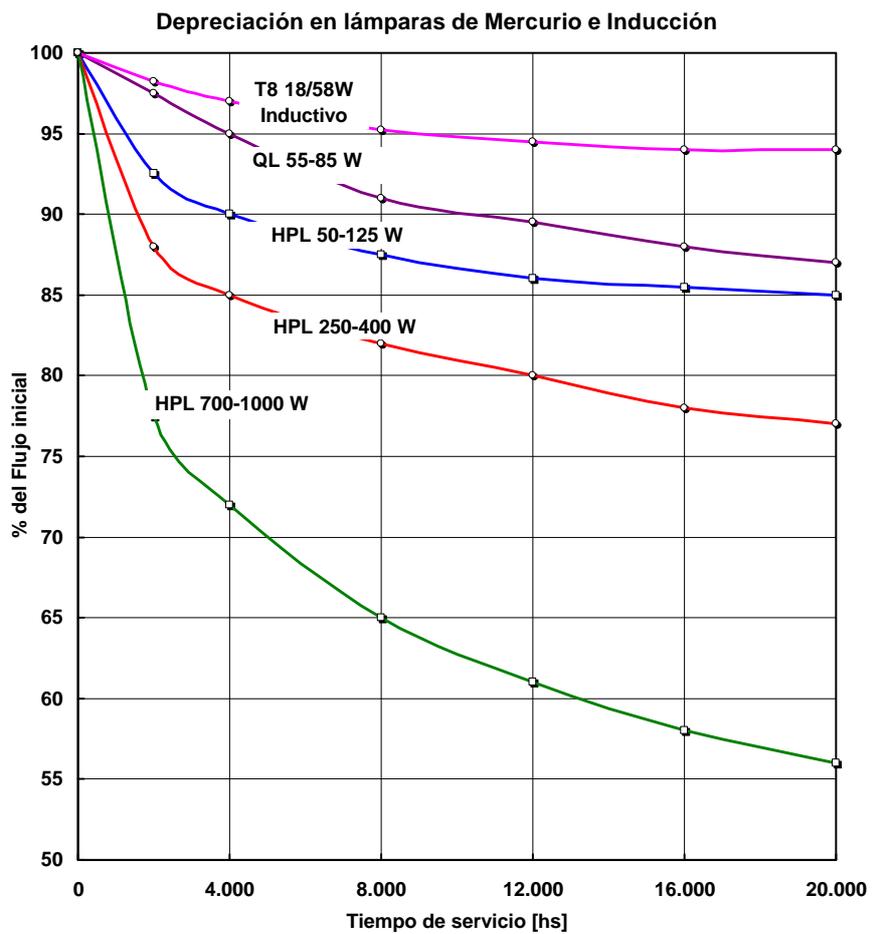


Figura 4.3.2-2: Depreciación del flujo luminoso para lámparas de mercurio, a partir de las 100 hs de funcionamiento cuando se han estabilizado. Gentileza de Philips Argentina [6].

Tabla 4.3.2-1 Parámetros de ajuste mediante una función y de la exponencial modificada de Marsden $LLO(t) = u + (1-u).e^{-pt}$ donde el parámetro $p > 0$.

Lámpara	u	p
Sodio AP 50-70W	0.83	0.22
Sodio AP 150W	0.80	0.078
Sodio AP 250W	0.91	0.1
Sodio AP 400W	0.78	0.079
Sodio AP 1000W	0.78	0.1
Sodio BP	0.96	0.13
FT T8 18/58W inductivo	0.93	0.12
Inducción 55-85W	0.85	0.1
Mercurio 50-125 W	0.85	0.28
Mercurio 250-400 W	0.76	0.21
Mercurio 700-1000 W	0.56	0.27

4.3.3 Factor de balasto

El flujo luminoso de una lámpara, a partir de las 100hs. de uso, es un dato normalmente provisto por los fabricantes. La medición se efectúa bajo condiciones de laboratorio (temperatura constante 25°C, etc.) con balasto de referencia.

En la instalación real el balasto empleado diferirá del de referencia en un factor que afectará directamente el flujo de la lámpara. El factor de ajuste se denomina factor de balasto, FB y puede variar de $0,85 \leq FB \leq 1$. El factor de balasto no es una característica exclusiva del balasto sino del conjunto lámpara – balasto. Si un tipo de balasto puede operar con varias lámparas (distintos fabricantes por ejemplo) el FB puede ser distinto en cada caso. Tampoco es una medida de la eficiencia del conjunto ya que si reduce el flujo de la lámpara posiblemente reduzca el consumo en la misma medida **Eley et al. (1993)[15]**.

El FB es un dato usualmente provisto por el fabricante con el que se afectará el flujo de la lámpara en un nuevo diseño. En instalaciones existentes es conveniente verificar el estado de los balastos instalados mediante mediciones de iluminancia antes y después de la sustitución por nuevos balastos para incorporar este parámetro en el balance al momento de evaluar una instalación.

4.4 Depreciación por polución y envejecimiento

La acumulación de suciedad y polvo atmosférico en la lámpara y en las partes ópticas de la luminaria (reflector, cubierta etc.) afecta el rendimiento. La rapidez y severidad de la acumulación de suciedad varía de acuerdo a la naturaleza y construcción de la luminaria, altura de montaje, grado de polución de la atmósfera, la cual a su vez depende del volumen y naturaleza del tráfico, clima, viento, etc. Existe también una depreciación por deterioro y envejecimiento de las superficies transmisoras o reflectoras debido a la oxidación, efectos del calor y la radiación ultravioleta, efectos químicos etc.

La depreciación de la luminaria sin considerar la lámpara $LOR(t)$ (luminaire output ratio) es una función del tiempo cuya forma y grado de dependencia con parámetros de diseño se analiza en la siguiente sección.

4.4.1 Modelos de depreciación de luminarias

Van Dusen (1971) [16] estudia la depreciación por polución atmosférica para distintas categorías de luminarias y tipos de ambientes. De los tipos de luminarias que analiza se ha seleccionado las curvas correspondientes a luminarias descritas como cerradas provistas de buenas juntas mecánicas de cierre para hacer una analogía con la situación actual donde se emplean luminarias con buena hermeticidad. En la figura 4.4.1-1 (en trazo fino) se grafican las curvas de reducción del flujo respecto del inicial para luminarias con buen cierre mecánico en cinco categorías de ambiente, los cuales se describen en la tabla 4.4.1-1.

La IESNA [13] ha adoptado parcialmente los resultados de Van Dusen, considerando sólo un período de 8 años para el cual realiza un ajuste de los datos. Las curvas se han representado en trazo grueso en la figura 4.4.1-1. Bajo las condiciones más desfavorables, de ambiente muy sucio, el efecto sobre el flujo emitido por las luminarias (sin considerar la depreciación de la lámpara) produce una reducción del 30% respecto del inicial al cabo de 8 años.

