

Capítulo 5

Estudio de la metodología

- 5.1** La relación costo-beneficio como parámetro de evaluación
- 5.2** Valoración del beneficio
 - 5.2.1** El nivel de alumbrado
 - 5.2.1.1** Factor de iluminancia para zonas con áreas y niveles distintos
 - 5.2.1.2** Factor de iluminancia con reguladores de potencia
 - 5.2.2** El tiempo de servicio de la instalación
 - 5.2.3** Frecuencia y duración de fallos
 - 5.2.4** Apariencia de la instalación
- 5.3** Valoración de costos
 - 5.3.1** Costos de instalación
 - 5.3.2** Costos de energía
 - 5.3.3** Costos de mantenimiento
 - 5.3.3.1** Sustitución programada masiva de lámparas mas limpieza programada masiva de luminarias
 - 5.3.3.2** Sustitución correctiva y programada masiva de lámparas mas limpieza programada masiva de luminarias
 - 5.3.3.3** Sustitución correctiva de lámparas mas limpieza programada masiva de luminarias
 - 5.3.3.4** Sustitución correctiva de lámparas con limpieza simultanea
 - 5.3.4** Costos de eliminación y reciclaje
 - 5.3.5** Análisis del ciclo de vida
 - 5.3.5.1** Valor presente
 - 5.3.5.2** Cantidad anual equivalente
 - 5.3.5.3** Inflación
- 5.4** Aplicación de la metodología
 - 5.4.1** Planilla de calculo del costo-beneficio
 - 5.4.1.1** Planilla del beneficio
 - 5.4.1.2** Planilla de tiempos de operación de la instalación
 - 5.4.1.3** Planilla de costos de energía
 - 5.4.1.4** Planilla de costos y de relaciones beneficio/costo
- 5.5** Conclusiones
- 5.6** Bibliografía del capítulo

5.1 La relación costo-beneficio como parámetro de evaluación

5.2 Valoración del beneficio

En términos generales el beneficio que produce el alumbrado urbano es el resultado de proporcionar condiciones apropiadas de visión para favorecer la seguridad vial, la seguridad ciudadana, producir ambientes de uso confortables, animados brindando además sensación de bienestar. Valorar el beneficio en estos términos presenta cierta dificultad.

Un enfoque del beneficio del alumbrado, en términos de reducción de la tasa de accidentes viales, se describe en sección 2.4. donde la situación presentada es clara cuando se trata de pasar de una vía de tránsito sin alumbrado a una con alumbrado. Los registros de accidentes antes y después del alumbrado indican la reducción experimentada, sin embargo variaciones en la iluminancia o luminancia muestran baja correlación. Debido posiblemente a que los accidentes son efectos de causas complejas, la relación entre distintos niveles de la calidad del alumbrado y los accidentes esta aún en fase de estudio. Por otra parte la complejidad de la trama urbana hace que la seguridad vial sea un factor importante pero no el único. Si además como objetivo, por ejemplo, interesa evaluar el cambio de políticas de mantenimiento, de la correlación entre accidentes y los cambios de políticas no será posible inferir por la cantidad de variables que intervienen.

La evaluación del beneficio debe tener como objetivo ponderar la calidad del servicio del alumbrado para lo cual se debe basar en aspectos operativos que permitan evaluar la gestión, explotación y planificación del mantenimiento. Los aspectos mas importantes que interesan desde esta óptica **Manzano, San Martín (1999)**[1] están relacionados con:

- la iluminancia (nivel del alumbrado),
- el tiempo de operación necesario del servicio,
- la fiabilidad, frecuencia y duración de fallos,
- la seguridad eléctrica y mecánica del sistema,
- la apariencia de la instalación (estética, color de la luz).

cada uno de estos aspectos es una dimensión del beneficio a evaluar.

Considerando los distintos aspectos que intervienen en el beneficio, cuando a estos no es posible asociar directamente un valor monetario, **Gramlich et al.(1990)** [2] **Belger (1994)** [3] proponen transformar la relación costo-beneficio en una función del tipo:

$$CB = \frac{\text{Costos}}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdots k_n} \quad 5.2-1$$

donde:

Costos: representa todos los costos asociados con el sistema de alumbrado (a valor presente o cuota anual equivalente, ver sección 5.3.5.1) menos cualquier beneficio monetario.

$k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$: factores de peso para las n dimensiones del beneficio consideradas.

La forma de la relación entre cada factor y el aspecto del beneficio correspondiente puede tener escalas numéricas de tipo continuas, discretas del tipo binario (existe o no existe, 0 o 1) o discretas categorizadas (imperceptible, aceptable, molesto etc.). En figura 5.2-1 se muestra una función de tipo continua de un factor k .

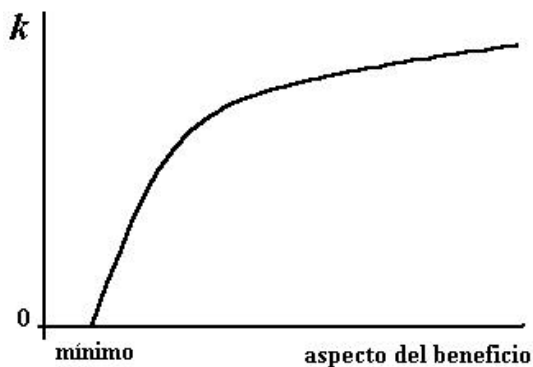


Figura 5.2-1: Función de tipo continua que relaciona un factor k_i y el aspecto del beneficio correspondiente.

Para establecer un modelo de valoración del beneficio basado en una ecuación de la forma 5.2-1, se supone que cada factor k_i es independiente de los restantes factores, es decir por ejemplo, la iluminancia será independiente de la apariencia de la instalación lo cual puede ser un tanto obvio. Sin embargo la independencia no será tan evidente si nos referimos a la frecuencia y duración de fallos pues un fallo afectaría el nivel de la zona. Si se asume la independencia de un factor será necesario luego establecer la dependencia entre dicho factor y el aspecto del beneficio analizado. Una simplificación a este problema consiste en suponer una pendiente constante para la función a pesar de que puede no serlo. Sin embargo dado el nivel de precisión con el cual se evalúan los costos en alumbrado esta suposición es razonable [3].

5.2.1 El nivel de alumbrado

Para cuantificar el nivel de alumbrado (actualmente iluminancia), parámetros funcionales, como por ejemplo: flujo luminoso, iluminancia, luminancia, visibilidad etc., pueden ser utilizados. La elección apropiada debe realizarse teniendo en cuenta que el parámetro sea:

- representativo del beneficio o eficacia del alumbrado
- medible con la rapidez y precisión que la metodología establecida lo requiera.
- comparable con valores de referencia convenientemente establecidos.

La luz producida cuantificada en *lúmenes – horas mantenidos*, se puede utilizar como criterio para determinar el número óptimo de horas de funcionamiento de una instalación después de las cuales deberá realizarse la sustitución de lámparas por grupo **CIE 33(1977)**[4]. También se puede utilizar para comparar distintas alternativas de instalaciones de alumbrado **IESNA Ch25(2000)**[5]. Las mayores desventajas de este criterio radican en **Di Fraia et al.(1990)**[6]:

- a) la figura del flujo luminoso dice poco o nada acerca de las condiciones visuales creadas por el sistema de alumbrado,
- b) no considera la eficacia o la utilización del sistema de alumbrado tampoco el caso cambios en la disposición de las luminarias,

El empleo de la iluminancia sobre el área de interés (sea horizontal o vertical) también dice poco acerca de las condiciones visuales creadas por el sistema de alumbrado, en este sentido la luminancia ha sido el parámetro funcional que mejor se ha correlacionado hasta el presente con las condiciones visuales y posiblemente en un futuro cercano el criterio de la visibilidad de objetos **Adrian (1993)**[7] reemplace al de luminancia estando aún en discusión esto último **Philips E.(1993)**[8], **Dijon et al.(1997)**[9].

Desde la óptica del diseño, si se disponen de todos los datos necesarios, iluminancia, luminancia o visibilidad, son parámetros a determinar con relativa facilidad mediante el empleo de software adecuado aun cuando los dos últimos parámetros requieren información acerca de las propiedades reflectivas del pavimento, lo cual hasta el presente ha limitado en alguna medida su amplia aplicación.

Cabe destacar que se encuentran en desarrollo el uso de dispositivos CCD para la medición de luminancia y visibilidad **Manzano, Cabello (2000)**[10] **Vizmanos, Fuentes (1993)**[11] **Arce, Manzano, Cabello, Kirschbaum(1997)**[12] esperando sean una alternativa mas económica y sencilla frente a los dispositivos tradicionales.

Desde el punto de vista de la implementación y el control la iluminancia tiene la gran ventaja que es fácilmente mensurable y los recursos necesarios en instrumental están al alcance de los ayuntamientos. Si como meta se espera que la metodología propuesta sea aplicable, la iluminancia sobre el área de interés es el parámetro mas recomendado para evaluar el nivel de como factor del beneficio.

Las zonas de interés a considerar son las vías de transito peatonal y/o vehicular a iluminar o actualmente iluminadas. Si bien existen diversas configuraciones urbanas es posible adoptar un esquema típico simplificado a los fines de estandarizar. Esto dependerá si el análisis se enfoca a casos particulares o a una escala mayor como ser el caso de una población. El área de interés estaría así constituida por la superficie de la calle, dividida en calzada y aceras si los niveles de alumbrado se consideran diferentes.

Se plantea ahora la necesidad de establecer cual es la relación entre el beneficio y la iluminancia sobre el área de interés para determinar el factor iluminancia a emplear en 5.2-1 con el fin de evaluar la relación costo-beneficio.

No todos los luxes que llegan sobre la calzada son valorados de la misma manera por los usuarios del espacio iluminado, pues, si ese fuera el caso tendríamos un beneficio constante para cualquier iluminancia con lo cual la mínima iluminancia que nos conduzca al mínimo coste sería la mas apropiada para cualquier situación. El beneficio del alumbrado esta relacionado con la facilidad para realizar tareas o actividades de interés. El rendimiento visual o la facilidad para realizar tareas, sería también un indicador del beneficio.

El rendimiento visual relativo (RVP relative visual performance) **Rea et al.(1988)**[13] **Rea et al. (1991)**[14] **IESNA Ch3(2000)**[15] esta basado en mediciones de la velocidad que tienen los observadores para realizar tareas de laboratorio. Depende del tipo de tarea y del estado de adaptación de los observadores. En figura 5.2-2, como ejemplo, se observa como varía el rendimiento visual con la iluminancia y el contraste para la tarea de detección de la abertura de un anillo de Landolt de 3 minutos de tamaño angular. La respuesta depende de las características de la tarea, la iluminancia necesario podría obtenerse basándose en este criterio.

La iluminación de espacios urbanos, debido a la complejidad de la tarea visual involucrada, podía ser evaluada sobre la base de varios criterios de rendimiento visual. Siendo este el caso, los actuales parámetros funcionales recomendados para el diseño **CIE 136(2000)**[16] hubieran sido obtenidos por este camino.

A pesar que enfoques de este tipo son propuestos no es lo recomendado debido a que el alumbrado escogido para realizar un aspecto del rendimiento visual no prueba ser suficientemente efectivo para el rendimiento visual en general **van Bommel, de Boer (1980)** [17]. Por el contrario el camino seguido hasta el presente ha sido caracterizar el alumbrado con los parámetros luminotécnicos y luego ver en que medida afectan estos el rendimiento visual en general de las tareas mas representativas.

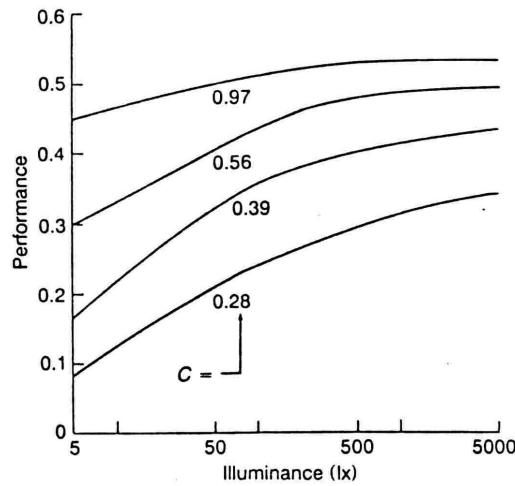


Figura 5.2.2-2 Variación del RVP con la iluminancia y el contraste para la tarea de detección de la abertura de un anillo de Landolt de 3 minutos de tamaño angular.

Si bien no es posible caracterizar por una única función el rendimiento visual en general para el alumbrado de espacios urbanos a lo cual el beneficio estaría estrechamente vinculado, la forma de la función del beneficio en términos de iluminancia seguiría la tendencia de figura 5.2-2. En consecuencia una respuesta del tipo indicado en figura 5.2-3 es la esperada, donde el valor óptimo de iluminancia corresponderá al mínimo mantenido recomendado (E_R) para cada tipo de vía de tránsito peatonal y/o vehicular [16].

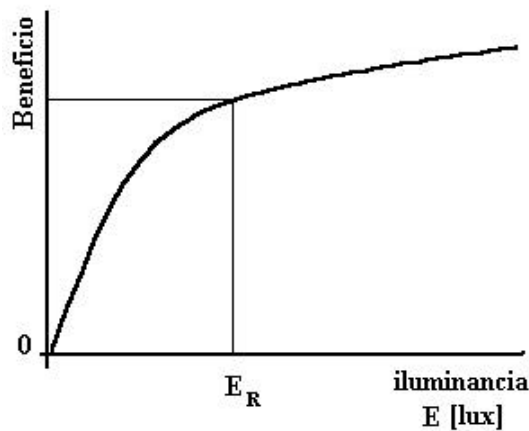


Figura 5.2-3: Beneficio esperado en función de la iluminancia sobre la zona de interés en alumbrado urbano. E_R es el nivel de iluminancia de referencia dado por normas o recomendaciones

Por conveniencia se asumen ciertas suposiciones para evaluar la relación costo-beneficio:

- el beneficio es 1 cuando la iluminancia corresponde al valor de referencia, es decir $k(E_R) = 1$, de este modo nos independizamos de no disponer de valores absolutos del beneficio. Conceptualmente los costos se verán incrementados en la relación costo-beneficio cuando la iluminancia sea menor que la de referencia penalizando así a las instalaciones que no cumplan con los objetivos de diseño.
- se considera que valores por arriba del de referencia no reportan beneficios económicos adicionales.
- Otra simplificación que se asume es linealizar la función con lo cual la pendiente (m) adoptada $m \propto 1/E_R$.
- Se considera que una instalación es inadmisibles si la $E \leq E_R/2$

La función resultante $f(E)$ tiene la forma:

$$k(E) = \begin{cases} 0 & \text{para } E \leq E_R/2 \\ (2 E/E_R) - 1 & \text{para } E_R/2 \leq E \leq E_R \\ 1 & \text{para } E \geq E_R \end{cases} \quad 5.2.1-1$$

donde:

$k(E)$: factor de peso de la iluminancia.

E_R : iluminancia de referencia

E : iluminancia sobre el área de interés a evaluar

la cual se indica en figura 5.2-4.

La iluminación de espacios urbanos, debido a la complejidad de la tarea visual involucrada, podía ser evaluada en base a varios criterios de rendimiento visual. Siendo este el caso, los actuales parámetros funcionales recomendados para el diseño [16] hubieran sido obtenidos por este camino.

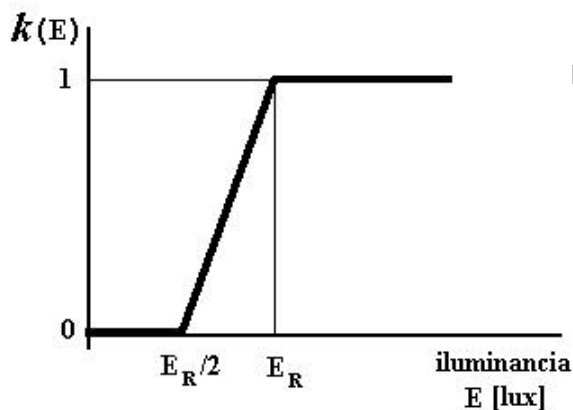


Figura 5.2-4: Función $k(E)$ para evaluar el beneficio en relación al nivel de alumbrado

5.2.1.1 Factor de iluminancia para zonas con áreas y niveles distintos

Como la instalación a evaluar puede estar ubicada en una zona urbana con distintos anchos de calles y distintos valores de iluminancia recomendados, es necesario obtener un $f(E)$ ponderado de acuerdo al área y al nivel. En ecuación 5.2.1-2 se indica esta ponderación.

$$k(E)^* = \frac{\sum_{i=1}^n E_{Ri} \cdot A_i \cdot k(E_i)}{\sum_{i=1}^n E_{Ri} \cdot A_i} \quad 5.2.1-2$$

donde:

$k(E)^*$: factor del beneficio en términos de iluminancia ponderado de acuerdo al área y al valor de iluminancia sobre la zona de interés

$k(E_i)$: factor del beneficio en términos de iluminancia sobre la zona i .

E_{Ri} : iluminancia recomendada, mínima mantenida sobre el área i de interés.

A_i : área de la zona i de interés.

5.2.1.2 Factor de iluminancia con reguladores de potencia

Con el fin de ahorrar costos frecuentemente se presenta la alternativa de reducir el consumo de energía, reduciendo la iluminancia durante ciertos periodos de tiempo como por ejemplo desde las 23hs hasta las 6hs de la mañana. (ver figura 5.2.1.2-2). De acuerdo al régimen de tarifas vigente los costos de energía dependerán del horario de consumo. Si en la tarifa contratada existe discriminación horaria, tal como se mencionara en el apartado 3.3 se debe considerar que el margen de ahorro energético puede reducirse si coinciden las franjas horarias de reducción de consumo con la de menor coste de la energía.

La implantación del sistema se vería justificada no solo si el ahorro energético tuviera un período de retorno del capital corto (menor que 3 años) sino también en el hecho que se utilizarían en períodos donde la reducción en la densidad de tráfico o la disminución de la presencia de peatones que se experimenta no significa un riesgo adicional. No obstante debe considerarse el posible riesgo de aumento de accidentes por aumento de la velocidad de circulación y la posible reducción de la seguridad ciudadana.

Existe una clara relación entre los valores de iluminancia del alumbrado público y la seguridad ciudadana. El **Centre d'Information de l'Eclairage (1984)** [18] presenta un estudio realizado en la comunidad urbana de Lyon, donde en 173 casos de agresiones nocturnas a personas se registraron posteriormente los valores de iluminancia horizontal en el lugar de los hechos. El porcentaje de agresiones en función de los valores de iluminancia se indican en figura 5.2.2.1-1. El menor número de agresiones se reduce notablemente para valores superiores a 20 lux.

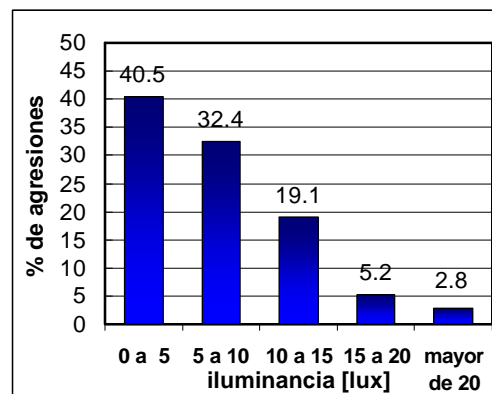


Figura 5.2.1.2-1. Porcentaje de agresiones en función de los niveles de iluminancia

En consecuencia, es necesario ponderar previamente las ventajas y desventajas antes de asumir la decisión política de reducir la iluminancia en aras de un ahorro energético y sería recomendable en cualquier caso emplear valores inferiores a 15 lux.

En aquellas situaciones que sea factible reducir los niveles sin consecuencias, el beneficio se considerará equivalente a la situación sin reducción para realizar un balance entre costos adicionales y ahorro energético.

El factor de iluminancia del beneficio se ponderará sobre la base del periodo de uso de la regulación como se indica en figura 5.2.1.2-2 y ecuación 5.2.1.2-1.

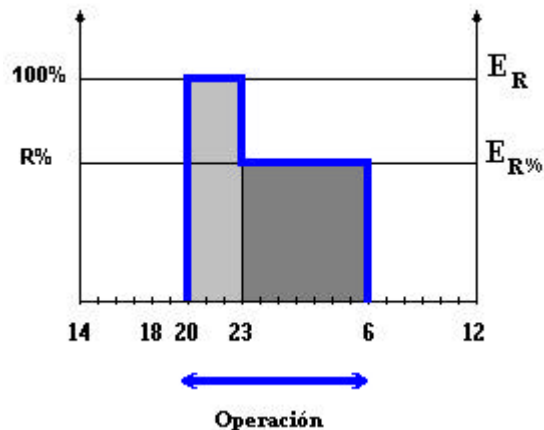


Figura 5.2.1.2-2: Factor de iluminancia del beneficio con periodo de regulación $T_{R\%} = 7$ hs, desde las 23hs a 6hs.

$$k(E)^{\#} = \frac{T_{100\%} \cdot k(E_R) + T_{R\%} \cdot k(E_{R\%})}{T_{100\%} + T_{R\%}} \quad 5.2.1.2-1$$

donde:

$k(E)^{\#}$: factor del beneficio ponderado debido a la presencia con regulador de potencia

$k(E_{100\%})$: factor del beneficio con 100% de potencia.

$k(E_{R\%})$: factor del beneficio con R% de regulación de potencia.

$E_{R\%}$: iluminancia recomendada, mínima mantenida sobre el área i de interés con R% de regulación.

$T_{R\%}$: periodo de funcionamiento bajo regulación de potencia.

$T_{100\%}$: periodo de funcionamiento al 100% de potencia.

5.2.3 El tiempo de servicio de la instalación

El funcionamiento diario de la instalación de alumbrado debe responder a las necesidades de luz. Cuando la reducción gradual del alumbrado natural al atardecer produzca condiciones de iluminación inferiores a los niveles funcionales necesarios será el momento de la conexión del alumbrado artificial. Así como la duración del día (ortos y ocasos) depende del día del año y de la latitud, el tiempo necesario de servicio de la instalación de alumbrado será el complemento. Para Barcelona, a 41° de latitud norte, en tabla 5.2.3-1 se indican los horarios de encendido y apagado.

Se observa de la tabla 5.2.3-1 que el tiempo de utilización acumulado anualmente máximo recomendado es de 4277,5 horas.

Puede ocurrir por fallo de los componentes de comando, alteraciones del ciclo de encendido y apagado. Debido a los esquemas actuales de operación centralizada por cuadro de mando el fallo de un sistema de control afecta a numerosos puntos de luz. En caso de exceso de uso de la instalación se produciría un sobre consumo y una posible reducción de la vida de los componentes.

Tabla 5.2.3-1: Horarios recomendados para el funcionamiento del alumbrado público a 41° de latitud

Periodo de funcionamiento		Encendido	Apagado	horas de funcionamiento
01-ene	31-ene	17:45	8:15	449.5
01-feb	28-feb	18:15	8:00	385.0
01-mar	31-mar	18:45	7:00	379.8
01-abr	30-abr	20:30	7:00	315.0
01-may	31-may	21:00	6:15	286.8
01-jun	30-jun	21:30	6:00	255.0
01-jul	31-jul	21:30	6:15	271.3
01-ago	31-ago	21:00	6:45	302.3
01-sep	30-sep	20:15	7:30	337.5
01-oct	31-oct	19:00	8:00	403.0
01-nov	30-nov	17:30	7:45	427.5
01-dic	31-dic	17:15	8:15	465.0
Total				4277.5

La utilización del sistema de alumbrado fuera del horario necesario se considera que no produce ningún beneficio para el usuario. El adelanto del encendido y/o atraso del apagado no reporta beneficio alguno si el encendido y apagado teórico son correctos. Por lo contrario, reducir el periodo de funcionamiento significaría no brindar el servicio en cuyo caso no existiría ningún beneficio esta situación se produciría ante un atraso en el encendido y/o adelanto en el apagado (ver figura 5.2.3-1. Las interrupciones del servicio por fallos transitorios puntuales de los puntos de luz serán consideradas mas adelante.



Figura 5.2.3-1: Tiempos de operación del alumbrado urbano.

Como reducción del beneficio por tiempo de operación se considera que 15 minutos de atraso del encendido mas 15 minutos de adelanto del apagado es la máxima ausencia del servicio aceptada con penalización para evaluar el beneficio. Esto conduce a: 30 minutos x 365 días = 182,5 hs/año que corresponde aproximadamente al 5% de desfase horario anual. Para periodos mayores se considera inadmisibile la ausencia del servicio. Bajo estas consideraciones el factor beneficio en términos del tiempo de operación se define como se indica en ecuaciones 5.2.3-1 representadas en figura 5.2.3-2.

$$k(T_o) = \begin{cases} 1 & \text{para } T_o \geq T_{OR} \\ T_o / T_{OR} & \text{para } 0.95 \cdot T_{OR} \leq T_o < T_{OR} \\ 0 & \text{para } T_o < 0.95 \cdot T_{OR} \end{cases} \quad 5.2.3-1$$

donde:

- $k(T_o)$: factor de benefici que considera el tiempo de operación
- T_o : tiempo de operación anual real de la instalación analizada.
- T_{OR} : tiempo de operación anual de referencia, corresponde al tiempo acumulado anual de tabla 5.2.3-1 para 41° de latitud.

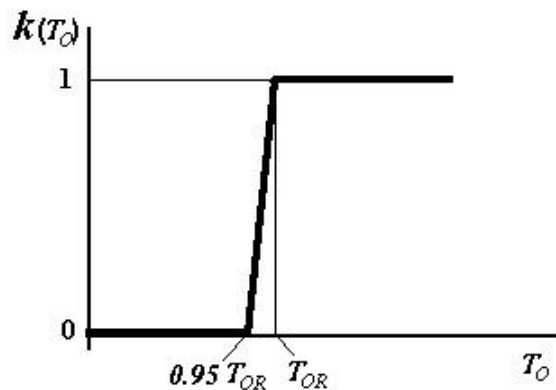


Figura 5.2.3-2: Factor beneficio en términos del tiempo de operación

Debido a la depreciación por envejecimiento y suciedad los sistemas de alumbrado se dimensionan para un valor inicial de flujo mayor que el mínimo mantenido el cual en teoría se alcanzaría momentos antes de efectuar el mantenimiento correspondiente. El sistema de control de potencia o regulador de flujo, podría disponer de un lazo adicional de realimentación de control con la señal de una fotocélula que permitiera mantener la iluminancia sobre la calzada al valor mínimo mantenido después del mantenimiento correspondiente. Estos sistemas se han estudiado para aplicarlos en alumbrado de interiores en edificios, sin embargo el beneficio generado no ha justificado su implantación hasta la fecha **Clear et al.(1999)**[19].

5.2.3 Frecuencia y duración de fallos

En cualquier instalación ocurrirán fallos en forma aleatoria por la naturaleza propia de los componentes. En interiores, oficinas por ejemplo, los fallos puntuales de lámparas afectara relativamente poco la uniformidad del ambiente en general, debido a que usualmente se emplea una distribución uniforme y de alta densidad de las luminarias. El nivel medio de iluminancia en este caso se vería afectado proporcionalmente al porcentaje de lámparas con fallos. En alumbrado público la baja densidad hace que un punto de luz fuera de servicio produzca (dependiendo de la separación existente) un espacio sumamente oscuro aun cuando a escala de una población los valores medios de iluminancia no se vean afectados prácticamente.

La presencia de espacios oscuros, además del problema de seguridad vial y ciudadana que implica reduce la imagen ciudadana, esto se agrava si los fallos persisten mucho tiempo por falta de un mantenimiento adecuado. Evaluar el efecto objetivo de fallos puntuales sobre el beneficio es el objetivo del factor averías permanentes.

El porcentaje de averías permanentes (*PAP*) indica el porcentaje medio de puntos de luz fuera de servicio, probable de observar por la noche en una zona o instalación. Puede determinarse por inspección periódica de toda la población o muestreo aleatorio. En una instalación con gestión centralizada y control individual de los puntos de luz, sería posible registrar el *PAP* por monitoreo permanente. Una estimación del *PAP* basado en registros históricos de fallos, el tiempo necesario para la reparación y la suposición de una distribución temporal uniforme de fallos, se puede obtener mediante ecuac. 5.2.3-1:

$$PAP = \frac{Tfs \cdot AA}{NPL \cdot 365} \cdot 100 \quad 5.2.3-1$$

donde:

PAP: porcentaje de averías permanente

AA: Averías anuales. Se obtiene de registros históricos.

NPL: Número de puntos de luz.

Tfs: tiempo medio de fuera de servicio de un punto de luz o tiempo transcurrido desde el fallo hasta que esta se repara, en días. Se puede suponer que es el tiempo desde la detección hasta la reparación.

A partir del *PAP* se determina el factor del beneficio que tiene en cuenta la frecuencia y duración del fallos. El factor averías del beneficio $k(PAP)$ se define del siguiente modo: a) el beneficio será 1 mientras *PAP* este por debajo de un mínimo exigido b) el beneficio será nulo si el *PAP* esta por arriba de un máximo. De este modo resultan la ecuación 5.2.3-2.

$$k(PAP) = \begin{cases} 1 & \text{si } PAP \leq PAP_{min} \\ 1 - [(PAP - PAP_{min}) / (PAP_{max} - PAP_{min})] & \text{si } PAP_{min} \leq PAP \leq PAP_{max} \\ 0 & \text{si } PAP > PAP_{max} \end{cases} \quad 5.2.3-2$$

$k(PAP)$: factor del beneficio que considera los fallos de la instalación

PAP_{min} : porcentaje de averías permanente mínimo exigido

PAP_{max} : porcentaje de averías permanente maximo permitido

PAP : porcentaje de averías permanente actual

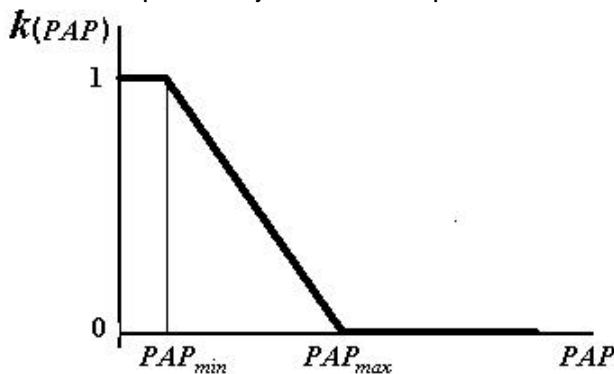


Figura 5.2.3-1: Factor beneficio en términos de frecuencia y duración de fallos

Datos recogidos en 21 poblaciones de Cataluña, España por muestreo de calles indican que la media observada del porcentaje de averías permanente es 2,9% [20]. El valor mas exigente de *PAP* fijado por un ayuntamiento fue del 1%, valor que se considerará como mínimo con beneficio igual a 1. El máximo aceptable será 3% adoptado como resultado del valor medio observado. Bajo estas restricciones tan exigentes que mantendrían muy bajo el *PAP* y dado que los fallos de puntos de luz son aleatorias se puede considerar bajo estas circunstancias que es independiente el nivel de alumbrado de la frecuencia y duración de fallos.

5.2.4 Apariencia de la instalación

En algunas situaciones particulares, las instalaciones de alumbrado se diseñan con criterios estéticos o decorativos. Ya sea por que están ubicadas en un entorno histórico o por motivaciones propias del ayuntamiento la apariencia de las instalaciones cobra importancia afectando tres aspectos en general, el costo de instalación, la eficacia global (utilización de la instalación) y el mantenimiento. Las instalaciones puramente decorativas no serán consideradas en el presente trabajo ya que el objetivo es evaluar el servicio del alumbrado y no la apariencia en si de las instalaciones. En toda otra situación donde se combine la apariencia y la funcionalidad, valorar la apariencia tiene como objetivo asignar un factor que equilibre a aquellas instalaciones que por su apariencia y mayores costos se verían desfavorecidas aun cuando en todos los aspectos del beneficio fueran equivalentes.

La dimensión apariencia de una instalación tendrá una escala discreta que puede ser del tipo escalonada con adjetivos calificativos o con dos adjetivos calificativos opuestos separados por valores numéricos (1 a 5 o 1 a 7).

Los requisitos que debe cumplir la escala es que cada escalón tenga un valor unívoco y distinto a los demás asociado. Un ejemplo de escala ordenada del primer tipo se indica en tabla 5.2.4-1. La separación entre adjetivos no es relevante ya que un peso relativo de cada adjetivo será asignado tomando como referencia uno de ellos mismos.

El peso de cada adjetivo (V_x) es el valor que se estaría dispuesto a pagar o aceptar por una apariencia x de la instalación. El valor asignado a V_x es atributo o criterio de quien realiza la evaluación. En cada situación a evaluar habrá una apariencia apropiada establecida previamente por las características de la zona etc. que será tomada como referencia. El factor apariencia del beneficio de la instalación a evaluar se calcula como se indica en 5.2.4-1.

$$k(\text{Apariencia}) = \frac{V_x}{V_R} \quad 5.2.4-1$$

donde:

V_x : valor que se estaría dispuesto a pagar o aceptar por la apariencia x

V_R : Valor de la apariencia de referencia

Tabla 5.2.4-1: Apariencia de la instalación y factores de peso para evaluar el beneficio

Orden	Apariencia actual	V_x	Apariencia apropiada		
			neutra	atractiva	decorativa o diseño
1	descuidada	0.95	0.95	0.82	0.63
2	neutra	1.0	1.0	0.87	0.67
3	atractiva	1.15	1.15	1.0	0.76
4	decorativa/diseño	1.5	1.5	1.3	1.0

Si la instalación a evaluar estuviera en un ámbito histórico donde la implantación de luminarias decorativas estuviera justificada, la apariencia de referencia sería decorativa o de diseño y los factores $k(\text{Apariencia})$ resultantes correspondería a la última columna de tabla 5.2.4-1. De este modo instalaciones con otras apariencias distintas a decorativas se verían desfavorecidas con esta ponderación. En el caso de la existencia de varias zonas o calles un factor apariencia medio por cuadro se puede obtener ponderando sobre la base del número de puntos de luz de cada zona o calle en que se halla particionado el cuadro.

$$k(A)^* = \frac{\sum_{i=1}^n k(A_i) \cdot NPL_i}{\sum_{i=1}^n NPL_i} \quad 5.2.4-2$$

donde:

$k(A)^*$: factor del beneficio ponderado, para considerar la apariencia de la instalación

$k(A_i)$: factor del beneficio para considerar la apariencia de la instalación i

NPL_i : Numero de puntos de luz de la instalación i

En forma similar al caso de apariencia de la instalación, la reproducción del color de las fuentes de luz empleadas es un factor que puede ser considerado utilizando una escala similar.

5.3 Valoración de los costos

Los costos del sistema de alumbrado se pueden agrupar en:

- costos de instalación
- costos de consumo de energía
- costos de mantenimiento y
- costos de eliminación o reciclado

Un análisis global de costos que permita comparar instalaciones o efectuar un seguimiento de la evolución de costos debe cubrir el ciclo de vida de la instalación que puede variar entre 15 y 20 años.