El **APLE TR8(1977)** [17] (Association of Public Lighting Engineers) realizó una serie de tests, tendientes a determinar los efectos de la depreciación en instalaciones de alumbrado público, estudiando el efecto de la acumulación de suciedad en el exterior e interior de la luminaria, depreciación de los componentes ópticos, beneficios del cierre hermético y cambios en las características fotométricas.

De los datos originales publicados se han extraído los resultados obtenidos en la localidad de Leicester, que a criterio del autor de esta tesis, son los más apropiados por discriminar tres categorías de ambiente de acuerdo a la densidad de tráfico automotor los que en gran medida están relacionados con la contaminación atmosférica local y la presencia de polvo para caracterizar el ambiente ya que no se indica la existencia de otras fuentes. Las curvas correspondientes se indican en figura 4.4.1-2 y las descripciones de las características de los ambientes en la tabla 4.4.1-2.

Tabla 4.4.1-1: Categorización de los ambientes según Van Dursen [16]

Categoría de ambiente	Entorno	Trafico	Partículas en suspensión
Muy limpio	Ausencia de actividades cercanas que generen humos o polvo y baja contaminación ambiental	Escaso generalmente limitado a zonas residenciales o áreas rurales	0 a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Limpio	Ausencia de actividades cercanas que generen humos o polvo y baja contaminación ambiental	Moderado a intenso	150 a 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Moderado	Presencia de algunas actividades que generen humos o polvo		300 a 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Sucio	Presencia de humos o polvo generado por actividades cercanas que pueden ocasionalmente envolver la luminaria		600 a 1200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Muy sucio	Presencia de humos o polvo generado por actividades cercanas que frecuentemente envuelven la luminaria		1200 a 2400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

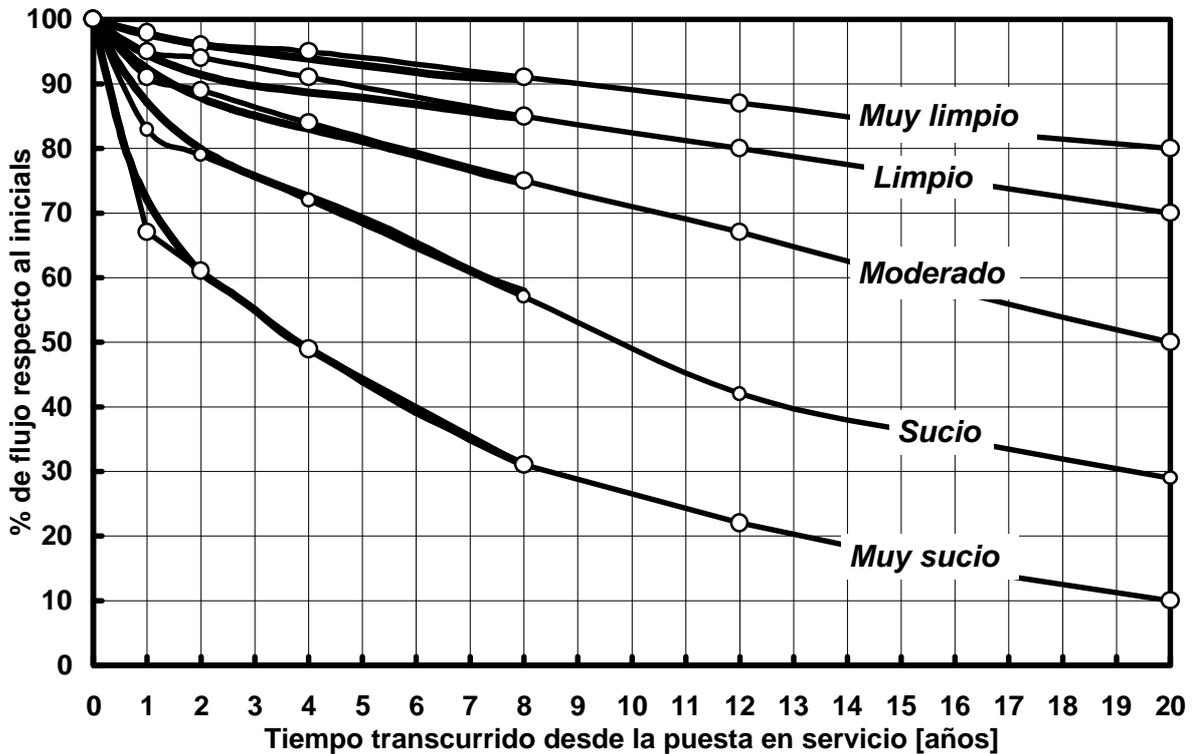


Figura 4.3.1-1 Depreciación de luminarias de alumbrado público, con cierre hermético y cinco tipos de ambientes publicadas por Van Dusen (trazo fino) [16] y la IESNA (trazo grueso) [13].

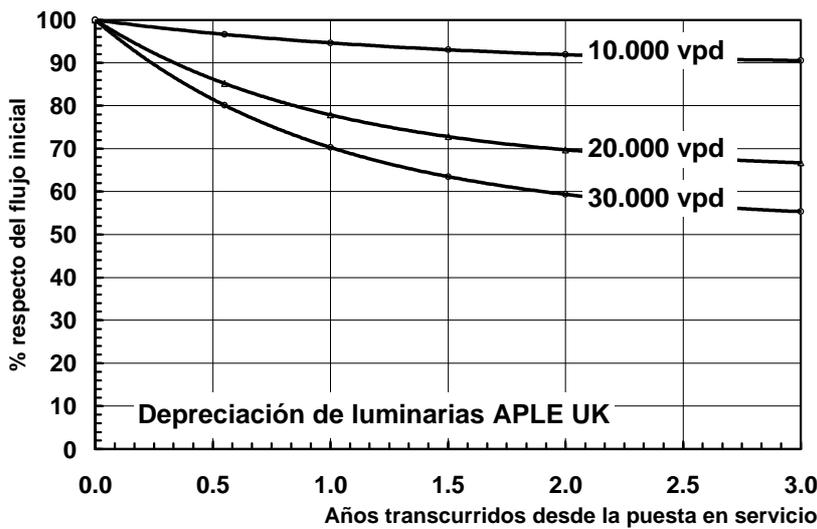


Figura 4.3.1-2 : Depreciación de luminarias de alumbrado público según APLE, para tres tipos de ambientes caracterizados por la densidad de tráfico automotor, 10.000, 20.000 y 30.000 vehículos por día.

Tabla 4.4.1-2 Caracterización del grado de contaminación atmosférica en el entorno de la instalación de alumbrado en relación con la densidad de tráfico [6].