Durante el ciclo de vida existen distintos periodos en los cuales se realizan inversiones y gastos. El capital utilizado en proyecto, materiales, construcción, mano de obra etc. tanto de la instalación eléctrica como del alumbrado, se invierte inicialmente y tiene un costo financiero. Por otra parte los gastos operativos, de explotación y eliminación se realizan en distintos periodos de tiempo. Todos estos costos para poder ser evaluados y comparados con otras alternativas deben ser trasladados a un mismo instante de tiempo como el valor presente o a una cuota anual equivalente estos conceptos son discutidos para su aplicación a la relación costo-beneficio en alumbrado urbano en 5.3.5. Los distintos costos que intervienen junto a los factores más importantes son analizados en la presente sección.

5.3.1 Costos de instalación

Los costos considerados en la instalación comprenden los necesarios para la construcción y puesta en funcionamiento de la instalación. Estos pueden variar dependiendo de las fluctuaciones del mercado, políticas de descuento comercial, etc.

Los elementos que se consideran en los costos de instalación son:

- Luminarias, artefactos de alumbrados, lámparas, equipos auxiliares,
- Soportes (báculos), cimentaciones, puestas a tierra,
- Canalizaciones e instalaciones eléctricas (subterráneas o aéreas), cableados interiores de columnas, conexiones etc.
- Montajes, acabados y puesta en funcionamiento
- Cuadros de medición de energía, cuadros de mando, protecciones, elementos de encendido, maniobra, estabilización de tensión, regulación, puesta a tierra, etc.
- Porcentajes correspondientes a beneficio industrial (en obra pública 6%), gastos administrativos (13% en obra pública), imprevistos (usualmente 1%) e IVA (16% actualmente).

en cuyo caso los costes se pueden englobar en la siguiente expresión:

$$P = N.G$$

5.3.1-1

donde:

P: Costo de la instalación

N: número de puntos de luz

G: Costo de la instalación por punto de luz

5.3.1.1 Costos de renovación de instalaciones

Durante el transcurso de la vida de una instalación generalmente es necesario reemplazar algunos de sus componentes, debido a envejecimiento de los mismos, debido a variación de las exigencias del servicio o por adaptación a nuevas tecnologías más eficientes. El análisis de costos en estos casos será similar al de costos de instalación afectando únicamente los componentes objeto de la renovación.

Los componentes renovados tienen un costo de capital y mano de obra y frecuentemente un costo de eliminación o reciclado que debe ser considerado. Raras veces es posible reutilizar componentes pero si este fuera el caso podría haber un beneficio económico que redujera los costos de renovación. Los posibles cambios en el consumo energético suscitados por la renovación de la instalación deben ser considerados en los costos de explotación y mantenimiento que se analizan en 5.3.2 y 5.3.3. En instalaciones de alumbrado es todavía frecuente la utilización de equipos auxiliares con reactancias magnéticas cuya vida media es de 10 años. Si el ciclo de vida de una instalación es de 15 a 20 años este sería un ejemplo de un componente a renovar a la mitad de la vida de la instalación.

5.3.2 Costos por consumo de energía

Los costos de consumo de energía, en aquellos casos de políticas tarifarias sin discriminación horaria o de ningún tipo, pueden estimarse mediante la siguiente expresión:

$$C_E = N \cdot P_E \cdot C_{KWh} \cdot T_U \quad 5.3.2-1$$

donde:

- C_E : Costo de consumo de energía anual
- N : Número de puntos de luz de la zona, instalación o del ayuntamiento, considerado en el estudio.
- P_E : Potencia eléctrica por punto de luz incluyendo pérdidas del equipo auxiliar, en el conexionado y en los conductores, en [KW].
- C_{KWh} : Costo de la energía eléctrica en caso de tarifa única (incluidos impuestos) en [\$/KWh].
- T_U : tiempo de utilización en horas, acumulado por año de la instalación en caso de funcionamiento a régimen sin reducción de flujo luminoso o el equivalente considerando porcentaje de reducción y duración de la misma.

En caso de existir un régimen de tarifas especial, como es el caso de España, se empleará expresión 5.3.2-2.

$$C_E = [(N \cdot P_E \cdot T_U \cdot T_E \cdot D + P_C \cdot TP) \cdot Kr + C_{AE}] \cdot (1+IVA) \quad 5.3.2-2$$

donde:

- N : Número de puntos de luz de la zona, instalación o población considerado en el estudio.
- P_E : Potencia eléctrica por punto de luz incluyendo pérdidas del equipo auxiliar, en el conexionado y en los conductores, en [Kw].
- T_U : Tiempo de utilización equivalente, considerando porcentaje de reducción por regulador de potencia y duración del mismo [hs].
- T_E : término de energía
- D : complemento por discriminación horaria
- P_C : potencia contratada en [Kw]
- TP : término de potencia en [Ptas./Kw] (depende del tipo de tarifa contratada)
- Kr : complemento % por energía reactiva
- C_{AE} : costo del alquiler de equipos [Ptas.]
- IVA : impuesto al valor añadido (16%)

5.3.3 Costos de mantenimiento

Los costos de mantenimiento de una población dependen de la política adoptada. En el caso mas general los factores que se ponen a consideración son los siguientes:

- control general de funcionamiento
- revisiones sistemáticas o periódicas
- reparación de averías
- sustitución periódica de lámparas
- sustitución periódica de otros componentes
- limpieza de luminarias y lámparas
- pintura
- porcentaje correspondiente a empresas contratistas

De los costos mencionados los tres primeros y el último formarían parte de los gastos o costos fijos mientras que los restantes serían gastos o costos variables que dependen de la modalidad o política de mantenimiento. Los costos de limpieza de luminarias suelen depender de la altura del punto de luz y del tipo de luminaria, si es abierta o cerrada, pues los medios que intervienen en cada caso y la duración o dificultad de la tarea son distintos y producen diferentes costos en cuyo caso pueden emplearse los factores de ajuste de la tabla 5.3.3-1 [21].

La tendencia actual es de emplear luminarias cerradas tipo IP 54 o superior sin embargo existen todavía algunas instalaciones con luminarias abiertas que gradualmente son retiradas de servicio en la medida de las posibilidades de los ayuntamientos.

Tabla 5.3.3-1 Factores de ajuste para distintos tipos de luminarias y alturas de montaje [21]

Tipo de luminaria	Altura de montaje	Costo relativo
Cerrada (\geq IP2)	> 5 m	1,0
Abierta (<IP2)	> 5 m	1,25
	< 5 m	
decorativa o de diseño		1,5

Los costos de sustitución de lámparas dependen de las estrategias de mantenimiento adoptadas, donde en algunos casos se combina además con las operaciones de limpieza. A este respecto los costos de sustitución y limpieza se pueden clasificar en [22] :

- a) Sustitución programada masiva de lámparas mas limpieza programada masiva de luminarias.
- b) Sustitución correctiva y programada de lámparas mas limpieza programada masiva de luminarias.
- c) Sustitución correctiva de lámparas mas limpieza programada masiva de luminarias.
- d) Sustitución correctiva de lámparas con limpieza simultanea.

Durante las reposiciones puede darse el caso del empleo de material reciclable. La implantación de esta política debe reunir ciertas condiciones para que sea viable. En el caso de la utilización de lámparas recicladas la procedencia de las mismas puede originarse en las sustituciones correctivas que luego son retiradas en un cambio masivo y que aun estarían en condiciones de funcionamiento. El ahorro supuesto al reutilizar componentes debe ser ponderado frente a los costos que la implementación de dicha política significa, por ejemplo costos de preparación, control, almacenamiento del material, etc.

La frecuencia anual de las operaciones de limpieza y sustitución de lámparas se establecen de forma de mantener la calidad del servicio, es decir las condiciones de iluminación adecuadas, disponibilidad del sistema etc., a costos razonables.

Identificados los costos de materiales, mano de obra, equipamiento, etc., el tipo de política a implementar y la frecuencia de las operaciones anuales a realizar pueden ser ahora determinados para obtener los mínimos costos con los mayores beneficios posibles.

5.3.3.1 Sustitución programada masiva de lámparas mas limpieza programada masiva de luminarias

Los cambios masivos que suponen el remplazo de un número importante de componentes requieren de cierto tiempo para ser efectuados lo que dependerá de los medios técnicos y del personal con que se cuente a tal fin.

Es frecuente observar la división en sectores de una población o ayuntamiento para optimizar la ejecución de las operaciones programadas conduciendo así a menores costos, ya sea debido a la ejecución en menor tiempo o a mayor facilidad de acuerdo a ciertas similitudes en las características de instalaciones, o del recorrido de los vehículos etc. En algunas poblaciones la división en sectores respeta algún esquema administrativo preestablecido lo cual puede no ser lo mas apropiado.

Los costos anuales pueden determinarse, básicamente, mediante la expresión 5.3.3.1-1.

$$C_{MANT.} = [N \cdot (n \cdot N_L \cdot CL + C_{MOP}) / T_P] + [N \cdot C_{MOL} / T_L] \quad 5.3.3.1-1$$

El primer sumando de 5.3.3.1-1 corresponde a costos de sustitución programada de lámparas y el segundo a costos de limpieza. Los distintos términos involucrados corresponden a:

$C_{MANT.}$: costo de mantenimiento

N : número de luminarias

n : número de lámparas por luminaria

N_L : número de luminarias por punto de luz

CL : costo por lámpara

C_{MOP} : costo de mano de obra de sustitución programada

C_{MOL} : costo de mano de obra de limpieza programada

T_P : periodo de sustitución programado masivo [años]

T_L : periodo de limpieza programada masiva de luminarias [años]

En general se trata de abaratar costos por lo que frecuentemente se repone lámpara y se limpia la luminaria al mismo tiempo, en cuyo caso los periodos de limpieza son fracciones del de sustitución programada:

$$T_L = T_P / N_{Limp.} \quad 5.3.3.1-2$$

$N_{Limp.}$: número de limpiezas en el período de cambio de lámparas programado

5.3.3.2 Sustitución correctiva y programada masiva de lámparas mas limpieza programada masiva de luminarias.

Una de las políticas mas frecuentemente implementadas en alumbrado urbano es la sustitución correctiva y programada masiva de lámparas mas limpieza programada masiva de luminarias. Los costos *anuales* relacionados con esta política se pueden agrupar en tres sumandos, el de reposiciones correctivas, masivas y limpieza:

$$C_{MANT} = \left[\left(\frac{f}{100} \right) \cdot n \cdot N_L \cdot N \cdot (CL + C_{MOC}) / T_P \right] + \left[N \cdot (n \cdot N_L \cdot CL + C_{MOP}) / T_P \right] + \left[N \cdot C_{MOL} / T_L \right] \quad 5.3.3.2-1$$

donde:

- C_{MANT} : costo de mantenimiento
- f : porcentaje de fallos de lámparas antes que se cumpla (o durante) el periodo de sustitución programada masiva.
- n : número de lámparas por luminaria
- N_L : número de luminarias por punto de luz
- N : número de luminarias
- CL : costo por lámpara
- C_{MOC} : costo de mano de obra correctiva
- T_P : periodo de sustitución programado masivo [años]
- C_{MOP} : costo de mano de obra de sustitución programada
- C_{MOL} : costo de mano de obra de limpieza programada
- T_L : periodo de limpieza programada masiva de luminarias [años]

Si no se disponen registros históricos que puedan utilizarse, una estimación de “ f ”, puede efectuarse a partir de los datos de supervivencia de fabricantes de lámparas mediante la expresión:

$$f \sim [1 - \text{Supervivencia}(T_U, T_P)] \quad 5.3.3.2-2$$

donde:

- T_P : periodo de sustitución programado masivo [años]
- T_U : tiempo de utilización en [hs], acumulado por año de la instalación en caso de funcionamiento a régimen sin reducción de flujo luminoso o el equivalente considerando porcentaje de reducción y duración de la misma.

Se debe tener siempre presente que en la práctica las condiciones de funcionamiento se apartan de las de ensayo del fabricante por lo cual la fracción de fallos de lámparas varia.

A titulo comparativo valores de f para un tiempo de utilización T_U de 4000hs. y un período de sustitución programado T_P de 3 años se indican en tabla 5.3.3.2-1. La tercera columna de la tabla muestra los resultados de un análisis de datos históricos realizado por **Manzano (1998)** [23] que abarca un período de 6 años, entre 1992 y 1998, durante el cual se realizó un seguimiento de 1443 puntos de luz por parte de una empresa contratada por el Ayuntamiento de Vic (Cataluña, España) para el mantenimiento. Durante dicho período se realizaron 9.957 operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo. Los cambios masivos de lámparas se realizaron cada 2,8 años aproximadamente.

Tabla 5.3.3.2-1 Porcentajes de lámparas fundidas en un periodo de cambio masivo de 3 años con $T_U = 4.000$ hs.

Lámpara		% de lámparas fundidas		
		Philips [#] [24]	C.I.E. [#] [25]	Autor [23]
Sodio AP (Son)	50W	14	11	19
	70W			
	150W	8		30
	250W	5		11,4
	400W	12		43,2
Sodio BP (Sox)		20	38	100 [†]
Mercurio (Color Corregido)	50W	20	12	90
	80W			
	125W			71
	250W	30		45,6
	400W			24,3
Inducción (QL)		5		
Fluoresc. Tub. ind.		10	4 a 30	

Nota #: 12 000hs de funcionamiento equivalen a 3 años con $T_U = 4.000$ hs

Nota †: Sox 135W.

La **IESNA DG4(1993)** [26] ejemplifica un análisis económico de instalaciones empleando una tasa de sustitución anual del 2% para lámparas de Sodio AP con lo cual en 3 años $f = 6\%$.

5.3.3.3 Sustitución correctiva de lámparas mas limpieza programada masiva de luminarias

Bajo esta política de mantenimiento se realiza un actuación sobre el punto de luz cuando se reporta o constata durante una inspección el no funcionamiento. De ser necesario se efectúa la sustitución de los componentes con fallos. En el caso de sustitución de lámparas los costos pueden estimarse sobre la base de la siguiente expresión:

$$C_{MANT} = [f \cdot n \cdot N_L \cdot N \cdot (CL + C_{MOC})] + [N \cdot C_{MOL} / T_L] \quad 5.3.3.3-1$$

donde

C_{MANT} : costo de mantenimiento

f : es la fracción anual de lámparas con fallos respecto del total instaladas en la zona, o población estudiada, bajo una política de mantenimiento correctivo.

n : número de lámparas por luminaria

N_L : número de luminarias por punto de luz

N : número de luminarias

CL : costo por lámpara

C_{MOC} : costo de mano de obra correctiva

C_{MOL} : costo de mano de obra de limpieza programada

T_L : periodo de limpieza programada masiva de luminarias [años]

Como fracción anual de recambio de lámparas bajo una política de mantenimiento correctivo se recomienda emplear [22].

$$f = T_U / T_{50\%} \quad 5.3.3.3-2$$

donde:

T_U : tiempo de utilización en [hs], acumulado por año de la instalación en caso de funcionamiento a régimen sin reducción de flujo luminoso o el equivalente considerando porcentaje de reducción y duración de la misma.

$T_{50\%}$: vida media (average rated life), tiempo en funcionamiento hasta el 50% de supervivencia de las lámparas

Valores indicativos de f para $T_U = 4000$ hs y distintos tipos de lámparas se indican en tabla 5.3.3.3-1. Otras recomendaciones [26] indican $f = 0,145$ para lámparas de Sodio AP.

Tabla 5.3.3.3-1: Valores orientativos de $T_{50\%}$ y f para distintos tipos de lámparas bajo política de cambios correctivos

Lámpara	$T_{50\%}$ [hs]	f
Sodio AP	24.000	0,166
Sodio BP	16.000	0,25
Mercurio CC	24.000	0,166
Halogenuros metálicos	18.000	0,22
Fluorescentes halofosfato	16.000	0,25
Fluorescentes Trifosforo	16.000	0,25

Bajo una política de cambios correctivos únicamente, la edad promedio de la población de lámparas instaladas será de aproximadamente 7 años [26]. Debido a la depreciación del flujo luminoso de las lámparas las condiciones de iluminación se verán depreciadas. De no existir un control apropiado, la *tasa de fallos* o porcentaje de puntos de luz fuera de servicio permanente por noche puede incrementarse, reduciendo las condiciones de iluminación debajo de las recomendadas y aumentando los costos de mantenimiento.

Aun cuando el porcentaje de fallos sea alta estas se producirán en forma aleatoria con lo cual será probable encontrar puntos de luz consecutivos con lámparas depreciadas. En alumbrado interior de edificios este efecto puede verse reducido al compensar con distribuciones uniformes de luminarias en el área iluminada, pero en alumbrado urbano al ser generalmente distribuciones regulares de luminarias a lo largo de las vías de circulación no se compensa con facilidad.

5.3.3.4 Sustitución correctiva de lámparas con limpieza simultanea.

El caso presente es similar al anterior en lo que a cambios correctivos se refiere, se adiciona la tarea simultanea de limpieza de la luminaria cuando se efectúa el remplazo. Tal como se mencionara en la sección anterior bajo una política de sustitución correctiva, la edad promedio de las lámparas de una población puede ser elevada con la consiguiente depreciación del flujo luminoso y al no existir una limpieza programada se agrega la depreciación por suciedad de la luminaria que agrava aún mas la situación.

Como los fallos son aleatorias también puede presentarse el caso de puntos de luz donde se hubiera efectuado un cambio y limpieza recientemente en cuyo caso puede omitirse esta última operación.

$$C_{MANT} = [f \cdot n \cdot N_L \cdot N \cdot (CL + C_{MOCL})] \tag{5.3.3.4-1}$$

donde

- f : es la fracción anual de lámparas con fallos respecto del total instaladas en la zona, o población estudiada, bajo una política de mantenimiento correctivo.
- n : número de lámparas por luminaria
- N_L : número de luminarias por punto de luz

- N : número de luminarias
 CL : costo por lámpara
 C_{MOCL} : costo de mano de obra correctiva mas limpieza simultanea.

5.3.4 Costos de reciclaje

Durante el ciclo de vida de las instalaciones de alumbrado existen componentes que por su naturaleza sufren fallos o reducen sus prestaciones y deben ser reemplazados con cierta periodicidad. Los costos de sustitución de dichos componentes han sido analizados en la sección anterior.

En instalaciones de alumbrado el componente mas susceptible de fallo es la lámpara. Un 95% de las lámparas utilizadas en alumbrado urbano es del tipo de descarga, que contienen mercurio. Datos del contenido medio de mercurio por unidad de peso se indica en tabla 5.3.4-1.

Tabla 5.3.4-1: Contenido de mercurio de las lámparas de descarga, datos de la Federación Europea de Fabricantes **ELCF DL(1997)** [27]

Tipo de lámpara	Peso medio por lámpara [mg]
Fluorescente tubular	15
Fluorescente compacta	5
Mercurio AP	30
Mercurio c/vapores metálicos	30
Sodio AP	25
Sodio BP [#]	-

no contienen mercurio

La presencia del mercurio en las lamparas de descarga, es esencial en el proceso de generación de luz y su presencia se justifica debido a la mayor eficiencia respecto de las lamparas incandescentes.

En la UE si la cantidad de luz generada por las lamparas de descarga (eficacia = 76 lm/W) tuviera que ser remplazada por lamparas incandescentes (12,8 lm/W) la demanda adicional de energía sería de 670 millones de MWh por año, lo que equivaldría a quemar 205 millones de toneladas de carbón adicionales en centrales térmicas convencionales con a una emisión de 675 millones de toneladas de CO₂ [27]. Como el carbón contiene 0.1 ppm (partes por millón) [28] de mercurio el consumo adicional generaría 20,5 toneladas de Hg por año además del dióxido de sulfuro, oxido de nitrógeno, perdidas de calor y cenizas adicionales, con lo cual sería peor el remedio que la enfermedad.

El mercurio (Hg) contenido en las ampollas de las lámparas de descarga no representa ningún riesgo durante el funcionamiento de las lámparas. El problema ocurre cuando la ampolla se rompe al ser desechada la lámpara por alcanzar su vida útil o por fallos prematuros. El Hg liberado entra en contacto con el medio ambiente produciendo un impacto ecológico. Si bien el mercurio esta presente en la naturaleza, ciertas concentraciones pueden afectar la salud, causando daños al riñón, cerebro y feto en gestación.

El Hg a temperatura normal es líquido pero es soluble en agua en 60mg/litro a 20°C. El límite recomendado de contenido en agua potable es de 1mg/litro pero 114 ng/l ($n=10^{-9}$) pueden afectar a la salud. Un Kg. de Hg puede en teoría envenenar 1.000.000 m³ de agua **Trond et al. (1995)**[29].

Las personas están típicamente expuestas al Hg por ingestión de pescado contaminado. La Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Department of Health and Human Service U.S. ha establecido mínimos niveles de riesgo para el metilo de mercurio que es la forma orgánica más común del mercurio cuando se consume pescado. El nivel es de 0,3 microgramos por kilo de peso corporal por día **Daly K. (2000)**[30].

Si bien existe un conocimiento del riesgo que representa la eliminación descontrolada de mercurio todavía no existe un criterio unificado sobre que medidas tomar. Los métodos conocidos de eliminación de lámparas son:

- Vertido descontrolado
- Vertido en depósitos controlados
- Incineración controlada
- Reciclado

En Suecia, un método de eliminación basado en incineración y filtrado captaría el 95% del Hg del humo **Begley, K/Linderso T. (1991)** [31]. En U.S. existen nuevas normativas que promueven el reciclado de las lámparas conteniendo Hg [30]. La legislación medioambiental de la UE contempla en las directivas 91/156/CE y 91/686/CE el concepto de gestión del residuo. En el caso de lámparas de descarga como residuo supone aplicar la recolección selectiva y los tratamientos adecuados. En España y en diferentes comunidades esta aprobada la ley reguladora de residuos que emana de las directivas CE. En Cataluña la Ley Reguladora de Residuos 6/1993 establece los centros de recogida selectiva en los municipios de mas de 5.000 habitantes donde entre otros productos se recogerán lámparas de vapor de mercurio y fluorescentes **ICAEN (1998)**[32] **San Martin et al.(1999)**[33].

El Centre de Tractament i Reciclatge de Piles i fluorescentes [34] en Cataluña se encarga de la recolección y eliminación de lámparas fluorescentes y de descarga. El costo para grandes consumidores de lámparas como los ayuntamientos o empresas de mantenimiento de alumbrado es 0,6 €/Kg. (3/1999) con 1000 Kg. mínimos acumulados Para un peso medio de 200g por lámpara de descarga el costo por lámpara sería aproximadamente **0,12 €**. Este costo posiblemente sea subsidiado en parte por las autoridades locales. De acuerdo a EPA Environmental Protection Agency el costo de reciclar una lámpara fluorescente tubular T12 de 40W es de 0,47 € [30] que representa un 25% del costo de la lámpara.

El costo de reciclado por lámpara puede ser incorporado como un costo adicional de la lámpara para evaluar la relación costo-beneficio. El número de lámparas que se eliminarán anualmente se puede estimar, corresponderá a la suma del porcentaje de fallos de lámparas anuales y al porcentaje correspondiente al cambio masivo anual si se aplica dicha política (ver apartados 5.3.3.1 a 5.3.3.4).

Si bien el costo de reciclado real de las lamparas es alto, comparado con los posibles beneficios que podrían obtenerse de la reutilización de productos como materia prima **ELCF R(1998)**[35], frente al costo de la lámpara en sí no es significativo y el mayor beneficio motivador de aplicar políticas de reciclado es la reducción del impacto ambiental al recuperar el mercurio.

Se asume en este análisis que efectivamente el proceso de reciclado es un proceso controlado que separa los componentes tóxicos para su posterior reutilización o eliminación controlada y que los beneficios ambientales de introducir esta tecnología son mayores que los de eliminar descontroladamente los residuos.

El tratamiento de reciclado actualmente en funcionamiento presenta en forma resumida los siguientes pasos:

- a) recepción de lámparas enteras
- b) destrucción en atmósfera aislada controlada
- c) aplicación de técnicas de separación por aspiración o arrastre de líquidos
- d) canalización de fluidos con productos tóxicos a sistemas de absorción
- e) separación de productos tóxicos de los sistemas de absorción en hornos
- f) distribución de los productos resultantes para su reutilización o eliminación como materia inerte o como productos tóxicos no reciclables.

Las principales etapas del proceso se indican en figura 5.3.4-1.

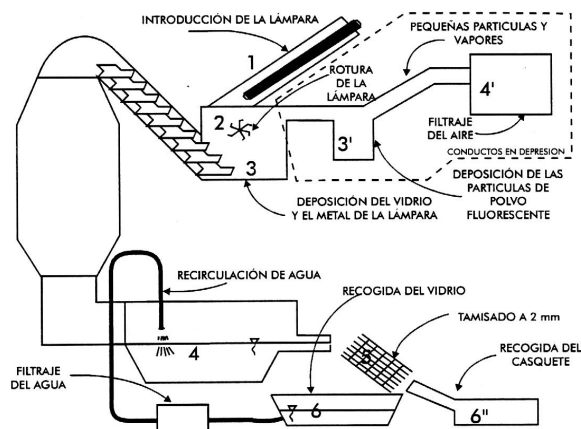


Figura 5.3.4-1: Proceso de reciclado de lámparas de mercurio

5.3.5 Análisis del ciclo de vida

Un criterio de análisis que adquiere cada vez mayor importancia para evaluar económicamente un producto o proceso es el análisis del ciclo de vida (ACV), esto es, estudiar desde la cuna a la tumba todos los costos que intervienen. Este criterio también es utilizado para evaluar el impacto ambiental de un producto o proceso.

En las instalaciones de alumbrado los costos de inversión inicial y los costos anuales de explotación y mantenimiento como así también los costos finales de eliminación ocurren en distintos períodos de tiempo. Por otra parte los costos o gastos anuales experimentan una evolución debido a la inflación durante la vida útil de la instalación.

Se debe introducir en el análisis el concepto del valor del dinero. El dinero tiene un valor en el tiempo, €1.000 hoy no tienen el mismo valor dentro de un año. Depositados a un 5% de interés anual generarían al final del año € 50. Es decir €1.000 hoy se puede decir que equivaldrían a €1.050 dentro de un año. Para poder hacer una equivalencia en el tiempo y comparar distintas alternativas se deben convertir todos los costos, a que dan lugar las instalaciones de alumbrado durante el ciclo de vida, a valores presentes o convertir todos los costos a una cantidad equivalente anual.

5.3.5.1 Valor presente

Los costos anuales de gestión, explotación, mantenimiento, reciclado etc. se denominan en términos económicos: flujos de caja de cantidades anuales iguales. Estas cantidades pueden ser convertidas en una cantidad única o valor equivalente actual llamado valor presente mediante la ecuación 5.3.5.1-1.

$$P = A \cdot \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right] \quad 5.3.5.1-1$$

donde:

- P : valor presente o valor equivalente actual en €
- A : pagos anuales o costo anual en €
- i : oportunidad de inversión o tasa de interés anual como fracción decimal
- n : número de años

de este modo es equivalente una serie de pagos anuales de A € por los próximos n años o un único pago de P € hoy.

Un valor en el futuro también se puede convertir a un valor equivalente presente mediante la ecuación 5.3.5.1-2.

$$P = F \cdot \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad 5.3.5.1-2$$

donde:

- P : valor presente o valor equivalente actual en €
- F : valor futuro o cantidad en el futuro en €
- i : oportunidad de inversión o tasa de interés anual como fracción decimal
- n : número de años

Por medio de esta conversión se puede decir que es equivalente pagar una cantidad P hoy o F dentro de n años. Un valor futuro como el costo de eliminación de la instalación (o ganancia si se recibe dinero por la venta de la instalación) se convierte de esta forma a un valor presente.

El costo total de una instalación a valor presente durante un ciclo de vida de n años será:

$$C_T = C_I + C_A \cdot \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right] + C_F \cdot \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad 5.3.5.1-3$$

donde:

- C_T : costo total durante un ciclo de n años vida
- C_I : costo de inversión de capital
- C_A : costos anuales de explotación y mantenimiento, etc.
- C_F : costos futuros de eliminación de instalaciones.

En caso que los costos anuales sufran variaciones o tengan una tasa de crecimiento el valor presente puede ser calculo como se indica en ecuaciones ecuación 5.3.5.1-4 y 5.3.5.1-5

$$P = \sum_{k=1}^n A \cdot \left(\frac{1+r}{1+i} \right)^k \quad 5.3.5.1-4$$

$$P = A \cdot \frac{(1+r) \cdot [(1+i)^n - (1+r)^n]}{(i-r) \cdot (1+i)^n} \quad 5.3.5.1-5$$

donde:

- P : valor presente o valor equivalente actual en euros
- A : pagos anuales o costo anual en euros
- i : oportunidad de inversión o tasa de interés anual como fracción decimal
- r : tasa de crecimiento o porcentaje de crecimiento de los pagos anuales, como fracción decimal
- n : número de años

5.3.5.2 Cantidad equivalente anual

Otra posibilidad de comparar alternativas es convirtiendo los costos iniciales de inversión de capital de instalaciones en una en un flujo de caja anual constante o cantidad equivalente anual mediante 5.3.5.2-1 obtenida a partir de ecuación 5.3.5.1-1.

$$A = P \cdot \left[\frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad 5.3.5.2-1$$

Los costos futuros de eliminación también pueden ser convertidos en una cantidad equivalente anual mediante ec.5.3.1.2-2 obtenida a partir de ec.5.3.1.1-2.

$$A = F \cdot \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad 5.3.5.2-2$$

El costo total anual equivalente de un ciclo de vida de n años de una instalación será:

$$C_T = C_I \cdot \left[\frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] + C_A + C_F \cdot \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad 5.3.5.2-3$$

donde:

- C_T : costo total anual de un ciclo de n años vida
- C_I : costo de inversión de capital
- C_A : costos anuales de explotación y mantenimiento, etc.
- C_F : costos futuros de eliminación de instalaciones.

Los costos a considerar en el presente trabajo serán reducidos a una cantidad equivalente anual que se denominará costo anual equivalente (CAE)

5.4 Aplicación de la metodología

La aplicación de la relación costo-beneficio requiere determinar por una parte los costos y por otra parte los beneficios.

Los costos de instalación de alumbrado pueden indicarse por instalación concreta, lo que también es frecuente, es referir al número de puntos de luz (costo por punto de luz) o a una unidad geométrica (por Km, m², etc.) de una determinada zona, por ejemplo, para comparar alternativas o estudiar la evolución del servicio. En cualquier caso los costos serán valores a cuota anual equivalente (CAE) o valor presente de acuerdo a lo descrito en 5.3.5 considerando un ciclo de vida de 20 años. El valor monetario de los distintos costos, que intervienen en las instalaciones de alumbrado urbano, deben ser característicos de cada región **Marsden et al.(1981)**[36] y situación socio económica. Los datos de costos a emplear en los cálculos fueron obtenidos por la colaboración de empresas de mantenimiento de alumbrado en Barcelona.

El beneficio por su parte es evaluado como el producto de distintos factores relacionados con los aspectos más relevantes o pertinentes a los objetivos establecidos. Los factores a considerar serán:

$$\text{Beneficio} = k(E).k(T_0).k(PAP).k(A).k(C)... \quad 5.4-1$$

donde:

$k(E)$: factor del beneficio relacionado con la Iluminancia sobre el área de interés.

$k(T_0)$: factor del beneficio relacionado con el tiempo de operación de la instalación

$k(PAP)$: factor del beneficio relacionado con el porcentaje permanente de fallos de la instalación

$k(A)$: factor del beneficio relacionado con la apariencia de la instalación.

$k(C)$: factor del beneficio relacionado con la respuesta al color de las lámparas de la instalación.

Tal como están definidos cada uno de estos factores, el beneficio será un valor comprendido entre 0 y 1. Si se utiliza la relación:

$$C/B = \text{Costos/Beneficios} \quad 5.4-2$$

la dimensión de la misma será el correspondiente a la unidad monetaria y la interpretación que tendrá será el coste de la unidad de beneficio. Aquellas instalaciones que no cumplan con los objetivos de diseño tendrán un beneficio menor por lo tanto un costo relativo mayor. Como criterio de selección ante distintas alternativas se utilizará el mínimo de la función C/B . El problema se plantea cuando el beneficio sea considerado inadmisibles o nulo, debido a valores inaceptables de iluminancia, porcentajes de fallos, tiempos de operación etc. la función C/B tenderá a infinito por lo cual habrá que acotarla para el caso de beneficio nulo. Utilizando la relación inversa:

$$B/C = \text{Beneficios/Costos} \quad 5.4-3$$

esta tendrá una dimensión 1/[unidad monetaria], la interpretación corresponderá al valor beneficio generado por la unidad monetaria. El máximo valor de B/C indicará la mejor situación y en caso de beneficio inadmisibles la relación será nula. Debido a que en este ultimo caso es mas sencillo visualizar gráficas sin asintotas ($B=0$) será utilizada como indicador de calidad de las instalaciones.

El cálculo de B/C sobre instalaciones existentes de alumbrado urbano, debe realizarse con los parámetros y datos más realísticos. Debido a que un factor necesario para la evaluación, el costo energético, se contabiliza por cuadro es conveniente que las instalaciones a evaluar sean todas las correspondientes a un cuadro de distribución de energía. En caso que no de interés evaluar un cuadro en conjunto se puede distribuir el consumo registrado en la potencia de cada punto de luz. En este último caso puede ocurrir que posibles diferencias en el consumo se vean enmascaradas de acuerdo a las divisiones que se efectúen.

Las instalaciones conectadas a un cuadro se agruparan en zonas que guarden cierta homogeneidad respecto de :

- a) tipo de luminaria similar: el grado de protección mecánica (IP) y el tipo de lámpara debe ser similar para poder aplicar un modelo de depreciación por polución ambiental (LOR) , por depreciación de flujo de la lámpara (LLO) y por supervivencia de la lámpara (LSF) representativo.
- b) iluminancia de referencia E_R similar, para determinar un beneficio por zona.
- c) área iluminada similar

Una vez establecidas las zonas con características homogéneas es posible calcular la relación costo-beneficio para un cuadro de mando, detalles más específicos de la preparación de datos de una población se indicaran en capítulo 6 en análisis de instalaciones.

La evaluación de la relación B/C reflejara la situación actual del servicio de la instalación considerada bajo las políticas actuales de explotación, mantenimiento y gestión. Los resultados así obtenidos interesa compararlos con situaciones teóricas de referencia para identificar las posibles fuentes de problemáticas. Las situaciones a comparar serán las siguientes:

actual : instalación actual bajo la política de mantenimiento existente, con consumos y parámetros de la prestación del servicio medidos. Los costos de instalación provienen de datos de proveedores locales, los costos de mantenimiento son los facturados por la empresa contratista al ayuntamiento y los de energía los facturados por la empresa distribuidora.

actual B=1: ídem al caso **actual** pero supuesto un beneficio unitario, es decir los parámetros del servicio (iluminancia media, tasa de averías, tiempos de operación, apariencia) son los óptimos, con lo cual al comparar con la situación anterior cualquier apartamiento se deberá a problemas en los factores evaluados en el beneficio de la situación actual. Los costos considerados son los mismos del caso **actual**.

actual eficiente: instalación **actual** bajo la política de mantenimiento actual pero ahora con un consumo y uso eficiente de la energía, apartamientos de la situación actual serán debidos a diferencias en el consumo. Los costos considerados son los mismos del caso **actual**.

actual óptima: la instalación actual pero ahora bajo una la política de mantenimiento óptima y un consumo y uso eficiente de la energía, apartamientos de la situación actual serán debidos a diferencias en el la política de mantenimiento aplicada. Los costos ahora considerados son costos teóricos correspondientes a un consumo de energía y uso teórico y a la política y período que conducen a la máxima relación Beneficio/Costo. Los costos de instalación son los mismos de los casos anteriores.

diseño óptimo: una instalación con un nuevo diseño siendo este el mas apropiado desde el punto de vista funcional, consumo y uso eficiente de la energía y bajo una política de mantenimiento óptima. Los costos considerados son costos teóricos de un consumo de energía y uso óptimos y a la política y período que conducen a la máxima relación Beneficio/Costo con la instalación de diseño nuevo. Los costos de instalación son los mismos de los casos anteriores.