Polución	Trafico	Vehículos diarios
Alta	Pesado	30.000
Media	Mixto: privado y comercial	20.000
Baja	Mixto: privado, servicios y pesado	10.000

Al comparar los resultados obtenidos por Van Dusen [16] y los de la APLE [17], a pesar de que no es posible hacer una analogía directa, las similitudes observadas en las curvas de depreciación para las categorías extremas de ambientes son apreciables. Los entornos caracterizados como *limpios* y *muy sucios* por Van Dusen son comparables con los de *polución baja* (10.000vpd) y *polución alta* (30.000vpd) respectivamente, como se muestra en la figura 4.4.1-3.

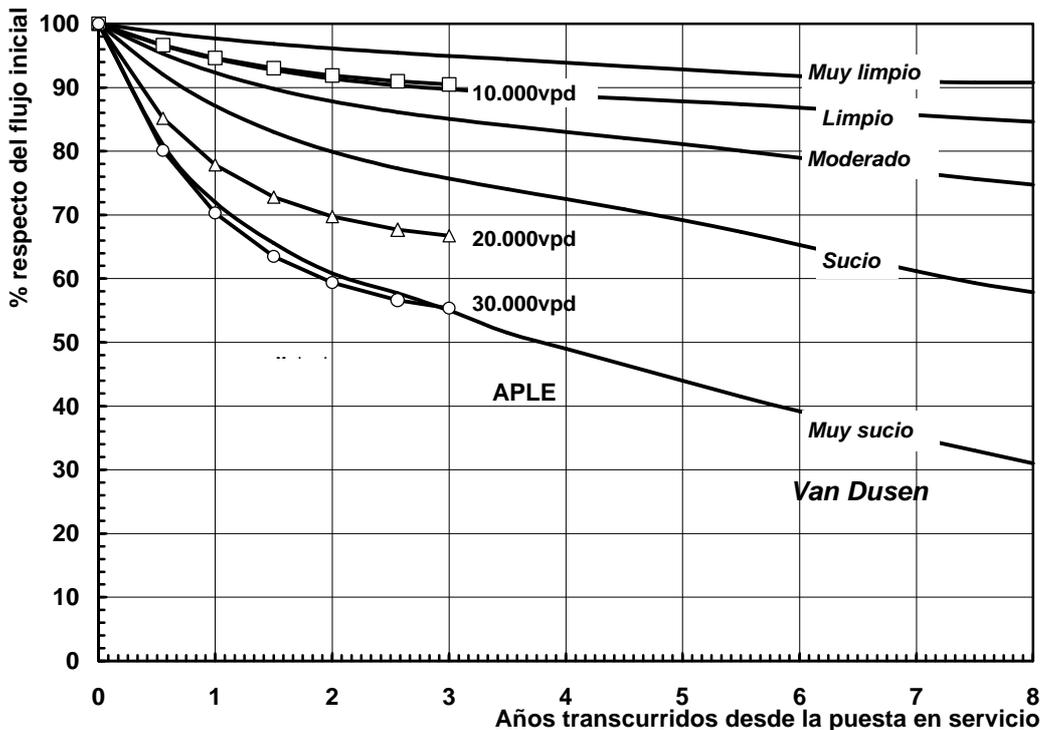


Figura 4.4.1-3: Comparación de resultados de Van Dusen y APLE

Los tipos de luminarias utilizadas por van Dusen y APLE no disponían de una descripción del grado de hermeticidad al agua y al polvo. Actualmente se especifica el grado de protección mecánica según **IEC 529, 598-1 (1977)** [18] y **DIN VDE 0711-103** sobre la base de una escala denominada **IP** + dos dígitos (ver anexo 4.II) con lo cual la especificación de la depreciación de las luminarias puede caracterizarse mejor y extender el uso de dicha información. Al respecto el Institution of Lighting Engineers **ILE TR19(1989)**[19] realizó tests empleando dos tipos de luminarias especificadas en base al grado de protección mecánica, IP23 e IP54. Los resultados obtenidos se indican en la figura 4.4.1-4 y 4.4.1-5. Las curvas representan los valores medios de depreciación durante tres años para las luminarias, antes y después de la limpieza. Se ha indicado además, solo para el tercer año, la depreciación discriminada de acuerdo al número de vehículos diarios. De las figuras se puede observar la reducción del efecto de la depreciación al aumentar la protección mecánica IP23 a IP54. Se observa además un efecto de depreciación no recuperable por mantenimiento después de la limpieza del 9,5% (90,5%) para IP23 y de 2,5% (97,5%) para IP54.

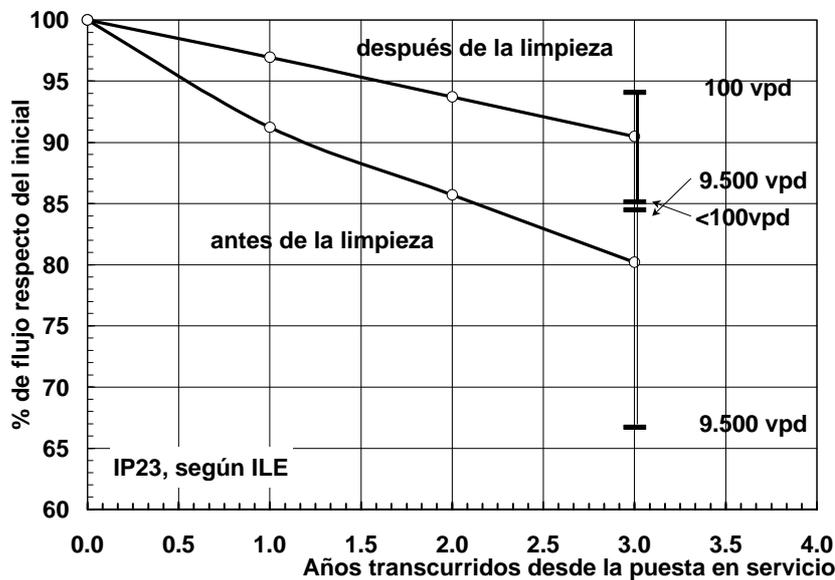


Figura 4.3.1-4 : Depreciación de luminarias IP23 según ILE, antes y después de la limpieza. En el tercer año se ha discriminado por densidad de tráfico automotor.

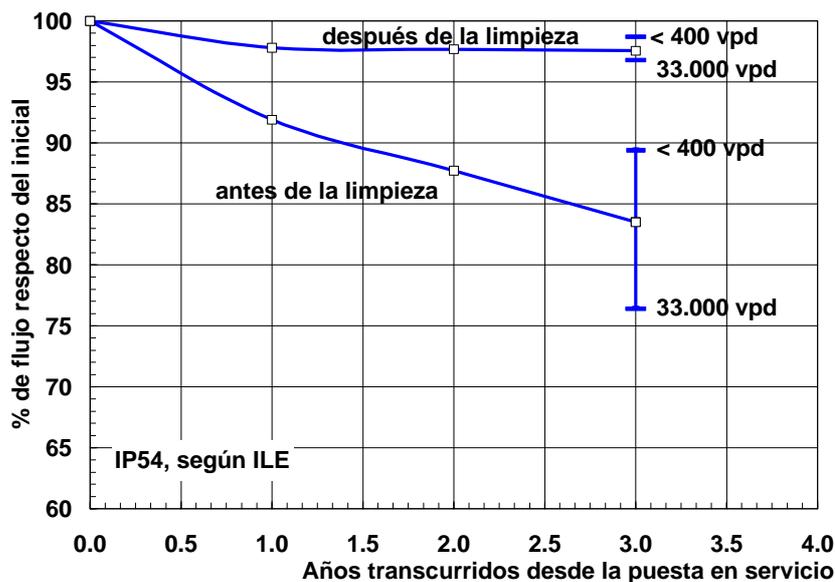


Figura 4.3.1-5 : Depreciación de luminarias IP54 según ILE, antes y después de la limpieza. En el tercer año se ha discriminado por densidad de tráfico automotor.

Si se comparan los resultados de *ILE* con *APLE*, se puede observar en la figura 4.4.1-6, que las curvas de depreciación de luminarias antes la limpieza (*ILE*) para IP23 e IP54 con $100 < \text{vpd} < 30.000$ están ubicadas entre las curvas de 10.000 y 20.000 de *APLE* lo que supone que los resultados no guardan una relación directa.

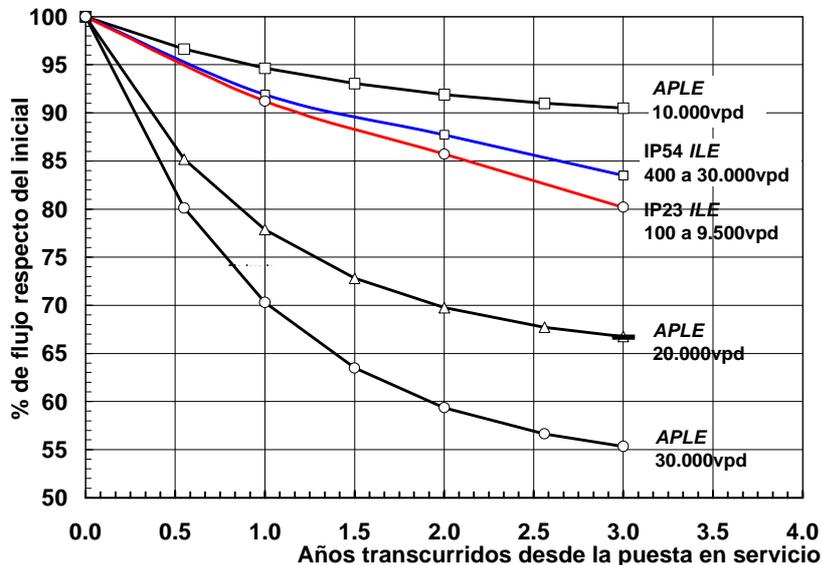


Figura 4.3.1-6 : Comparación de resultados de depreciación de luminarias según *ILE* y *APLE*.

La norma Británica **BS5489 (1992)** [20] establece un factor de mantenimiento para luminarias de acuerdo al grado de IP y a tres categorías de polución del ambiente: alta, media y baja según tabla 4.4.1-3. Las curvas de depreciación correspondientes se han indicado en figura 4.4.1-6. La **CIE división 5 (1998)** [21] ha propuesto la utilización de las curvas de la **BS5489** a fin de calcular la depreciación de la luminaria.

Tabla 4.4.1-3: Grado de polución atmosférica en el entorno de la instalación de alumbrado para caracterizar la depreciación [20].

Polución	Características	Partículas en suspensión #
<i>Alta</i>	El humo y el polvo de zonas cercanas envuelven la luminaria. Centro de grandes áreas urbanas y áreas industriales	-
<i>Media</i>	Zonas cercanas a actividades moderadas que generen humo o polvo. Areas semi-urbanas, residenciales o escasa industria	< 600 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$
<i>Baja</i>	Zonas de bajo nivel de contaminación, alejadas de actividades que generen humo o polvo. Baja densidad de trafico. generalmente limitadas a zonas residenciales o rurales.	< 150 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$

Nota #: Agregado del TC 5.14 de la CIE [21]

Comparando las curvas de depreciación de luminarias de BS5489 con ILE se observa en la figura 4.4.1.8 que esta ultima ($400 < \text{vpd} < 33.000$) presenta aparentemente un menor efecto de la polución en la depreciación de las luminarias utilizadas durante la experiencia. Si embargo las diferencias son del orden del 2% lo cual supone una muy buena concordancia de resultados.