A su vez dentro de cada situación se considerara la posible implantación de un regulador de potencia lo que permite evaluar su utilización determinando el periodo de retorno del capital invertido.

Para calcular B/C en las situaciones **actual**, **actual $B=1$** y **actual eficiente** se recopilan los datos necesarios de mediciones, operaciones de mantenimiento, registros de consumo de energía, averías, costos, etc. (como se detallan en sección 6.3.2.1) con los cuales se completan unas *planillas de calculo de la relación B/C* que se describen en la siguiente sección.

Para calcular B/C de situaciones **actual óptima** y **diseño óptima** se utiliza ademas de las mismas planillas de calculo anteriores, dos programas de calculo realizados por el autor que optimizan el mantenimiento. El primer programa calcula los costos de aplicar un nuevo mantenimiento donde la relación B/C sea máxima para la instalación actual. Con los datos de la instalación actual y los obtenidos con operaciones de mantenimiento controladas se simulan con el programa cuatro políticas de mantenimiento con distintos intervalos de sustitución y limpieza descritos en 5.3.3. El segundo programa parte de un nuevo diseño realizado con programas de diseño convencionales pero que carecen de la optimización del mantenimiento. Por lo tanto se considera el factor de mantenimiento unitario para calcular la geometría y el número de puntos de luz por Km, datos con los cuales se calcula el número de puntos de luz finales y la política de mantenimiento que conduce a B/C máximo. Detalles de las ecuaciones de estos programas se indican en sección 5.4.2.

Si el calculo de B/C se extiende a distintos cuadros representativos de las zonas o instalaciones de una población es posible obtener un B/C representativo de una población. En poblaciones donde se realice mantenimiento preventivo de cambios o limpiezas masivas, es conveniente tener conocimiento de la fecha y zonas de realización para que al momento de hacer la recolección de datos no coincidan con que todos hayan sido recientemente renovados. Un análisis mas detallado de instalaciones de alumbrado de una población se realiza en capítulo 6.

A continuación se describen las distintas planillas para el calculo de B/C .

5.4.1 Planilla de calculo del costo-beneficio de la instalación

Una planilla de calculo preparada en Excel 97 permite determinar:

- Beneficio por cuadro o zonas de interés
- Tiempos de operación de la instalación
- Costos de energía
- Costos de inversión de capital (instalación) , mantenimiento y renovación
- Costos totales, costos referidos a unidades, relaciones costo-beneficio etc.

5.4.1.1 Planillas de beneficio

El beneficio de la instalación de alumbrado se determina por cuadro y es el producto de considerar los factores iluminancia $K(E)$, porcentaje permanente de averías $K(PAP)$, tiempo de operación $K(T_o)$ y apariencia de la instalación $K(A)$:

- $K(E)$, es calculado para cada zona o calle basándose en, $E_{min.mant}$ (iluminancia mínima mantenida) y E_{med} (iluminancia media promedio de mediciones, detalles de la medición serán indicados en capítulo 6). Cuando existen varias zonas con áreas y niveles distintos, un valor medio ponderado de $K(E)$ se obtiene para el cuadro según se indica en 5.2.1.1. En caso de la existencia de un reductor de potencia centralizado por cuadro, se requieren conocer además $E_{min.mant}$ y E_{med} con reductor en operación. Nuevamente, un valor medio ponderado de $K(E)$ se obtiene por cuadro repitiendo la ponderación con áreas y niveles distintos según se indica en 5.2.1.1. pero ahora con regulador. Finalmente un valor medio de $K(E)$ se obtiene ponderando el tiempo de utilización del regulador, como se indica en 5.2.1.2. El tiempo de utilización del reductor se calcula en una hoja de tiempos de la planilla de cálculo, que se detalla mas adelante. La evaluación de $K(E)$ para un cuadro se indica en tabla 5.4.1.1-1.
- $K(PAP)$, se calcula por cuadro con el porcentaje permanente de averías obtenido de los datos históricos o estadísticos de fallos provistos por el ayuntamiento o la empresa de mantenimiento. El máximo aceptado es 3% y el mínimo esperado 1%. En tabla 5.4.1.1-2 se indica el calculo para el cuadro analizado.
- $K(T_o)$, requiere para su determinación la estimación del posible período de no utilización de la instalación acumulado anual, debido a conexión tardía y/o apagado anticipado, en ambos casos respecto a los horarios recomendados. Exceso en el tiempo de funcionamiento de la instalación se computa como consumo adicional sin efecto sobre el beneficio, por lo que no se considera en $K(T_o)$. En la tabla 5.4.1.1-2 se indican el desfase acumulado anualmente y las horas de operación útiles que resultan del calculo con los horarios de funcionamiento mensual teórico, el real medido o el obtenido de datos de ajuste de relojes astronómicos que se deben ingresar en tabla 5.4.1.2-1, En tabla 5.4.1.2-2 se indica la hoja de la planilla que calcula el desfase acumulado anualmente.
- $K(A)$: se calcula para cada zona o calle de acuerdo a 5.2.4 . La apariencia apropiada y la apariencia actual se ingresa por zona o calle y un valor medio se obtiene al ponderando con el número de puntos de luz como se indica en 5.2.4. En tabla 5.4.1.1-2 se indica el calculo de $K(A)$ para el cuadro considerado.

En tablas 5.4.1.1-1 y 5.4.1.1-2 se ha indicado, a modo de ejemplo, las planillas para la evaluación del beneficio de un cuadro de una población. El cuadro esta formado por cinco zonas o calles. Los datos a ingresar (celdas en fondo gris) son:

dimensiones geométricas de cada zona o calle

NPL número de puntos de luz actuales y potencia de lámpara

NPL_o número de puntos de luz para la situación de diseño óptima con $FM=1$, obtenida con un programa de diseño y cálculo [37][38] para los mismos datos de iluminancia mínima mantenida y área a iluminar de la zona considerada.

NPL_f el número de puntos de luz finales para el FM que produce un B/C máximo resultado del calculo con el programa descrito en 5.4.2 y potencia de lámpara.

reducción % de potencia actual y opcional para una comparación.

E_o , $E_{min.mant}$, E_{med} , actual con 0% de regulación y actual con regulador si existe

El beneficio real de la instalación producto de los factores anteriores se indica al final de tabla 5.4.1.1-2.

Tabla 5.4.1.1-1: Planilla para la evaluación del beneficio de una instalación formada por cinco zonas o calles conectadas al cuadro de mando número 27. Celdas con fondo gris corresponden a datos a ingresar.

Cuadro

27

1. Datos de la Instalación

	Calle o Zona	Geometría			Luminarias						
		ancho [m]		largo [m]	Separac. [m]	actuales		óptimos			
		acera	calzada			NPL	Potencia	NPLo	Potencia	NPLf	Potencia
1	Carrer 1 - 1	2	8	104	13	8	150	4	150	5	150
2	Carrer 2 - 1	2	8	216	27	8	250	5	250	6	250
3	Carrer 3 - 1	0	6	144	16	9	150	5	150	6	150
4	Carrer 4 - 1	4	14	891	27	33	250	30	250	36	250
5	Carrer 5 - 2	2	6	342	18	19	100	11	100	15	100
6											
7											
8											
Total				1697.0		77	14,700	55	11,200	68	13,650
Media				10.6	22.04	190.91		203.64		200.74	

	Actual	Opcional
Reducción % de potencia	40 %	40 %
Horas anuales con potencia 100%	1252.2	1267.8
Horas anuales con potencia reducida	2994.2	3009.8

2. Evaluación del Beneficio (1)

2.1 Factor de iluminancia K(E)

	Calle o Zona	Iluminancias medias [lx]				
		actual sin reductor			actual con reductor	
		Eo	E _{min.mant.}	E _{medida}	E _{min.mant.}	E _{medida}
1	Carrer 1 - 1	44.4	20	25.3	12	15.2
2	Carrer 2 - 1	27.9	20	15.9	12	9.5
3	Carrer 3 - 1	48.8	20	27.8	12	16.7
4	Carrer 4 - 1	29.2	20	16.9	12	10.2
5	Carrer 5 - 2	31	15	18	9	8
6						
7						
8						
Media ponderada		30.93	19.43	17.84	11.66	10.43

	Calle o Zona	area [m²]	sin reductor				con reductor			
			φ _{mm} min.mant.	φ _{medido}	K(E)	φ _{mm} .K(E)	φ _{mmR} min.mant.c/red	φ _R medido	K(E)	φ _{mm} .K(E)
1	Carrer 1 - 1	832	16,640	21,050	1.00	16,640	9,984	12,646	1.00	9,984
2	Carrer 2 - 1	1,728	34,560	27,475	0.59	20,390	20,736	16,416	0.58	12,096
3	Carrer 3 - 1	864	17,280	24,019	1.00	17,280	10,368	14,429	1.00	10,368
4	Carrer 4 - 1	12,474	249,480	210,811	0.69	172,141	149,688	127,235	0.70	104,782
5	Carrer 5 - 2	2,052	30,780	36,936	1.00	30,780	18,468	16,416	0.78	14,364
6										
7										
8										
Total		17950	348,740	320,291			209,244	187,142		
Media ponderada por flujo						0.74				0.72

K(E) sin reductor	-
K(E) c/ reductor	0.73

Notas: NPL: Número de puntos de luz de la zona considerada

NPLo: Número de puntos de luz calculados con FM=1 para el caso óptimo

NPLf: Número de puntos de luz necesarios para compensar la depreciación calculados para que B/CAE sea maximo

Tabla 5.4.1.1-2: Continuación de Planilla para la evaluación del beneficio una instalación formada por cinco zonas o calles conectadas al cuadro de mando número 27

Evaluación del Beneficio (2)

2.2 Factor de averías permanentes K(AP)

% Averías permanente máximo	3 %
% Averías permanente mínimo	1 %

Periodo analizado [años]	1
Averías anuales	60
Tiempo medio fuera de servicio [días]	5.2
% Averías permanentes	1.11
K(AP)	0.94

2.3 Factor tiempo de operación K(To)

Horas de operación teoricas	4277.50
Tolerancia % máxima	5 %
Defasaje anual acumulado	58.95
Horas de operación utiles	4218.55
K(To)	0.99

2.4 Factor de apariencia K(A)

	Calle o Zona	Número de puntos de luz		Apariencia			
		actuales	óptimos	Actual	Apropiada	K(A)	K(A).NPL actual
1	Carrer 1 - 1	8	5	neutra	neutra	1	8
2	Carrer 2 - 1	8	6	neutra	neutra	1	8
3	Carrer 3 - 1	9	6	neutra	neutra	1	9
4	Carrer 4 - 1	33	36	neutra	neutra	1	33
5	Carrer 5 - 2	19	15	atractiva	neutra	1	19
6							
7							
8							
		77	68	Ponderación			1.00

B= K(E).K(To).K(AP).K(A)=	0.68
----------------------------------	-------------

5.4.1.2 Planillas de tiempos de operación

En tabla 5.4.1.2-1 se indica, ejemplificado con valores para Barcelona la hoja de la planilla donde se ingresan los horarios de encendido y apagado del cuadro 27 para los distintos meses del año. Si la operación es realizada mediante relojes astronómicos, los datos de ajuste del mismo son necesarios. En caso de no disponer del dato, se requiere efectuar mediciones con las cuales se puede extrapolar para el resto del año. Con estos datos se han programado las planillas para calcular los siguientes tiempos:

- Tiempo acumulado por encendido posterior y apagado anticipado respecto del teórico, utilizado para determinar $K(T_o)$ (ver tabla 5.4.1.2-2)
- Tiempos de operación diario y anual de la instalación con o sin regulador, utilizado mas adelante para determinar consumos teóricos de energía (ver tabla 5.4.1.2-3)

Tabla 5.4.1.2-1: Planilla para ingresar los tiempos de operación del cuadro analizado.

3. Tiempos de operación de la instalación y del reductor de potencia

3.1 Horarios de operaciones de conexión y desconexión

Mes	Días	Horarios de la instalación				Horarios del reductor					
		teóricos		registrados		existente			optativo		
		TON t	TOFF t	ton r	toff r	Red.%	ton R	toff R	Red.%	ton R	toff R
Enero	31	17:45	8:15	17:53:23	8:06:37	40	23:00:00	8:06:37	40	23:00:00	8:15:00
Febrero	28	18:15	8:00	18:24:17	7:50:43	40	23:00:00	7:50:43	40	23:00:00	8:00:00
Marzo	31	18:45	7:00	18:54:55	6:50:05	40	23:00:00	6:50:05	40	23:00:00	7:00:00
Abril	30	20:30	7:00	20:30:00	7:00:00	40	23:00:00	7:00:00	40	23:00:00	7:00:00
Mayo	31	21:00	6:15	20:54:45	6:20:15	40	23:00:00	6:20:15	40	23:00:00	6:15:00
Junio	30	21:30	6:00	21:22:00	6:08:00	40	23:00:00	6:08:00	40	23:00:00	6:00:00
Julio	31	21:30	6:15	21:22:30	6:22:30	40	23:00:00	6:22:30	40	23:00:00	6:15:00
Agosto	31	21:00	6:45	20:53:47	6:51:13	40	23:00:00	6:51:13	40	23:00:00	6:45:00
Septiembre	30	20:15	7:30	20:14:50	7:30:10	40	23:00:00	7:30:10	40	23:00:00	7:30:00
Octubre	31	19:00	8:00	19:12:37	7:47:23	40	23:00:00	7:47:23	40	23:00:00	8:00:00
Noviembre	30	17:30	7:45	17:37:00	7:38:00	40	23:00:00	7:38:00	40	23:00:00	7:45:00
Diciembre	31	17:15	8:15	17:25:58	8:04:02	40	23:00:00	8:04:02	40	23:00:00	8:15:00
Total	365										

Tabla 5.4.1.2-2: Planilla para calcular desfase acumulado de tiempos por encendido posterior y apagado prematuro.

3.2 Tiempo acumulado por conexión posterior y desconexión anticipada respecto de horarios teóricos

Mes	Diferencias de horarios registrados y teóricos			
	tonr-TONt	TOFFr-toFFt	Diario	Mensual
Enero	0:08:23	0:08:23	0:16:47	8:40:11
Febrero	0:09:17	0:09:17	0:18:35	8:40:12
Marzo	0:09:55	0:09:55	0:19:50	10:14:50
Abril	0:00:00	0:00:00	0:00:00	0:00:00
Mayo	0:00:00	0:00:00	0:00:00	0:00:00
Junio	0:00:00	0:00:00	0:00:00	0:00:00
Julio	0:00:00	0:00:00	0:00:00	0:00:00
Agosto	0:00:00	0:00:00	0:00:00	0:00:00
Septiembre	0:00:00	0:00:00	0:00:00	0:00:00
Octubre	0:12:37	0:12:37	0:25:13	13:01:48
Noviembre	0:07:00	0:07:00	0:14:00	7:00:00
Diciembre	0:10:58	0:10:58	0:21:56	11:19:44
Total [hs]				58.95

Tabla 5.4.1.2-3: Planilla con tiempos de operación diario y anual de la instalación

3.3 Tiempos de operación de la instalación

Mes	Tiempos diarios de operación [hs/día]						Tiempos mensuales de operación [hs/mes]					
	registrados			<i>teóricos con reduc.opcional</i>			registrados			<i>teóricos con reduc.opcional*</i>		
	Pot. 100%	Pot.reducida	Totales	Pot. 100%	Pot.reducida	Totales	Pot. 100%	Pot.reducida	Totales	Pot. 100%	Pot.reducida	Totales
Enero	5:06:37	9:06:37	14:13:13	5:15:00	9:15:00	14:30:00	158.42	282.42	440.83	162.75	286.75	449.50
Febrero	4:35:43	8:50:43	13:26:25	4:45:00	9:00:00	13:45:00	128.67	247.67	376.33	133.00	252.00	385.00
Marzo	4:05:05	7:50:05	11:55:10	4:15:00	8:00:00	12:15:00	126.63	242.88	369.50	131.75	248.00	379.75
Abril	2:30:00	8:00:00	10:30:00	2:30:00	8:00:00	10:30:00	75.00	240.00	315.00	75.00	240.00	315.00
Mayo	2:05:15	7:20:15	9:25:29	2:00:00	7:15:00	9:15:00	64.71	227.46	292.17	62.00	224.75	286.75
Junio	1:38:00	7:08:00	8:46:00	1:30:00	7:00:00	8:30:00	49.00	214.00	263.00	45.00	210.00	255.00
Julio	1:37:30	7:22:30	9:00:00	1:30:00	7:15:00	8:45:00	50.38	228.63	279.00	46.50	224.75	271.25
Agosto	2:06:13	7:51:13	9:57:26	2:00:00	7:45:00	9:45:00	65.21	243.46	308.67	62.00	240.25	302.25
Septiembre	2:45:10	8:30:10	11:15:20	2:45:00	8:30:00	11:15:00	82.58	255.08	337.67	82.50	255.00	337.50
Octubre	3:47:23	8:47:23	12:34:47	4:00:00	9:00:00	13:00:00	117.49	272.49	389.97	124.00	279.00	403.00
Noviembre	5:23:00	8:38:00	14:01:00	5:30:00	8:45:00	14:15:00	161.50	259.00	420.50	165.00	262.50	427.50
Diciembre	5:34:02	9:04:02	14:38:04	5:45:00	9:15:00	15:00:00	172.59	281.09	453.67	178.25	286.75	465.00
Anuales							1252.16	2994.16	4246.31	1267.75	3009.75	4277.50

* Tiempos de operación teóricos con reductor opcional

5.4.1.3 Planilla de costos de energía

Los costos de energía son calculados para tres situaciones:

a) actual: costo del consumo de energía de las instalaciones de alumbrado actuales en el cuadro analizado de acuerdo a las lecturas en un periodo anual de contadores activos y reactivos.

b) actual eficiente: costo teórico del consumo de energía de las instalaciones de alumbrado en el cuadro analizado que sería consumido por la potencia activa instalada, con:

- pérdidas activas mínimas,
- tiempo de operación teórico, descontando el posible tiempo de desaprovechamiento (calculado en hoja de tabla 5.4.1.2-3 última columna)
- sin consumo de energía reactiva.