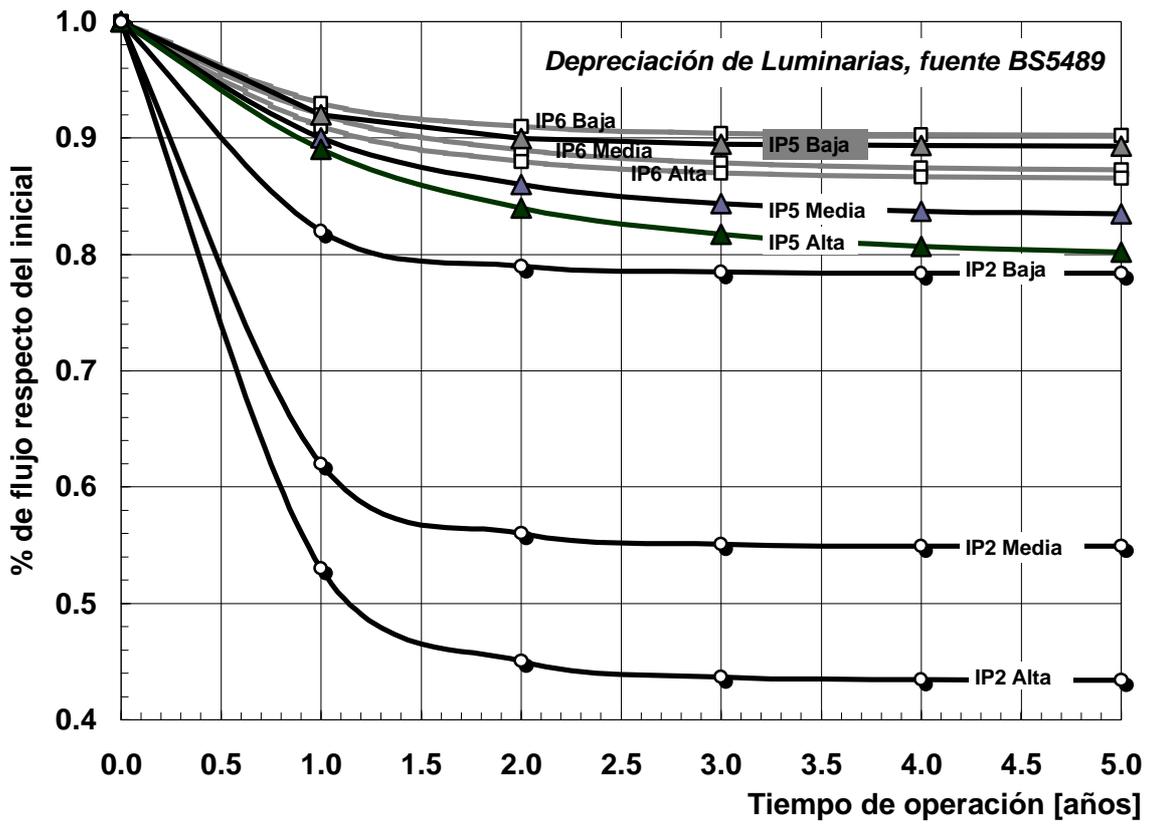


Figura 4.4.1-7: Curvas de depreciación de luminarias según BS5489 [20] para IP2, IP5 e IP6.

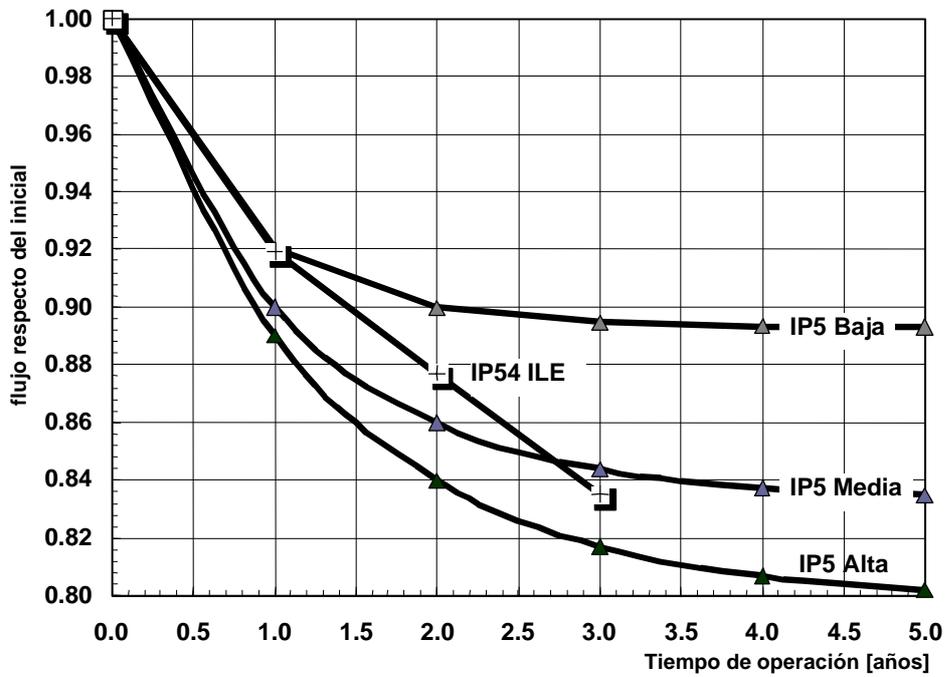


Figura 4.4.1-8: Comparación de curvas de depreciación de luminarias según BS5489 [20] e ILE para IP5.

Las experiencias estudiadas para modelar la depreciación de la luminaria sugieren que un periodo largo de recopilación de datos (3 a 5 años) es necesario para determinar la respuesta a la depreciación por polución ambiental y envejecimiento de los componentes.

La caracterización de las luminarias mediante el grado de protección mecánica, adoptado por numerosos países y propuesto por la CIE junto a la categorización de la polución en base a la densidad de tráfico media facilita la identificación de la curva a utilizar. Por estos motivos se ha utilizado en el presente trabajo el modelo de la BS5849 para caracterizar la depreciación de luminarias. Sin embargo es posible encontrar diferencia en cuanto al grado de polución se refiere por lo que para evaluar instalaciones existentes serán necesarias mediciones in situ para ajustar las curvas a valores locales.

Los parámetros del ajuste exponencial modificados según *Marsden* [11] se han efectuado para las curvas de BS 5848 e indicados en tabla 4.4.1-3 a fin de ser utilizados para estudiar el efecto de la depreciación en la relación costo-beneficio.

Tabla 4.4.1-3: Ajustes exponenciales modificados de las curvas de depreciación de luminarias.

Grado IP	Polución	u	p
IP6	Baja	0.902	1.253
	Media	0.872	0.981
	Alta	0.865	1.099
IP5	Baja	0.893	1.377
	Media	0.833	0.913
	Alta	0.798	0.786
IP2	Baja	0.784	1.792
	Media	0.549	1.849
	Alta	0.434	1.774

4.4.2 Efecto de la depreciación en la distribución de intensidades luminosas

Estudios realizados [17] tendientes a determinar si la acumulación de suciedad alteraba las características de distribución de intensidades luminosas de las luminarias han conducido a los siguientes resultados:

- Por acumulación de suciedad en las superficies de las luminarias, debido a la difusión, la magnitud de las intensidades luminosas fueron levemente incrementadas para ángulos de elevación desde el nadir elevados; pero en un cono de ángulos menores de 30° fueron consistentemente reducidas.
- El efecto de la polución en la uniformidad de luminancias sobre la calzada, general ($U_0=L_{\text{mín}}/L_{\text{med}}$) y longitudinal (U_L , calculada como el más desfavorable $L_{\text{mín}}/L_{\text{máx}}$, en el centro de cada carril) no se alteraron significativamente, si en cambio la luminancia media.

Como conclusión la acumulación de suciedad produce un efecto general en la distribución de intensidades, reduciendo las mismas pero manteniendo la forma de las curvas de distribución.

4.4.3 Influencia de la variación de las características de reflexión de la calzada

Se tiene conocimiento de que las propiedades de reflexión de la superficie de la calzada cambian paulatinamente con el uso desde la puesta en servicio. Este cambio es significativo durante los primeros meses de uso después de los cuales decae. El cambio tampoco es constante en toda la superficie debido a la diferencia de carga de los vehículos de un carril a otro. Idealmente para propósitos de diseño debieran medirse las propiedades de reflexión en distintos puntos sobre la calzada para obtener un promedio **van Bommel, de Boer(1980)** [22]. Una comparación con una calzada de características similares muestra ser lo mas adecuado. Este factor por la falta de datos no será considerado.

4.5 Factor de Mantenimiento

La iluminancia o Luminancia provista inicialmente por una instalación de alumbrado se reduce gradualmente durante la vida de la instalación. Para describir este fenómeno se emplea el termino *factor de mantenimiento IEC/CIE 17.4 (1987)*[23], definido como: “La relación de la iluminancia media o Luminancia media sobre el plano de trabajo después de un cierto periodo de uso de la instalación respecto de del valor medio de iluminancia o luminancia obtenida bajo las mismas condiciones cuando la instalación es nueva”:

$$FM = E_{med}/E_0 \quad \text{con } FM \neq 1 \quad 4.5-1$$

donde

- E_{med} : iluminancia media (o Luminancia media L_{med}) sobre el plano de interés después de un cierto periodo de uso de la instalación
- E_0 : iluminancia (o luminancia) obtenida bajo las mismas condiciones cuando la instalación es nueva (después de 100hs de uso)

En el diseño de instalaciones de alumbrado se emplea el concepto de iluminancia mínima mantenida E_{mm} (o luminancia mínima mantenida), que corresponde al mínimo valor medio sobre el plano de interés que la instalación puede proveer, momento en que se debe proceder a efectuar el mantenimiento correspondiente. E_{mm} es un valor convenientemente establecido en recomendaciones **CIE 136 (2000)** [24] de acuerdo a la exigencia visual y a características de la zona a iluminar. El diseño de la instalación se efectuará dimensionando la misma para que provea una iluminancia inicial:

$$E_0 = E_{mm} / FM \quad 4.5-2$$

FM se debe calcular considerando todos los factores que deprecian la instalación, las características propias de la instalación y el ambiente, considerando además la política de mantenimiento aplicada para que al momento de efectuar el mantenimiento la E_{med} no sea menor que la E_{mm} . El factor de mantenimiento se calcula como:

$$FM = LLO \cdot LSF \cdot LOR (\cdot SMF) \quad 4.5-3$$

donde

- LLO : es el factor de mantenimiento de la lámpara (lamp lumen output [11]) descrito en sección 4.3.2. También es denominado $LLMF$ (lamp lumen maintenance factor[21])
- LSF : es el factor de supervivencia de la lámpara (lamp survival factor) descrito en sección 4.2.5.2.
- LOR : es el factor de mantenimiento de la luminaria (también llamado LMF , luminaire maintenance factor[21]) descrito en sección 4.4.
- SMF : factor de mantenimiento de superficies en caso de existir reflexión de las mismas hacia el plano de interés.

En el caso de alumbrado interior, donde generalmente se emplean distribuciones uniformes de luminarias, la mortalidad de lámparas afecta el valor medio de la iluminancia sobre el plano de trabajo por lo tanto *LSF* tiene sentido de que sea incluido como factor para determinar el *FM*. En alumbrado urbano y en particular alumbrado vial, donde la distribución de luminarias corresponde a una línea continua (existen otros esquemas de instalación como la doble enfrentada o alternada etc.) la falla de un punto de luz es crítica en la zona donde esta ubicado además de producir una reducción sobre la media en la calle, debido a la baja densidad de puntos de luz. Compensar dicho efecto afectando el *FM* tiene sentido si se considera la E_{med} a una escala mayor.

El valor de *FM* dependerá del tipo de lámpara, luminaria y políticas de mantenimiento, por lo tanto función de los períodos de limpieza y mantenimiento que se realizará sobre la instalación a lo largo de su vida útil para compensar inicialmente la reducción gradual por depreciación.

Aplicando a una instalación los modelos de depreciación de flujo de lámparas, depreciación de luminarias, supervivencia, perdidas por no recuperación total, y una política de mantenimiento de limpiezas masivas bianuales y sustitución del 100% de lámparas cada tres años, la evolución del flujo de la luminaria se ha indicado en figura 4.5-1 (salida de programa realizado por el autor). El *FM* de la instalación es 0,78 lo que significa que para mantener las condiciones de iluminación por arriba de las mínimas mantenidas se deberá diseñar la instalación para una iluminancia media inicial un 28% superior a la mínima mantenida:

$$E_0 = E_{min}/0,78$$

4.5-4

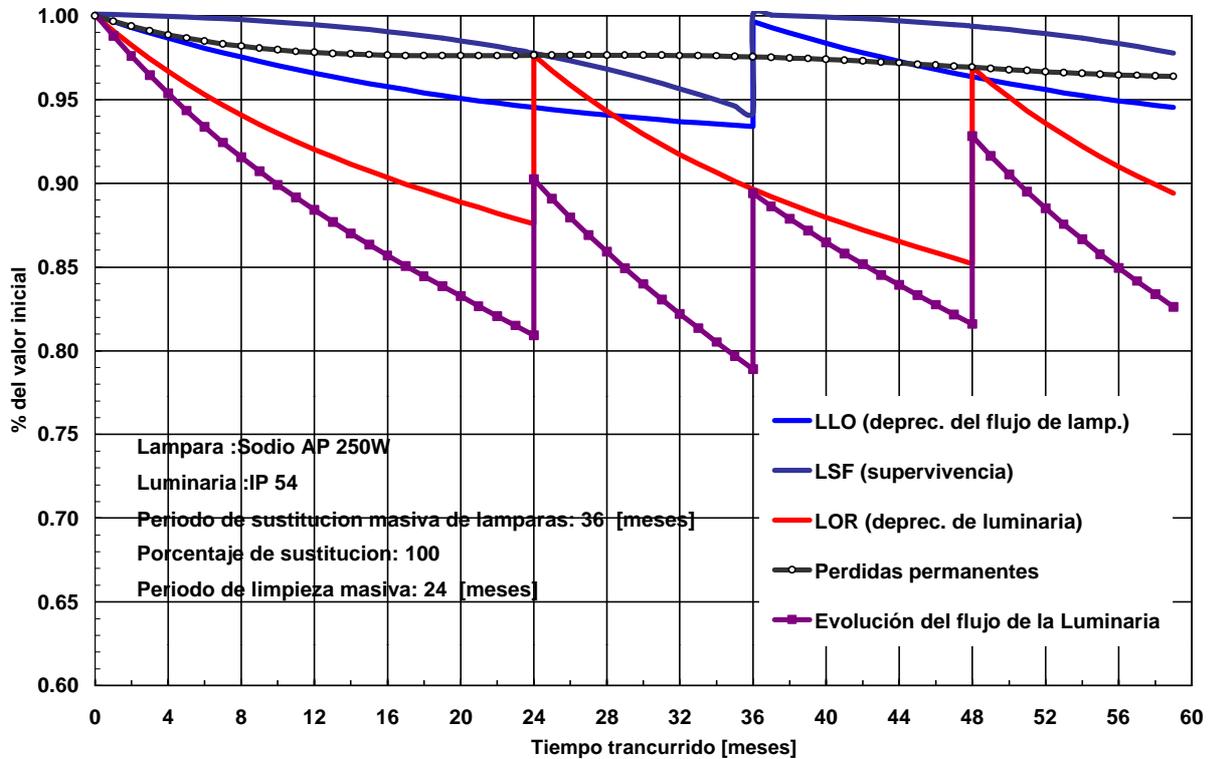


Figura 4.5-1: Evolución de flujo o del *FM* de una instalación con luminaria IP5, ambiente medio, lámpara de Sodio AP 250W, limpieza bianual y 100% de sustitución masiva de lámparas.