La existencia de regulador de flujo crearía otra sub-situación por lo cual se calculan en realidad:

b1) actual eficiente sin regulador y

b2) actual eficiente con regulador.

En el caso de presencia de regulador, durante el periodo de uso del mismo, el tiempo de operación teórico es afectado por la reducción porcentual en potencia R% del regulador. A este tiempo se adiciona el de funcionamiento sin regulador (descontando el tiempo de desaprovechamiento) que es calculado en hoja de planilla como se indica en la tabla 5.4.1.2-3 columnas 6 y 7.

c) diseño optimo: costo teórico del consumo de energía de nuevas instalaciones de diseño optimo desde el punto de vista funcional en el cuadro. También en este caso la existencia de regulador de flujo crearía otra sub-situación por lo cual se calculan en realidad:

c1) diseño optimo sin regulador y

c2) diseño optimo con regulador.

Los datos a ingresar en la hoja de cálculo para determinar los costos energéticos se indican con fondo gris en tabla 5.4.1.3-1. Los mismos son: la pérdidas estimadas, el tipo de tarifa contratada y las lecturas activas y reactivas mensuales del último año. Las pérdidas se pueden ajustar entre el 15 y el 20% para que la diferencia porcentual entre el consumo activo de los contadores y el teórico sea mínimo. Los costos anuales de energía para los distintos casos estudiados se indican en tabla 5.4.1.3-2 para tarifa contratada B.0 y potencia instalada menor de 15 Kw.

Tabla 5.4.1.3-1: Planilla para determinar consumos de energía activa y reactiva

4. Costos de energía

4.1 Consumos

Cuadro	27
Núm puntos luz actuales	77
Pot. Instalada [KW]:	14.70
Pot. con NPL óptimos [KW]:	13.65
Averías anuales	60
Reparación media [días]	5.2
Perdidas	1.15
Tiempo anual de utilización	365
Factor de averías:	0.988899
Tarifa:	B.0
Regulador de flujo	Si

Año	1988												1999	Total/media
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem.	Octubre	Noviem.	Diciem.	Enero	
Mes														
Fecha de lectura	02/01/98	02/02/98	02/03/98	31/03/98	30/04/98	28/05/98	26/06/98	03/08/98	01/09/98	28/09/98	02/11/98	01/12/98	30/12/98	
Lectura Activa I	985204	990672	995303	999659	1003192	1006133	1008902	1012531	1015787	1019313	1024528	1029729	1035112	
KWh medidos	5468	4631	4356	3533	2941	2769	3629	3256	3526	5215	5201	5383		49908
Días de lectura	31	28	29	30	28	29	38	29	27	35	29	29		362
Días del mes en curso	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31		365
KWh consumidos	5468	4631	4656	3533	3256	2864	2961	3481	3918	4619	5380	5754		50521
Tiempos equival. de oper.regist.*	327.86	277.26	272.35	219.00	201.19	177.40	187.55	211.29	235.63	280.98	316.90	341.24		3048.6
KWh teóricos	5481	4635	4553	3661	3363	2966	3135	3532	3939	4697	5298	5705		50965
(KWhcosum. - KWh teor.) / KWh teor.	-0.24	-0.09	2.27	-3.50	-3.19	-3.41	-5.58	-1.46	-0.54	-1.66	1.56	0.87		-0.87 %
Lectura Reactiva	92118	94599	96572	98770	101067	102057	103447	105323	106928	108475	110401	112214	113661	
Consumo medido KVarh	2481	1973	2198	2297	990	1390	1876	1605	1547	1926	1813	1447		1795
Cos φ	0.91	0.92	0.89	0.84	0.95	0.89	0.89	0.90	0.92	0.94	0.94	0.97		0.91
Kr%	-1	-1	0	3	-2	0	1	0	-1	-2	-2	-3		-0.51

* Tiempos de operación registrados con pot. 100% mas los tiempos bajo uso del reductor afectados por la reduccion de potencia.

Tabla 5.4.1.3-2: Costos de consumo de energía anual, para tarifa contratada B.0 y lecturas de cuadro N°27.

4.2 Facturación**Tarifa B.0**

Caso	actual	actual eficiente		diseño óptimo	
Reducción %	40 %	0 %	40 %	0 %	40 %
Potencia Instalada [KW]:	14.7	14.7	14.7	13.65	13.65
Pot. Instalada/fact.perdidas [KW]:	-	16.91	16.91	15.70	15.70
Tiempo de op. anual equivalente	-	4277.5	3073.6	4277.5	3073.6
Consumo energía activa (kWh)	49908	72311	51959	67146	48248
Consumo energía reactiva (kVArh)	21543	0	0	0	0
Alquiler de los equipos de medida	3.76 €	3.76 €	3.76 €	3.76 €	3.76 €
Período considerado [meses]	12	12	12	12	12

Valores variables

Termino de energía (€/kWh)	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Impuesto electricidad (%)	5.1 %	5.1 %	5.1 %	5.1 %	5.1 %
% IVA	16 %	16 %	16 %	16 %	16 %

Complemento por consumo reactivo

Cos φ	0.92	1	1	1	1
%K _r	-0.8	-4	-4	-4	-4

Costes desglosados

Coste de la energía activa	3,494.00 €	5,062.00 €	3,637.00 €	4,700.00 €	3,377.00 €
Coste de la energía reactiva	-28.00 €	-202.00 €	-145.00 €	-188.00 €	-135.00 €
Impuesto sobre electricidad	177.00 €	248.00 €	179.00 €	231.00 €	166.00 €
Coste alquiler equipos	45.00 €	45.00 €	45.00 €	45.00 €	45.00 €
Base imponible	3,688.00 €	5,153.00 €	3,716.00 €	4,788.00 €	3,453.00 €
IVA	590.00 €	824.00 €	595.00 €	766.00 €	552.00 €
Total	4,278.00 €	5,977.00 €	4,311.00 €	5,554.00 €	4,005.00 €
€/ KWh	0.0857	0.0827	0.0830	0.0827	0.0830

5.4.1.4 Planilla de costos y relaciones beneficio/costos

Los costos anuales equivalentes (CAE definidos en sección 5.3.5.2) de inversión del capital en instalación y regulador para la situación actual y la situación de diseño óptimo se calculan en una planilla indicada en la tabla 5.4.1.4-1. Como datos se solicitan el ciclo de vida (20 años), el interés financiero, la inflación anual y los costos de los distintos componentes. El periodo de retorno del capital invertido en el regulador producido por el ahorro de energía es calculado en la última fila de la misma tabla.

Los costos anuales de mantenimiento para la situación **actual**, **actual B=1** y **actual eficiente** son calculados para la política de mantenimiento actual como un costo anual fijo a partir del costo por punto de luz facturado por la empresa de mantenimiento externa o del costo interno del ayuntamiento cuando corresponda (ver tabla 5.4.1.4-2).

En las situaciones **actual óptima** y **diseño óptimo** se debe efectuar un calculo adicional de los costos de mantenimiento para cada zona que compone el cuadro analizado. Como se busca la política óptima en ambas situaciones, esta se alcanzará cuando la relación B/C sea máxima en la zona para las distintas políticas y periodos de reposiciones masivas programas de lámparas y frecuencias de limpiezas de luminarias posibles de implementar.

Tabla 5.4.1.4-1: Planilla de costos de instalación para el cuadro 27

5. Costos de instalación mantenimiento, renovación y eliminación

Cuadro 27

Ciclo de vida [años]	20
Interés financiero	4.2 %
Inflación anual	2.0 %
Índice de cuota anual equivalente	0.0621

5.1 Costos de Instalación

Luminaria		Soporte	
IP2	930.00 €	baculo	h*42
IP5	1,040.00 €	brazo	50
IP6	1,125.00 €		
Costo de regulador en cabecera	4,374.00 €		
Costo de instalación	120.00 €		
Total	4,494.00 €		

Instalación	Actual						Optimo						
	Calle	NPL	Luminaria	Soporte	Alzada	Costo Ut.	Total	NPL	Luminaria	Soporte	Alzada	Costo Ut.	Total
1	Carrer 1 - 1	8	IP5	brazo	9	1,090.00 €	8,720.00 €	5	IP5	brazo	8	1,090.00 €	5,450.00 €
2	Carrer 2 - 1	8	IP5	baculo	12	1,544.00 €	12,352.00 €	6	IP5	baculo	11	1,502.00 €	9,012.00 €
3	Carrer 3 - 1	9	IP5	baculo	12	1,544.00 €	13,896.00 €	6	IP5	baculo	11	1,502.00 €	9,012.00 €
4	Carrer 4 - 1	33	IP5	baculo	12	1,544.00 €	50,952.00 €	36	IP5	baculo	11	1,502.00 €	54,072.00 €
5	Carrer 5 - 2	19	IP5	baculo	12	1,544.00 €	29,336.00 €	15	IP5	baculo	11	1,502.00 €	22,530.00 €
6													
7													
8													

Total instalación sin reductor	115,256.00 €	100,076.00 €
Media por punto de luz sin reductor	1,496.83 €	1,471.71 €
Total anual sin reductor	7,155.83 €	6,213.36 €
Media por punto de luz con reductor	1,555.19 €	1,537.79 €
Total anual con reductor	7,434.85 €	6,492.37 €
Periodo de retorno del capital invertido en el regulador	2.70 años	2.90 años

A fin de determinar el B/C máximo en cada zona y de allí extraer los costos de mantenimiento se utilizan dos programas, uno para optimizar el mantenimiento de la instalación actual en la zona y el otro para optimizar el mantenimiento de la nueva instalación de diseño óptimo. Los programas, realizados por el autor, determinan los costos de mantenimiento descritos en secciones 5.3.3.1 a 5.3.3.4, para periodos de sustitución comprendidos entre 2 meses a 6 años y 10 frecuencias de limpiezas de las luminarias donde una limpieza coincide con la sustitución de luminarias. A continuación se resumen las ecuaciones principales para evaluar las situaciones *actual óptima* y de *diseño óptimo*.

a) programa B/C para evaluar la situación actual óptima

En la determinación del beneficio los factores $K(E)$, $K(PAP)$ son función de la política de mantenimiento, del período de sustitución (T_p), frecuencia de limpieza (T_L) y características de la instalación.

Para determinar $K(E)$, la iluminancia media sobre la zona se obtiene de ecuación:

$$E = E_o \cdot FM \tag{5.4.1.4-1}$$

donde:

- E_o : iluminancia media de la instalación en la zona a evaluar, la que se obtiene por medición después de las operaciones de limpieza y recambio de lámpara (ver sección 6.3.3.1) por lo tanto corresponde a las condiciones iniciales.
- FM : factor de mantenimiento, descrito en sección 4.6, es función de la política de mantenimiento, del periodo de recambio (T_p) y de la frecuencia de limpieza según se indica en tabla 5.4.1.4-2.
- E : iluminancia media sobre la zona a evaluar reducida por depreciación, la que depende de la política aplicada y de los periodos de operaciones.

Tabla 5.4.1.4-2: Factor de mantenimiento FM para las políticas de mantenimiento consideradas

	Política	Factor de mantenimiento FM
1	SM+LM (Sustitución masiva programada mas limpieza masiva)	$LLO(T_p, \text{tipo de lámpara}) \times LOR(T_p, IP \text{ de la luminaria}) \times LSF(T_p, \text{tipo de lámpara})$
2	SC+SM+LM (Sustitución correctiva mas sustitución masiva programada mas limpieza masiva)	$LLO(T_p, \text{lámpara}) \times LOR(T_p, IP \text{ de la luminaria})$
3	SC+LM (Sustitución correctiva mas limpieza masiva programada)	$\text{valor medio de } LLO(0 \text{ a } 2 \cdot T_{50\%} \text{ lámpara}) \times LOR(T_p, IP \text{ de la luminaria})$
4	SC+LS (Sustitución correctiva mas limpieza simultanea)	$\text{valor medio de } LLO(0 \text{ a } 2 \cdot T_{50\%} \text{ lámpara}) \times \text{valor medio de } LOR(0 \text{ a } 2 \cdot T_{50\%}/T_o, IP \text{ de la luminaria})$

donde:

- LLO : Depreciación del flujo de la lámpara por envejecimiento, es función del tiempo de uso, por lo tanto del T_p , y del tipo de lámpara.
- LOR : Depreciación de la luminaria por polución, es función del tiempo de uso, por lo tanto de T_p , y del grado de protección mecánica de la luminaria (IP)
- LSF : Supervivencia de la lámpara, , es función del tiempo de uso, por lo tanto de T_p y del tipo de lámpara.

El factor $K(PAP)$ en el caso de una política de sustitución masiva programada de lámparas sin cambios correctivos, depende del tiempo transcurrido hasta el siguiente cambio masivo, por lo tanto depende del periodo T_p . La función que representa el PAP en este caso es $(1-LSF)$. Para las restantes políticas el PAP se determina de acuerdo a sección 5.2.3.

b) programa B/C para situación de diseño óptima

En forma similar al programa "a" los factores $K(E)$, $K(PAP)$ son función de la política de mantenimiento, de los periodos T_p , T_L y de las características de la instalación.

A diferencia del caso de instalaciones existentes donde la iluminancia inicial se obtiene de mediciones posteriores a operaciones de mantenimiento, las condiciones iniciales serán el resultado de un nuevo diseño basándose en los parámetros luminotécnicos recomendados $E_{min.mant}$, de acuerdo a las exigencias funcionales de la zona. Mediante un programa de diseño convencional [35],[36] se determina el número de puntos de luz iniciales NPL_o y la geometría de la instalación mas apropiada tal que $E_{med} \geq E_{min.mant}$ en cada zona con las restricciones U_o , U_L y $FM=1$. Mediante un segundo programa, "B/C para situación de diseño óptima" se determina el número de puntos de luz finales NPL_f de acuerdo al FM y la política que produzca el $B/[CAE/(lx.m^2)]$ máximo (el CAE se ha definido en sección 5.3.5.2)

Las ecuaciones utilizadas en el calculo para determinar $K(E)$ son:

$$NPL_f = \frac{E_{min.mant} \cdot ancho \cdot largo}{f_{Lo} \cdot CU \cdot FM} \quad 5.4.2-2$$

$$CU = \frac{E_{med} \cdot ancho \cdot largo}{f_{Lo} \cdot NPL_o} \quad 5.4.2-3$$

$$NPL_f = \frac{E_{min.mant} \cdot NPL_o}{E_{med} \cdot FM} \quad 5.4.2-4$$

$$E = \frac{NPL_f \cdot E_{med} \cdot FM}{NPL_o} \quad 5.4.2-5$$

donde:

- $E_{min.mant}$: iluminancia mínima mantenida
- NPL_o : número de puntos de luz con $FM=1$ resultado del programa de diseño
- f_{Lo} : flujo inicial de lámpara
- CU : Coeficiente de utilización de la instalación a evaluar
- $ancho$: ancho de la de la zona a evaluar
- $largo$: longitud de la zona a evaluar
- E : Iluminancia final sobre la zona con NPL_f utilizada para calcular $K(E)$

El factor $K(PAP)$ se calcula en forma similar al caso anterior del programa "a".

Para cada zona del cuadro los resultados obtenidos de la ejecución de los programas permiten visualizar gráficas de costos anuales equivalentes de la instalación por unidad de área y lux $CAE \cdot 10^3/(lx.m^2)$ y la relación $B/[CAE/(lx.m^2)]$ de cada zona analizada además de indicar los máximos para cada política.

Para ejemplificar la aplicación, se analizan en forma descriptiva los datos de una zona del cuadro 27. En tabla 5.4.2-2 se indican los datos de la zona: Calles 4-1 de cuadro 27.

Para la situación actual óptima, en figuras 5.4.2-1 a 5.4.2-6, se indican los resultados del programa de optimización aplicado a la zona para las distintas políticas analizadas y en tabla 5.4.2-3 se resumen los valores máximos para el criterio B/C con el cual se elige la política y los costos correspondientes.

Tabla 5.4.2-2: Resumen de los datos de la instalación del cuadro 27 junto a los parámetros de las funciones de ajuste de *LLO*, *LSF* y *LOR*.

Datos característicos de la instalación

Zona:	Carrer 4-1
E mínima mantenida [lux]:	25.0
E inicial [lx]:	29.2
Num. Puntos de luz	33
Ancho de la calzada [m]	14
Longitud de la calzada [m]	891
Lámpara:	SodioAP
Potencia de lámpara [W]	250
Flujo [lm]	32000
Protección mecánica de luminaria:	StBoi
Coefficiente de utilización:	0.344925
Altura de montaje [m]:	12
Período de amortización [años]:	20.0
Tiempo de utilización [horas/año]:	4277.5
Porcentaje de averías permanente mínimo	1.00%
Porcentaje de averías permanente máximo	3.00%
Porcentaje de averías observado	1.00%

Políticas de mantenimiento

- 1) Operaciones programadas de sustitución masiva de lámparas y limpieza de luminarias (SM+LM)
- 2) Operaciones programadas de sustitución masiva de lámparas y limpieza de luminarias, mas operaciones correctivas de lámparas (SM+LM+SC)
- 3) Operaciones correctivas de sustitución de lámparas y operaciones programadas de limpieza de luminarias (SC+LM).
- 4) Operaciones correctivas de sustitución de lámparas y limpieza de luminarias simultaneamente (SC+LS).