4.5.1 Medición del factor de mantenimiento

La determinación del *FM* en instalaciones reales se puede realizar de tres formas:

- a) **Medición en laboratorio:** La luminaria es retirada de la instalación, con su lámpara y equipo auxiliar, cuidando de no alterar el estado exterior de la misma. En laboratorio, la luminaria, es alojada en una esfera difusora de diámetro aproximadamente 3 veces la dimensión mayor de la luminaria
- Bajo condiciones controladas (tensión, corriente, frecuencia y temperatura estables) se mide mediante un sensor, apantallado del flujo directo, la fotocorriente para el estado actual de la luminaria (sucio + equipo auxiliar en uso).
 - Una segunda medición en las mismas condiciones pero con la luminaria limpia es posteriormente efectuada. La relación entre la primera y segunda medición corresponde a la *depreciación por polución y envejecimiento* de la luminaria.
 - Una tercera medición se realiza con la luminaria limpia pero con lámpara nueva (del mismo tipo y características) estabilizada (tiempo de estabilización=100hs) La relación de la segunda medición y la tercera indica la *depreciación del flujo de la lámpara* por uso.
 - Una cuarta medición con equipo auxiliar de referencia permitirá determinar las *perdidas por envejecimiento del equipo auxiliar*.

Los productos de las relaciones son una estimación del *FM*. Otra alternativa de medición es mediante un fotogoniómetro, en el cual se mide la distribución espacial de intensidades luminosas antes y después de la limpieza. Integrando en ángulos sólidos se determina el flujo emitido en ambos casos, cuyo cociente es *FM*. Si bien la medición tanto en la esfera como en el fotogoniómetro tiene gran precisión, se complica la tarea al tener que contar con el equipo necesario y la complicación de trasladar al laboratorio las luminarias para la medición.

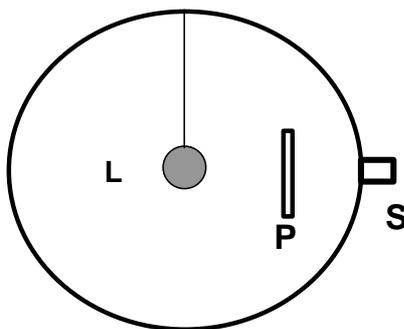


Figura 4.5.1-1: Esquema simplificado de la esfera integradora de Ulbricht. La luminaria **L** se ubica en el centro de la esfera recubierta interiormente por una superficie difusora. El sensor **S** registra la fotocorriente de la luminaria apantallada por **P** en el estado en que fue retirada de la instalación. Se repite la medición después de limpiar la luminaria, luego después de cambiar la lámpara y con equipo auxiliar de referencia.

- b) **Medición in situ a partir de la iluminancia media:** En forma similar al caso "a", se procede a realizar mediciones para el estado actual, con luminaria limpia, luminaria limpia + lámpara nueva y luminaria limpia + lámpara nueva + equipo de referencia. En lugar de una única medición en cada caso anterior, se requiere medir la iluminancia sobre la calzada en puntos de una rejilla convenientemente distribuidos para calcular la iluminancia media de la luminaria analizada. La iluminancia media en cada caso se utiliza para determinar las depreciaciones y el *FM*. La medición puede realizarse utilizando un luxómetro manual [25]. El problema de este tipo de medición es que interfieren las luminarias restantes y otras fuentes como faros de coches, alumbrado comercial etc.

- c) **Medición in situ a partir de una medición única:** La interferencia de otras fuentes es minimizada utilizando un apantallado en el sensor por medio de un cilindro abierto de 25 cm de altura para evitar la influencia de otras luminarias durante la medición. El sensor apantallado se coloca bajo la luminaria a medir antes y después de efectuar las operaciones de limpieza y cambio de lámpara y equipo. En figura 6.3.2.3-1 se ilustra el dispositivo. En forma simultanea, mediciones de voltaje en la base del punto de luz son efectuadas para ajustar las lecturas en caso de variaciones. Se debe tener cuidado de marcar el sitio de ubicación y de controlar los niveles de horizontalidad para no introducir un error de posición al retirar el dispositivo de medición para efectuar las operaciones de limpieza y cambio de lámpara. En caso de luminarias especiales (globos) donde no es posible ubicar el dispositivo bajo la misma, se puede desplazar el punto de medición a un ángulo de 45° , montar el dispositivo sobre un trípode y orientarlo cuidando de que sobre el sensor se proyecte la imagen de la luminaria a medir. Durante las operaciones de limpieza y cambio de lámpara es deseable no desplazar el dispositivo para no introducir errores.

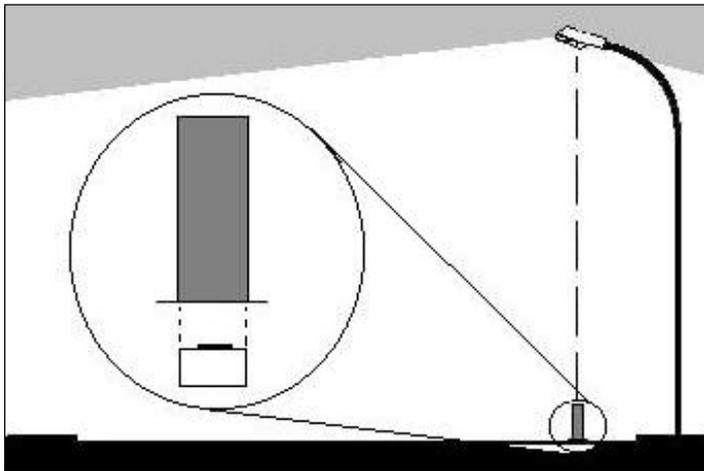


Figura 4.5.1-2: Dispositivo de medición para evaluar la depreciación de la instalación. La influencia de otras luminarias durante la medición se evita colocando un cilindro sobre el detector.