Costos [euros]:

Energía [€/KWh]	0.0838
Costo de la lámpara [euros]:	37.14
Costo del punto de luz [euros]	1544
Sustitución masiva de lámparas	18.45
Limpieza masiva de luminarias (MO+Mat.)	18.45
Sustitución y limpieza masiva simultanea	24.6
Sustitución correctiva y control de lámpara	36.9
Sustitución correctiva de lámparas + limpieza	49.2

Coefficientes de ajuste(u,p) de $F=u+(1-u)*exp(-p*t)$

	u	p
LLO	0.91	0.1
LSF	1.017	-1.250E-04
LOR antes de la limpieza	0.74	1.849
LOR después de la limpieza	1	0

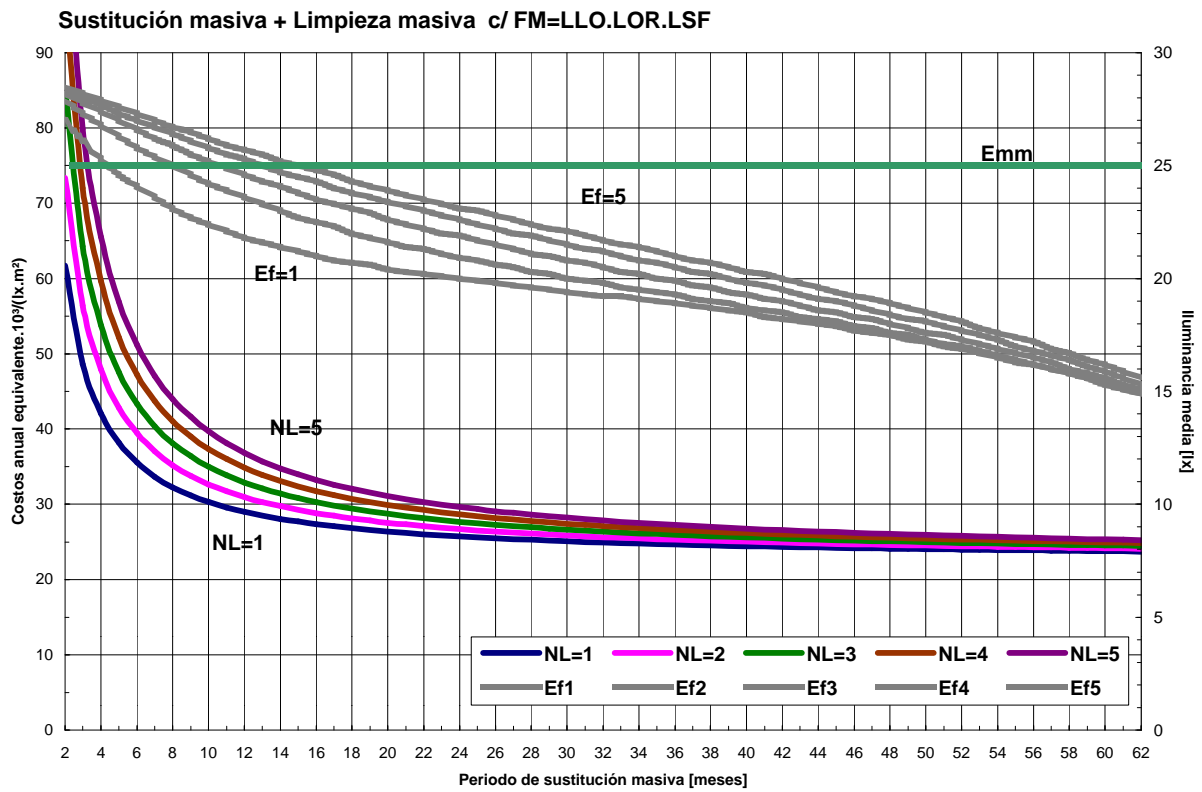


Figura 5.4.2-1: Costo anual equivalente (CAE) por lux y m² junto a la E_{med}, en función del periodo de sustitución masivo de lámparas y de la frecuencia de limpieza, para la política **SM+LM**

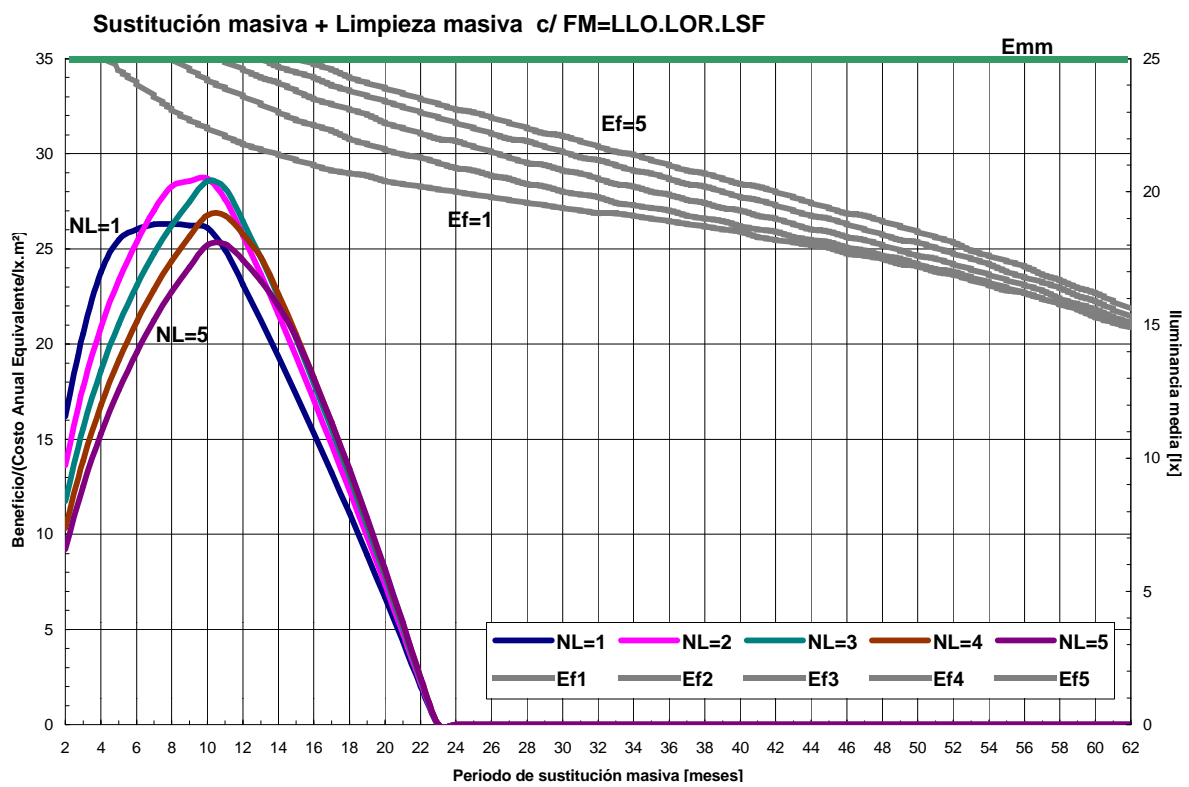


Figura 5.4.2-2: Beneficio/ CAE por lux y m² junto a la E_{med}, en función del periodo de sustitución masivo de lámparas y de la frecuencia de limpieza, para la política **SM+LM**

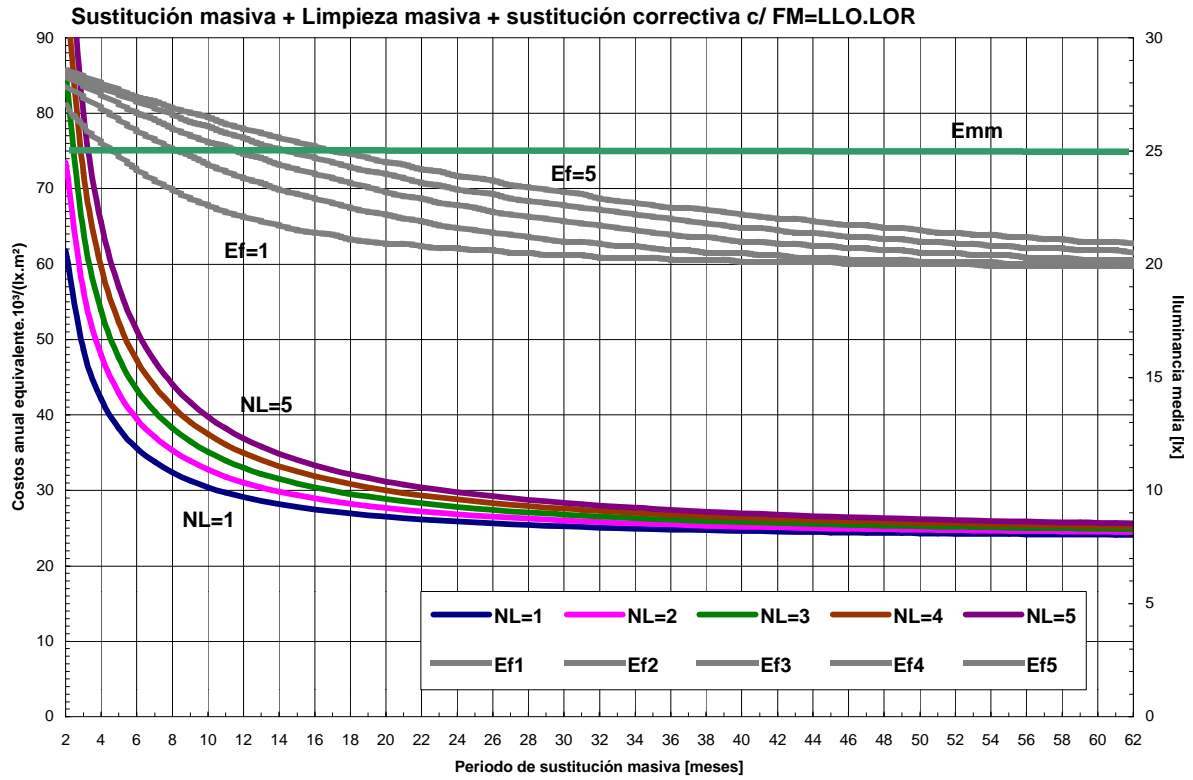


Figura 5.4.2-3: Costo anual equivalente por lux y m² junto a la E_{med}, en función del periodo de sustitución masivo de lámparas y de la frecuencia de limpieza, para la política **SM+LM+SC**

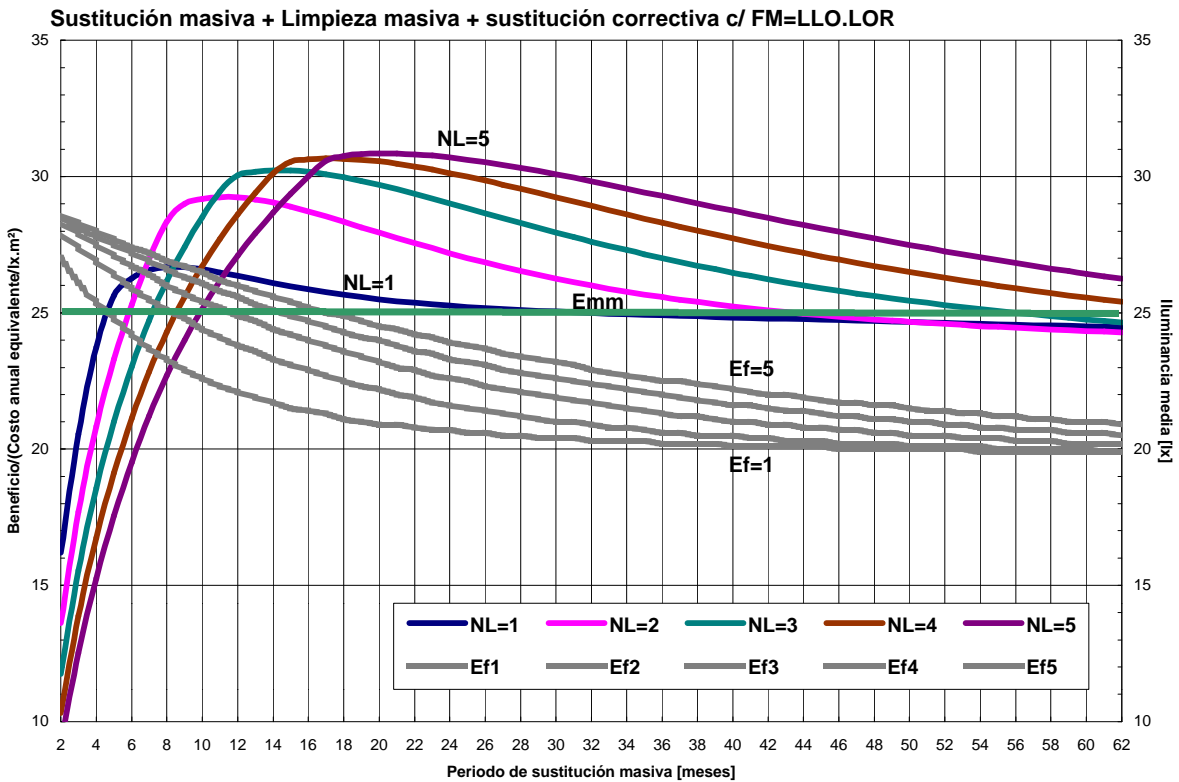


Figura 5.4.2-4: Beneficio/CAE por lux y m² junto a la E_{med}, en función del periodo de sustitución masivo de lámparas y de la frecuencia de limpieza, para la política **SM+LM+SC**

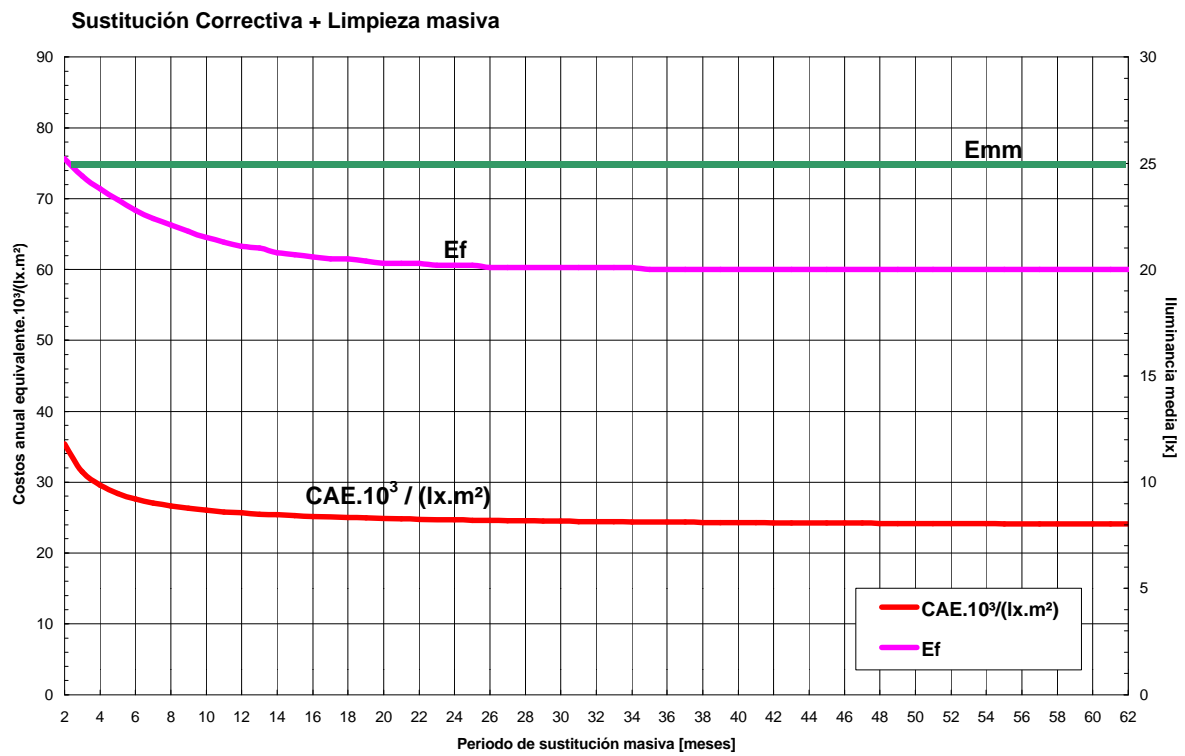


Figura 5.4.2-5: Costo anual equivalente por lux y m² junto a la E_{med} , en función del periodo de sustitución masivo de lámparas y de la frecuencia de limpieza, para la política **SC+LM**.