Datos de mediciones de depreciación realizadas por los **alumnos de la asignatura proyectos(1998)**[26] sobre 31 puntos de luz en cuatro poblaciones de Cataluña (Begues, Viladecans, El Masnou y Cornellà) utilizando el valor medio sobre una rejilla, como el descrito en "c" fueron comparadas con mediciones empleando la técnica "b" para el presente trabajo por el autor. Los resultados muestran una diferencia significativa ante un contraste estadístico de comparación de medias (t de student) con un nivel de significación del 5%, siendo el método "b" mas apropiado que el "a" en alumbrado urbano. En consecuencia este ultimo método será empleado para determinar la respuesta de las instalaciones a evaluar en lo que concierne a la depreciación de las mismas.

4.6 Conclusiones

Los principales factores que afectan el rendimiento de las instalaciones de alumbrado y en consecuencia la calidad del servicio fueron estudiados en el presente capítulo.

Del análisis de datos de 6 años de registros históricos de operaciones de mantenimiento se comprueba que la lámpara es un elemento crítico de la instalación de alumbrado representando el 45% de las operaciones correctivas acumuladas. Los factores que afectan la vida de la lámpara fueron analizados y los modelos de ajuste más apropiados descriptos junto al cálculo de los parámetros representativos.

Comparaciones con datos de fabricantes fueron realizadas observando que las curvas de supervivencia de datos provistos por fabricantes difieren de las curvas de datos históricos y en general muestran valores más bajos. Estas diferencias muy posiblemente se deban a que en la vida real las condiciones de funcionamiento difieren de las condiciones bajo las cuales se efectúan en laboratorio los test de vida. Esto permite tener datos más confiables para construir un modelo predictivo de comportamiento.

La depreciación del flujo de lámparas fue analizada a partir de datos de fabricantes con los cuales se han propuesto modelos de ajuste. En forma similar la depreciación de luminarias por polución y envejecimiento fue estudiada y los resultados de distintos autores y normas son comparados para adoptar un modelo adecuado de comportamiento.

Finalmente, un factor de mantenimiento, que engloba los factores de depreciación estudiados, es descrito el que será empleado dentro de una relación beneficio – costo como uno de los elementos para predecir el comportamiento de la instalación y para evaluar instalaciones. Para instalaciones existentes un método de medición del factor de mantenimiento es propuesta orientada a facilitar la aplicación de la metodología de evaluación.

Dado que para el propósito esencial del trabajo, el estudio de la relación beneficio-costos y su aplicación, es preciso operar con precisión factores tales como supervivencia y depreciación lo más ajustado posible al comportamiento real, es necesario un seguimiento de las instalaciones registrando los parámetros de interés. La utilización de parámetros generales se justifica como recurso de partida ante la ausencia de datos reales o para comparar con situaciones teóricas.

4.7 Bibliografía del capítulo

[1] **CIE 33 (1977)**

Depreciación y mantenimiento de las instalaciones de alumbrado público. Publicación CIE Nº 33 (TC 4.6).

[2] **SECE (1998)**

Sociedad Española de Construcciones Eléctricas. Pg. Zona Franca, 142-144, 08038 Barcelona, España

[3] **Manzano E.R. (1998)**

Análisis de registros históricos de mantenimiento del alumbrado urbano, período 1/7/92 - 29/05/98, Vic. Informe interno, Universitat Politècnica de Catalunya.

[4] **Meyer Chr., Nienhuis H. (1988)**

Discharge Lamps, Philips Technical Library, ISBN 90 201 21472

[5] **IEC 81 (1987)**

Lamp life test. International Electromechanical Commission., publication Nº 81

[6] **Philips Quality Department Lighting (1995)**

Life expectancy curves and lumen maintenance curves. December 1995

[7] **Ireson W. et al (1966)**

Reliability Handbook. McGraw-Hill

[8] **Creus A.(1992)**

Fiabilidad y seguridad, su aplicación en procesos industriales. Editorial Marcombo. ISBN 84-267-0853-6

[9] **IESNA Ch6 (2000)**

Lighting Sources, Chapter 6, pag.6-30. Lighting Handbook, Reference & Application, 9th Edition. ISBN 0-87995-150-8.

[10] **IESNA LM-47 (1995)**

Approved method for life testing of high intensity discharge (HID) lamps, LM-47-1995. New York: Illuminating Engineering Society of North America.

[11] **Marsden A.M. (1993)**

The economics of lighting maintenance, Lighting Research & Technology Vol. 25 Num. 3 page 105-112. UK.

[12] **Burrage S. (1993)**

Managing streetlight maintenance, Journal of the Illuminating Engineering Society of Australia & New Zealand, Num.3, June 1993, Australia.

[13] **IESNA, DG-4 (1993)**

Design guide for road lighting maintenance. Illuminating Engineering Society of North America. Subcommittee on Maintenance & Light sources.

[14] **San Martín, R., Manzano E. (1997)**

Gestión y explotación de instalaciones: aspectos a considerar en la elaboración de proyectos. Actas del XIII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos, Volumen II, pág. 919 a 925. ISBN : 84-88783-30-2. Sevilla, España.

[15] **Eley, C., T.M. Tolen, J.R. Benya, F. Rubinstein, R. Verderber (1993)**

Advanced Lighting Guidelines: Final Report. Prepared for the U.S. Department of Energy, California Energy Commission, and Electric Power Research Institute. US.

[16] **Van Dusen (1971)**

Maintenance and adjustment factors in street lighting design calculations, Journal of Illuminating Engineering Society of North America. October 1971

[17] **APLE TR8 (1977)**

Maintenance of public lighting. Lantern output depreciation. Association of Public Lighting Engineers Technical Report N°8, London UK.

[18] **IEC 529 (1977)**

International Electromechanical Commission. Degrees of Protection of Enclosures.

[19] **ILE TR19(1989)**

The effectiveness of lantern cleaning. Institution of Lighting Engineers. Technical Report N°19, Rugby, UK

[20] **British Standard 5489 (1992)**

Road Lighting, Part 1: Guide to the general principles. UK

[21] **CIE TC 5.14 (1998)**

Maintenance of outdoor lighting systems. Draft from the TC 5.14, Barcelona June 1998.

[22] **van Bommel, W.J.M., de Boer J.B.(1980)**

Road Lighting, Philips Technical Library

[23] **IEC/CIE 17.4 (1987)**

International Lighting Vocabulary, 4th edition Publication N° 17.4.

[24] **CIE 136 (2000)**

Guide to the Lighting of Urban Areas. Publication CIE N° 136 ISBN 3 900 734 98 4

[25] **PRC Krochmann GmbH. (1998)**

Luxmeter <http://www.ingenieur.de/prc/> 1999

[26] **Alumnos de la asignatura Proyectos (1998)**

Dirigidos por Prof. R. San Martín y E. Manzano. Departament de Projectes, Escola Técnica Superior de L'Engineria Industrial de Barcelona, Universidad Politècnica de Cataluña, Barcelona, curso 1997-1998.