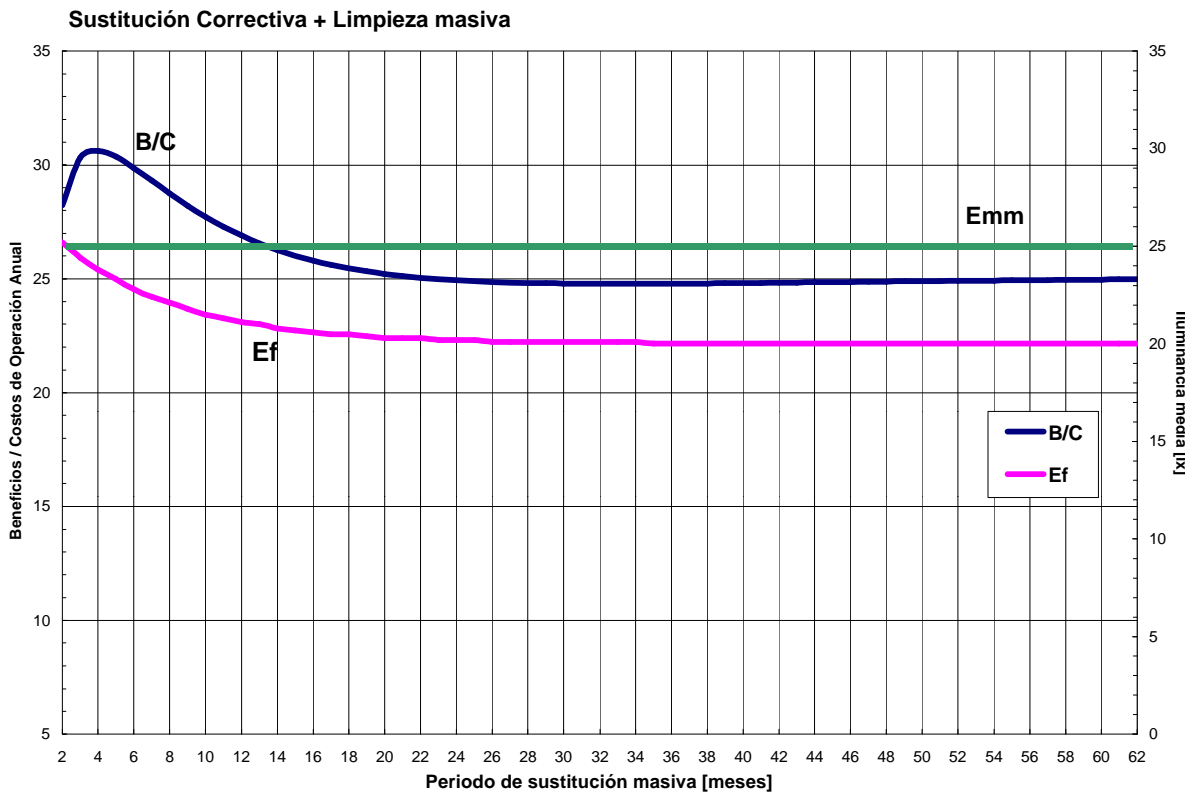


Figura 5.4.2-6: Beneficio/CAE por lux y m² junto a la E_{med} , en función del periodo de sustitución masivo de lámparas y de la frecuencia de limpieza, para la política **SC+LM**.

Tabla 5.4.2-3 Valores máximos para el criterio B/C con el cual se elige la política y los costos

Zona: Carrer 4-1 Em [lx] : 25 Luminaria: StBoi Lámpara: SodioAP 250

Criterio: (Beneficio/Costo) máximo

Política	Periodo CM	Periodo LM	Ef	FM	Costos anuales equivalentes					Beneficio	B/(CAE/lx.m²)
					Capital	Energía	Mantenim.	Total	CAE.10³/(lx.m²)		
SM+LM	10.4	3.5	25.1	0.859	3,577.9	3,430.4	3,755.9	10,764.2	34.5	0.999	28.94
SM+LM+SC	23.3	3.9	24.5	0.838	3,577.9	3,430.4	2,656.2	9,664.5	31.0	0.958	30.91
SC+LM	-	3.9	23.9	0.818	3,577.9	3,430.4	2,265.6	9,273.9	29.7	0.911	30.63
SC+LS*	-	-	20.3	0.696	3,577.9	3,430.4	446.1	7,454.4	23.9	0.625	26.16

correspondientes.

De tabla 5.4.2-3 se observa que la política mas adecuada para la zona analizada es SM+LM+SC, sin embargo debido a que la iluminancia recomendado para la zona es cercano al valor *Emin.mant* de diseño, los periodos de operaciones de mantenimiento son excesivamente cortos. Se trata de compensar con el mantenimiento frecuente un problema de diseño lo que no es conveniente por los elevados costos que implica en este caso.

En tabla 5.4.2-4 a tabla 5.4.2-6 se resumen los costos de mantenimiento para las distintas zonas de cuadro 27 y en tabla 5.4.2-7 se resumen las relaciones B/C máximas para las distintas situaciones consideradas.

Tabla 5.4.2-4: Planilla de calculo de costos de mantenimiento anual y renovación del cuadro N°27

5.2 Costos de mantenimiento anual

Mantenim. facturado/pto. de luz 35.71 €

Instalación		actual			diseño óptimo	
Nº	Calle	NPL	facturado	optimizado	NPLf	Costo
1	Carrer 1 - 1	8	285.68 €	112.2	5	71.4
2	Carrer 2 - 1	8	285.68 €	1167.4	6	87.9
3	Carrer 3 - 1	9	321.39 €	127.8	6	65.9
4	Carrer 4 - 1	33	1,178.43 €	2656.2	36	964.6
5	Carrer 5 - 2	19	678.49 €	269.5	15	171
6						
7						
8						
Total			2,749.67 €	4,333.10 €		1,360.80 €

5.3 Costos de renovación

Componente a renovar	Costo/Ut	Recambio*
Reactancia+condensador	80.00 €	20.00 €

Nota*: Costo de operación simultanea con limpieza y cambio masivo incluidos inpuestos y beneficios a valor presente

Instalación		Actual		diseño óptimo	
Nº	Calle	NPL	Costo	NPL	Costo
1	Carrer 1 - 1	8	800.00 €	5	500.00 €
2	Carrer 2 - 1	8	800.00 €	6	600.00 €
3	Carrer 3 - 1	9	900.00 €	6	600.00 €
4	Carrer 4 - 1	33	3,300.00 €	36	3,600.00 €
5	Carrer 5 - 2	19	1,900.00 €	15	1,500.00 €
6					
7					
8					
Total			7,700.00 €		6,800.00 €
Anual equivalente			478.07 €		422.19 €

Tabla 5.4.2-5: Planilla de calculo de costos de eliminación de cuadro N°27.

5.4 Costos de eliminación

Alzada	5 a 9 m	9.1 a 12m	12.1 a 15m
Eliminación de baculo+instalación	71.60 €	102.30 €	122.00 €

Instalación		Actual			diseño óptimo		
Nº	Calle	NPL	Alzada	Costo	NPL	Alzada	Costo
1	Carrer 1 - 1	8	9	572.80 €	5	8	358.00 €
2	Carrer 2 - 1	8	12	818.40 €	6	11	613.80 €
3	Carrer 3 - 1	9	12	920.70 €	6	11	613.80 €
4	Carrer 4 - 1	33	12	3,375.90 €	36	11	3,682.80 €
5							
6							
7							
8							
Total				5,687.80 €	5,268.40 €		
Media por punto de luz				98.07 €	99.40 €		
Anual equivalente				353.13 €	327.10 €		

Tabla 5.4.2-6: Planilla de calculo de costos por unidad geométrica para el cuadro N°27.

6. Costos y relaciones Costo-beneficio (1)**Costos anuales equivalentes**

Caso	Red.%	Instalación	Renovación	Eliminación	Inst+Renov+Elim	Energía	Mantenim.	CAE
actual	40 %	7,434.85 €	478.07 €	353.13 €	8,266.05 €	4,278.00 €	2,749.67 €	15,293.72 €
Consumo y uso eficiente	0 %	7,155.83 €	478.07 €	353.13 €	7,987.03 €	5,977.00 €	2,749.67 €	16,713.70 €
Consumo, uso y mant. optimo	40 %	7,434.85 €	478.07 €	353.13 €	8,266.05 €	4,311.00 €	2,749.67 €	15,326.72 €
	0 %	7,155.83 €	478.07 €	353.13 €	7,987.03 €	5,977.00 €	4,333.10 €	18,297.13 €
diseño optimo	0 %	6,213.36 €	422.19 €	327.10 €	6,962.64 €	5,554.00 €	1,360.80 €	13,877.44 €
	40 %	6,492.37 €	422.19 €	327.10 €	7,241.66 €	4,005.00 €	1,360.80 €	12,607.46 €

6.1 Costos anuales equivalentes por unidad geométrica

Caso	Red.%	B	CAE/NPL	CAE/m	CAE/m²	CAE.10³/(m².lx) lx min.mant.	CAE.10³/(m².lx) lx actuales
actual	40 %	0.68	198.62 €	9.01 €	0.85 €	43.85 €	47.75 €
Consumo y uso eficiente	0 %	0.68	217.06 €	9.85 €	0.93 €	47.93 €	52.18 €
Consumo, uso y mant. optimo	40 %	0.68	199.05 €	9.03 €	0.85 €	43.95 €	47.85 €
	0 %	0.74	237.63 €	10.78 €	1.02 €	52.47 €	57.13 €
diseño optimo	40 %	0.74	219.61 €	9.96 €	0.94 €	48.49 €	52.80 €
	0 %	1.00	204.08 €	8.18 €	0.77 €	39.79 €	43.33 €
	40 %	1.00	185.40 €	7.43 €	0.70 €	36.15 €	39.36 €

Notas: En el caso **actual optimo** el costo de mantenimiento es la suma de los costos de cada zona y el B es la ponderación por flujo de cada zona evaluada individualmente
En el caso **diseño optimo** el costo de mantenimiento es la suma de los costos de cada zona

Tabla 5.4.2-7: Relaciones beneficio/costo para los distintos criterios de análisis para el cuadro 27.

Costos y relaciones Costo-beneficio (2)**6.2 Relaciones costo-beneficio CB**

Caso	Red.%	CAE/B	(CAE/NPL)/B	(CAE/m)/B	(CAE/m ²)/B	[CAE.10 ³ /(m ² .lx)] / B lx min.mant.	[CAE.10 ³ /(m ² .lx)]/B lx actuales
Actual	40 %	22,531.75 €	292.62	13.28	1.26	64.61	70.35
Actual con B=1	40 %	15,293.72 €	198.62	9.01	0.85	43.85	47.75
Consumo y uso eficiente	0 %	24,623.76 €	319.79	14.51	1.37	70.61	76.88
	40 %	22,580.36 €	293.25	13.31	1.26	64.75	70.50
Consumo, uso y mant. optimo	0 %	24,725.85 €	321.11	14.57	1.38	70.90	77.20
	40 %	22,851.55 €	296.77	13.47	1.27	65.53	71.35
diseño optimo	0 %	13,877.44 €	204.08	8.18	0.77	39.79	43.33
	40 %	12,607.46 €	185.40	7.43	0.70	36.15	39.36

6.3 Relaciones beneficio-costo BC

Caso	Red.%	B/CAE x1000	B/(CAE/NPL) x1000	B/(CAE/m)	B/(CAE/m ²)	B/[CAE/(m ² .lx)] lx actuales	B/[CAE/(m ² .lx)] lx min.mant.
Actual	40 %	0.04	3.42	0.08	0.80	14.22	15.48
Actual con B=1 *	40 %	0.07	5.03	0.11	1.17	20.94	22.80
Consumo y uso eficiente	0 %	0.04	3.13	0.07	0.73	13.01	14.16
	40 %	0.04	3.41	0.08	0.79	14.18	15.44
Consumo, uso y mant. optimo	0 %	0.04	3.11	0.07	0.73	12.95	14.10
	40 %	0.04	3.37	0.07	0.79	14.02	15.26
diseño optimo	0 %	0.07	4.90	0.12	1.29	23.08	25.13
	40 %	0.08	5.39	0.13	1.42	25.40	27.66

Notas:

* Situación con B=1 y tiempo de operación teórico en el cálculo de costos energéticos

5.5 Conclusiones

En el presente capítulo se ha propuesto una metodología para evaluar instalaciones de alumbrado enfocada a valorar la calidad del servicio del alumbrado urbano. La relación beneficio/costos durante el ciclo de vida es estudiada y los factores más importantes que la componen son considerados.

El beneficio es valorado en términos de iluminancia, tasa de fallos, tiempos de operación y apariencia de la instalación. Estos factores son evaluados tomando como referencia valores convenientemente establecidos por normas o recomendaciones, por arriba de los cuales no se considera contribución al beneficio. Por otra parte valores límites no admitidos, son considerados, por debajo de los cuales el beneficio es nulo.

Un análisis de los costos de instalación, explotación, mantenimiento, renovación y reciclado es efectuado considerando el ciclo de vida de las instalaciones y el costo financiero de las inversiones. Las alternativas más factibles de políticas de mantenimiento son también analizadas.

Finalmente se describe la aplicación de la metodología y la simulación de distintas situaciones para detectar desviaciones, la que será utilizada para evaluar instalaciones de alumbrado desde la óptica del diseño e instalaciones de alumbrado existentes, en el capítulo 6.

Bibliografía del capítulo**[1] Manzano E.R., San Martín R. (1999)**

Procedure for continue urban lighting management evaluation
Proceedings 24th Session of the CIE page 234 to 238, Warsaw,.

[2] Gramlich, Edward M., A (1990)

Guide to Benefit-Cost Analysis, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey,

[3] Belcher, M. C. (1994)

Benefits-adjusted Cost Analysis of Lighting Systems
Proceedings of the 1994 Illuminating Engineering Society of North America Annual
Conference

[4] CIE 33 (1977)

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

[5] IESNA Ch25(2000)

Lighting Economics, Illuminating Engineering Society of North America. Lighting
Handbook, Reference & Application, Chapter 25, 9th Edition.

[6] Di Fraia L., Salemme F., Scognamiglio R. (1990)

Optimisation of lighting designs by the equi-lux maintenance approach
CIBSE National Lighting Conference

[7] Adrian W. (1993)

The physiological basis of the visibility concept
Proceeding of the 2nd International Symposium on Visibility an Luminance in Road
Lighting . page 17-30 Orlando USA.

[8] Phillips E.S. (1993)

Computer visualisation of roadway lighting. STV vs. traditional design criteria
Proceeding of the 2nd International Symposium on Visibility an Luminance in Road
Lighting . pag 31-41 Orlando USA.

[9] Dijon J. M., Maldague L. (1997)

Quality criteria for road lighting: Luminance and uniformity levels? or visibility?
Proceeding of the VIIIth European Lighting Conference, Lux Europa 97. Page 37-
57.Amterdam. The Netherlands

[10] Manzano E.R., Cabello A.J. (2000)

Visibility measurements with CCD in road lighting
Journal Ingeniería Iluminatului, Tempus-Phare Program

[11] Vizmanos J.G., Fuentes L.M./Arias J. (1993)

Static measurements of visibility in public lighting
Proceeding VIIth European Lighting Conference, Lux Europa 93, pag143-149.UK.

[12] Arce J., Manzano E., Cabello A., Kirschbaum C. (1997)

Medición de propiedades de reflexión de calzadas mediante cámara CCD. Ponencia
presentada en el Congreso Lux América, Valparaíso, Chile.

[13] **Rea, M.S. , Ouellette M.J. (1988)**

Visual performance using reaction times.

Lighting Research & Technology 20 (Nº4) page 139 :153. UK

[14] **Rea, M.S. , Ouellette M.J. (1991)**

Relative visual performance: a basis for application.

Lighting Research & Technology 23 (Nº3) page 135:144. UK

[15] **IESNA Ch3(2000)**

Vision and perception. Lighting Handbook, Reference & Application, Chapter 3, 9th Edition.

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

Guide to the Lighting of Urban Areas. Commission Internationale de l'Eclairage. Publication CIE Nº 136 ISBN 3 900 734 98 4

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

Road Lighting, Chapter 2, Philips Technical Library . Holland.

[18] **Centre d'Informaton de l'Eclairage (1984)**

Eclairage public et sécurité. France

[19] **Clear R., Rubinstein F. (1999)**

A cost benefit analysis applied to lumen maintenance controls

Journal of the Illuminating Engineering Society page 113-126, Summer 1999

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

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

[21] **MOSECA (1997)**

Datos sobre el mantenimiento en Barcelona, España

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

The economics of lighting maintenance

Lighting Research and Technology Vol. 23 Nº3. UK

[23] **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.

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

Life expectancy curves and lumen maintenance curves.

[25] **CIE Commission Internationale de l'Eclairage (1998)**

Maintenance of outdoor lighting systems. Draft Division 5 TC 5.14

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

Design guide for road lighting maintenance. Illuminating Engineering Society of North America. Subcommittee on Maintenance & Light sources, DG-4.

[27] ELCF DL(1997)

Discharge lamps and the environment. European Lighting Companies Federation 4th edition. Brussels

[28] Siedel I. (1992)

Strom aus Kohle.
IZE Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft

[29] Trond, H., Eilif H.H (1995)

Environmental aspects of light sources, Right Light Three Conference, Newcastle, UK

[30] Daly K. (2000)

Lamp disposal rules change, Lighting Futures, vol.4 no.2, ISSN 1081-8227.

[31] Begley, K/Linderso T. (1991)

Management of mercury in lighting products. Proceedings of Right Light 1, Stockholm, Suecia

[32] ICAEN (1998)

Tecnologies avançades en el estalvi i eficiència energètica. Institut Català de l'Energia. Espanya.

[33] San Martín, R. Albert, V., Sierra C., Jofre B. (1999)

Iluminación y medio ambiente, Institución de Estudios Medioambientales, Fundación Politécnica de Cataluña

[34] R.F. PROCES, S.A. (1999)

Centre de Tractament i Reciclatge de Piles i fluorescents, El Pont de Vilomara i Rocafort, Catalunya, España. <http://www.rfproces.com/gestion/pilas.htm>

[35] ELCF R(1998)

Collection and recycling of end of life light sources. European Lighting Companies Federation 2th edition. Brussels

[36] Marsden A., van Bommel W. (1981)

Kosten der Straßenbeleuchtung
Licht Forschung 3 Nr.1

[37] Philips Lighting B.V. (1997)

software: Calculux Viario 1.1

[38] Lighting Technologies Inc. (1999)

software: Lumen Micro 7.5